



**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

Implementierung von Sensor-based Material flow Monitoring in einer Kunststoffsortieranlage

S. Schloegl¹, J. Kamleitner², N. Kroell³ & X. Chen³

¹) Montanuniversität Leoben, Institut für Abfallverwertungstechnik und Abfallwirtschaft, Leoben, Österreich

²) Siemens Advanta Solutions GmbH, Wien, Österreich

³) RWTH Aachen University, Institut für Anthropogene Stoffkreisläufe, Aachen, Deutschland

KURZFASSUNG: Um die Zielfractionen für das Recycling, welche in einer Kunststoffsortieranlage entstehen, in Menge und Qualität zu steigern, ist der Einsatz von Monitoringtechnologien eine wirkungsvolle Methode. Dadurch kann eine konstante Anlagenperformance sichergestellt werden. Die hohe Heterogenität der Leichtverpackungsabfälle und die Notwendigkeit von hohen Durchsätzen für einen wirtschaftlichen Anlagenbetrieb erschweren allerdings die Implementierung solcher Systeme. Die ersten Ergebnisse einer Versuchsreihe mit fünf externen Sensoren (vier Nahinfrarot-Sensoren, ein Volumenstromsensor) in einer österreichischen Kunststoffsortieranlage zeigen, dass die Korrelation der Daten von verschiedenen internen und externen Sensoren in der Anlage möglich ist. Zu beachten ist dabei insbesondere die Transportzeit zwischen den Messpunkten und die nötige Kalibrierung von internen Sensordaten aus sensor-basierten Sortierern. Es wurde ein erstes Modell zur Vorhersage der Stoffstromqualität des PET-Stromes auf Basis von Sensordaten am Beginn der Anlage und einigen Anlagenkennwerten entwickelt. Dieses ermöglicht bei einer Erweiterung um ökonomische Werte auch einen Vergleich verschiedener Szenarien, wie Durchsatzvariationen oder unterschiedliche Anzahl von Sortierpersonal, und somit neben der hohen Anlagenperformance auch einen wirtschaftlichen Anlagenbetrieb.

1 EINLEITUNG

In einer Umfrage des Umweltbundesamtes (2019) bestätigen die Betreiber großer Sortieranlagen für Leichtverpackungen (LVP) in Österreich, dass die technischen Potentiale zur Erreichung der besten Sortierergebnisse nicht ausgeschöpft sind und Bedarf an Nachrüstung besteht. Lediglich 31 Ma.-% – 38 Ma.-% des Outputs gelten aktuell als Zielfractionen für das Recycling. Insbesondere die Qualität der PET-Sortierung ist in Österreich besonders relevant, da etwa ein Viertel aller in Österreich für das werkstoffliche Recycling übernommenen Kunststoffabfälle Verpackungsabfälle aus PET sind. Auch dürfen in Österreich Rezyklate für den Lebensmittelbereich bis dato ausschließlich aus PET sein (UBA 2021). Stoffstrommonitoring ermöglicht eine inline Qualitätskontrolle, sowie Prozessoptimierung zur Steigerung von Menge und Qualität von PET und anderen Zielfractionen (Kroell et al. 2022, Küppers et al. 2020, Schlögl et al. 2022).

Stoffstrommonitoring und sensor-basierte Qualitätskontrolle sind in vielen Branchen bereits Stand der Technik. Die Lebensmittelindustrie (Liu et al. 2017, Zeng et al. 2021) sowie die Pharmazie (Botker et al. 2019) sind Paradebeispiele für präzise Prozessüberwachung durch diverse Monitoringtechnologien und damit der Garantie hochwertiger und konstanter Outputqualitäten. In den letzten Jahren stieg das Interesse an Monitoring auch in der Abfallwirtschaft, die große Heterogenität der Abfälle und die Komplexität der Zusammenhänge verschiedener Sortierstufen sind dabei allerdings eine besondere Herausforderung. Insbesondere eine zu hohe Bandbelegung in Folge eines zu hohen Durchsatzes reduziert nicht nur die Sortierperformance, sondern hemmt auch die Qualität des sensor-basierten Monitorings durch sich überlappende Partikel (Kroell et al. 2022, Küppers et al. 2020). Daraus leitet sich das besondere Interesse nicht nur an Monitoring mittels Nahinfrarot-Sensoren (NIR-Sensoren) zur Bestimmung der Materialzusammensetzung (Schlögl et al. 2022) sondern auch der Bestimmung des Durchsatzes mittels Volumenstromsensoren (Schwarzenbacher 2022) ab.

Im Forschungsprojekt EsKorte wird daher untersucht, wie die konkrete Implementierung von Monitoring in LVP-Sortieranlagen aussehen kann. Dafür werden sowohl zusätzlich montierte Sensoren über Förderbändern („Externe Sensoren“), sowie bereits für sensor-basierte Sortierung (SBS) bestehende Sensorik („Interne Sensoren“) getestet. Durch die Relevanz der PET-Fraktion liegt der Fokus der vorliegenden Untersuchung auf dem Verhalten des PET-Materials in der Anlage. Zu diesem Zweck wurde ein Vorhersagemodell für die entstehende PET-Qualität entwickelt.

2 VERSUCHSSETTING

Zur Evaluierung des Potenzials eines sensorbasierten Stoffstrommonitorings wurden in der Kunststoffsortieranlage der Brantner Sort4You GmbH in Niederösterreich vier NIR-Sensoren und ein Volumenströmsensor positioniert. Die NIR-Messpunkte wurden so gewählt, dass eine Beurteilung der Sortierperformance in Hinblick auf das PET-Material möglich ist. Der Volumenströmsensor ermöglichte zusätzlich die Betrachtung des Durchsatzes und dessen Auswirkungen auf die Sortierperformance. Weiters wurden für den Versuchszeitraum von zwei Wochen die Daten eines sensor-basierten Sortierers (SBS) gespeichert, um zu untersuchen, ob auch bereits vorhandene Sensorik für die Stoffstromüberwachung herangezogen werden kann.

2.1 Positionierung der Sensoren

Um die Stoffstromzusammensetzung und Bandbelegung an verschiedenen Positionen der Anlage bestimmen zu können wurden vier NIR-Sensoren des Modells EVK HELIOS EQ32 (EVK DI Kerschhagl GmbH, Raaba, Österreich), jeweils mit einseitiger Halogen-Beleuchtung, installiert. Die Höhe der Sensoren wurde dabei auf die unterschiedlichen Bandbreiten an den Messpunkten (MP) angepasst (MP1: 199 cm, MP2: 64 cm, MP3: 180 cm, MP4: 153 cm).

Der erste installierte Sensor in der Anlagenlinie war ein LIDAR-Volumenströmsensor des Modells TiM561 (SICK AG, Waldkirch, Deutschland). Dieser wurde unmittelbar nach der manuellen Abscheidung sperriger Güter montiert. Die NIR-Messpunkte waren folgendermaßen verteilt:

- MP1: Unmittelbar nach dem Ballistikseparator im 3D-Strom; Beschleunigungsband.
- MP2: Förderband für manuell aussortierte PET-Flaschen aus dem 2D-Strom.
- MP3: Nach mehreren manuellen und automatischen Sortierstufen zur Abscheidung von Nicht-PET-Kunststoffen und Metallen; Beschleunigungsband.
- MP4: Steigband vor der Presse für den Sortierrest der Anlage.

In Abbildung 1 sind Fotos der vier NIR-Messpunkte und jeweils zugehörige exemplarische Falschfarbenbilder dargestellt.

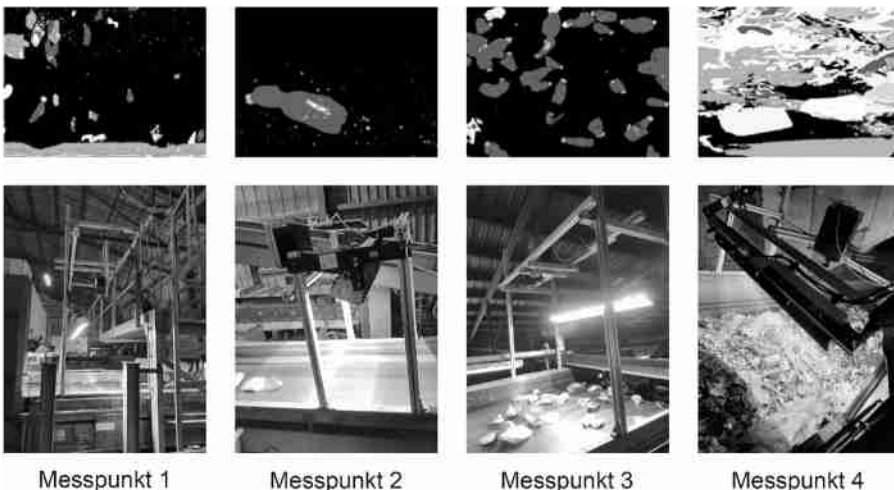


Abb. 1: Fotos der Messpunkte der vier NIR-Sensoren mit exemplarischen Live-Falschfarbenbildern

Die präsentierten Ergebnisse beschränken sich auf die Sensordaten des Volumenstromsensors, sowie den Daten von NIR-MP1 und NIR-MP3, in Kombination mit den Daten des SBS, welcher unmittelbar nach MP1 der Ausscheidung von klaren PET-Flaschen dient (Siehe Abb. 2).

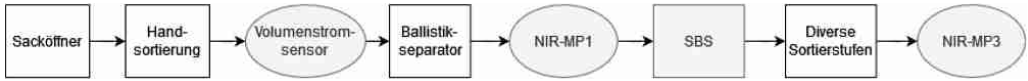


Abb. 2: Vereinfachtes Fließbild des relevanten Anlagenausschnittes – Installierte externe Sensorik oval dargestellt

2.2 Teach-In

Zur Erfassung der NIR-Daten wurden für die Teach-Ins aller externen NIR-Sensoren die gleichen Materialklassen gewählt. Die Materialklassen des SBS entsprechen dem für die Sortierung eingespielten Teach-Ins und wurden für die Versuche nicht manipuliert. In Tab. 1 sind die jeweiligen Materialklassen angeführt.

Tab. 1: Materialklassen der genutzten Sensorik (✓: vorhanden, x: nicht vorhanden)

Materialklasse	Langname	NIR-MP1 – 4	SBS
PET	<i>Polyethylenterephthalat</i>	✓	Unterklassen: klar, blau, grün, bunt, Blister
PP	<i>Polypropylen</i>	✓	✓
PE	<i>Polyethylen</i>	✓	✓
PS	<i>Polystyrol</i>	✓	✓
GVK	<i>Getränkeverbundkarton</i>	✓	✓
PPK	<i>Papier, Pappe, Kartonagen</i>	✓	x
Folien	<i>Primär PE-Folien</i>	✓	x
NK	<i>Nicht klassifiziert</i>	✓	x
PVC	<i>Polyvinylchlorid</i>	x	✓
Cellulose		x	✓
Anderes		x	✓

2.3 Auswertung

Die Datenauswertung umfasste im ersten Schritt die Korrelation verschiedener Daten (z.B. Abgleich Volumenstromdaten mit aufgezeichneten Einstellungen des Sacköffners). Zur Ermittlung relevanter Zusammenhänge wurden Korrelationsmatrizen erstellt und darin aufscheinende stark positive oder stark negative Korrelationen näher untersucht.

Im zweiten Auswertungsschritt erfolgte die Erarbeitung eines Vorhersagemodells für die PET-Stoffstromqualität an Messpunkt 3. Dafür wurde in Python ein lineares Regressionsmodell genutzt, in welches neben den externen Sensordaten auch einige Anlagenkennwerte, wie je Schicht eingesetztes Sortierpersonal, eingespeist wurde.

Zur Beurteilung der Stoffstromqualität wurde neben der flächenbasierten PET-Konzentration (c_a) auch die materialspezifische Bandbelegung (engl. „material specific occupation density“, MSOD) betrachtet. Da die MSOD-Werte neben der Information über den PET-Anteil am Band auch Informationen über die Bandbelegung beinhalten, ergeben sich andere relevante Korrelationsparameter als für die Vorhersage von c_a .

$$c_{a,PET} = \frac{Pixel_{PET}}{\sum_i Pixel_{Material<i>}} = \frac{A_{PET}}{\sum_i A_{Material<i>}} \quad (1)$$

$$MSOD_{PET} = \frac{Pixel_{PET}}{\sum_i Pixel_{<i>}} = \frac{A_{PET}}{A_{ges}} \quad (2)$$

3 ERGEBNISSE

Die aufgezeichneten Daten wurden auf ihre Nutzbarkeit für verschiedene Fragestellungen untersucht. Im Folgenden werden einige erste Ergebnisse exemplarisch dargestellt.

3.1 Monitoring des volumetrischen Anlageninputs

Der Vergleich der ermittelten Volumenströme in m^3/s für die verschiedenen Sacköffnereinstellungen zeigt eine Steigerung der kleinsten Einstellung (Leistungszahl 12) zur größten Einstellung (Leistungszahl 20) im Mittel um 230 % (siehe Abb. 3). Durch die Heterogenität des LVP-Materials und deren unterschiedliches Transportverhalten im Sacköffner, ist die Schwankungsbreite der gemessenen Volumenstromwerte innerhalb einer Einstellung recht groß (z.B. 16: 0 – 0,175 m^3/s) und deren Zusammenhang mit der Leistungszahl nicht linear.

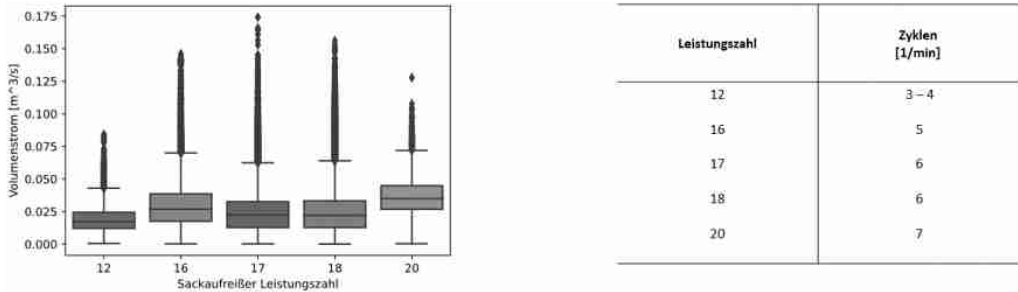


Abb. 3: Korrelation verschiedener Sacköffnereinstellungen mit dem detektierten Volumenstrom über den gesamten Versuchszeitraum hinweg (links) und zugehörige mittlere Drehzahl (rechts)

3.2 Nutzung von SBS-Daten für das Monitoring der Materialzusammensetzung

Der Vergleich der Ergebnisse der NIR-Daten des externen Sensors mit den Daten des SBS zeigt, dass die SBS-Daten im niedrigen Bereich eher zufällig verteilt sind, während sich bei höheren Anteilen der Materialklasse am Band (MSOD) ein linearer Zusammenhang ergibt (Siehe Abb. 4).

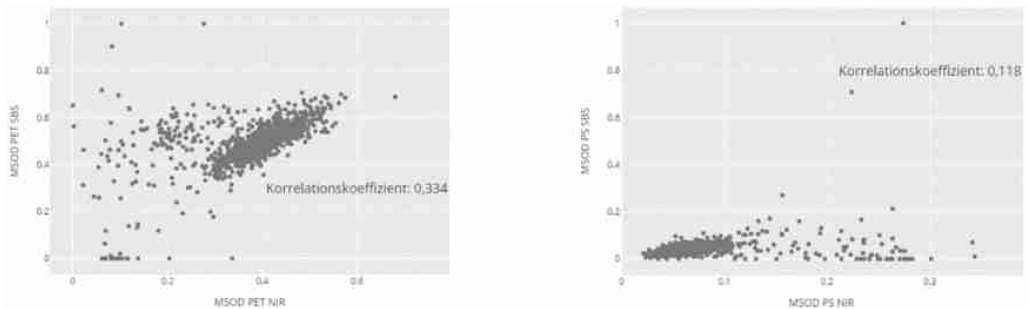


Abb. 4: Korrelation der NIR-MP1 Daten mit den SBS-Daten des unmittelbar danach positionierten Sortierers (links: PET, rechts: PS)

Dabei fällt auf, dass die MSOD-Werte des SBS für PET, PP und PE im Vergleich zu den NIR-MP1-Werten im Durchschnitt zu hoch sind (um ca. 10 %), während bei PS zu geringe Werte gemessen werden. Eine Ursache dafür kann eine für den Anlagenbetreiber üblicherweise unbekannte Wichtung der Materialklassen des SBS sein, welche die Erfüllung der Sortieraufgabe sicherstellen soll. Zusätzlich wird bei dem SBS vor der Zuordnung der Pixel eine Objekterkennung durchgeführt, wodurch beispielsweise eine Flasche, die aus verschiedenen Materialien besteht, ausschließlich als deren Hauptmaterial (z. B. PET) detektiert wird. Durch diese andere Art der Pixelzählung ist eine Abweichung der SBS-Daten von den Daten eines externen Sensors, welcher auf das Monitoring optimiert ist, inhärent. Da der untersuchte SBS zur Ausschleusung von PET-Flaschen dient, ist eine Wichtung für die Materialien PET, PE und PP naheliegend.

Berücksichtigt man diese Abweichungen jedoch, indem ein Abgleich von SBS-Daten mit einem externen Sensor stattfinden, ergeben die SBS-Daten gemäß der ersten Auswertungsergebnisse jedenfalls bei höheren Bandbelegungen nutzbare Werte für ein Stoffstrommonitoring.

3.3 Vorhersage der Stoffstromqualität auf Basis der NIR-Sensordaten

Die Inputparameter für das lineare Modell („Ridge Regression“) für die Vorhersage der MSOD_{PET} an MP3 waren die Daten vom Volumenstromsensor (Volumen in m³ „vol_mp3“ und maximale Höhe in mm „hmax_mm“), NIR-Sensordaten von MP1 (Flächenbezogene Konzentration innerhalb der Materialpixel c_a und materialspezifische Bandbelegung MSOD), sowie Daten aus den Anlagenaufzeichnungen (Anzahl an Sortierpersonal „sp“ in der 2D bzw. 3D-Linie und Anlagen-durchsatz – engl. throughput – „tp“ gemäß Anlieferungsmengen und Anlagenlaufzeit)

Die Analyse der relevanten Einflussparameter in Python („Ridge coefficients“) ergab den Anteil an Hintergrund (engl. Background, „bg“) sowie den Anteil an PET an MP1 („NIR1“) als wichtigste Faktoren. Beide entsprechen dabei einer negativen Korrelation. MSOD_{PET} an MP1, sowie die Anzahl an Sortierpersonal in der Handsortierkabine für die 3D-Fraktion („sp3d“) hatten dabei die stärksten positiven Korrelationsfaktoren (Siehe Abb. 5).

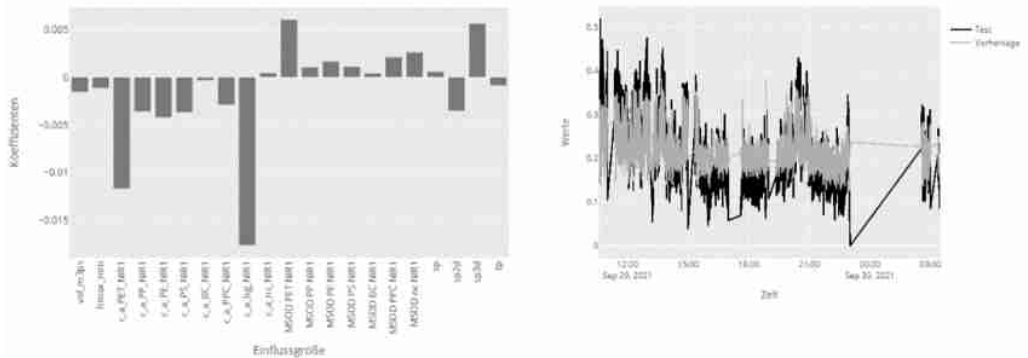


Abb. 5: Ergebnisse für das Vorhersagemodell von MSOD_PET an Messpunkt 3: Relevante Einflussgrößen für die Modellierung (links) und exemplarische Kurvenverläufe (rechts)

Die Vorhersage gibt bereits bei diesem simplen Ansatz nutzbare Ergebnisse. Die Linie der vorhergesagten Werte folgt in weiten Teilen jener der tatsächlich gemessenen Werte des externen NIR-Sensors an MP3, hat allerdings teilweise auch starke Abweichungen (Mittlere quadratischer Abweichung = 0,002, R² = 0,148). Es fällt dabei auf, dass die Vorhersage bei geringen tatsächlichen Werten der MSOD_{PET} an MP3 zu einer Überschätzung neigt. Ein Grund dafür ist der Transportweg zwischen den beiden Messpunkten in Kombination mit dem sehr kurzen Zeitfenster der Vorhersage (5 s). Eine leicht vom durchschnittlichen Transportweg abweichende Zeit beeinflusst das Ergebnis dadurch bereits stark. Weiters befindet sich zwischen den beiden Messpunkten eine manuelle Sortierung, deren Leistung nicht konstant ist, was die Vorhersage weiter erschwert.

Es soll in weiteren Analysen untersucht werden, ob eine Erhöhung des Zeitintervalls von 5 s auf 1 – 5 min zu einer Verbesserung der Korrelation von prognostiziertem und tatsächlichem Wert führt. Weiters sollen auch andere Modelle, wie „support vector machine“ oder „partial least squares“ vergleichend analysiert werden. Diese Ansätze sollen anschließend mit jenen Ergebnissen verglichen werden, die das Prognosemodell auf Basis der SBS-Daten statt der NIR-MP1-Daten erzielen würde.

Die Entwicklung eines solchen Modells ermöglicht es neben dem Live-Monitoring der Anlage im Sinne eines Ist-Soll-Abgleiches von Kennwerten auch eine Modellierung verschiedener Szenarien des Anlagenbetriebes. So kann untersucht werden, welche Sacköffnereinstellungen sinnvoll sind, oder auch ob eine zusätzliche Person in der Handsortierkabine einen Vorteil für die

Performance der Anlage hat oder nicht. Durch die Hinterlegung einer monetären Wertung von Kennzahlen, wie beispielsweise der Reinheit im PET-Strom, wäre damit auch eine ökonomische Modellierung verschiedener Varianten des Anlagenbetriebes möglich.

4 ZUSAMMENFASSUNG UND AUSBLICK

Sensor-basiertes Monitoring ist in der Abfallwirtschaft im Gegensatz zu anderen Industrien, wie der Lebensmittelbranche oder der Pharmazie, noch nicht Stand der Technik. Um Wertstoffverluste in Anlagen zu reduzieren, müssen die bewährten Technologien aus anderen Industrien allerdings übernommen und an die Anforderungen der heterogenen Stoffströme adaptiert werden, damit die festgelegten Ziele in Bezug auf Kreislaufschließung erreicht werden können.

Die ersten Ergebnisse der vorliegenden Untersuchungen zeigen, dass externe LIDAR- und NIR-Sensoren zum Monitoring genutzt werden können. Weiters konnte gezeigt werden, dass sich für gewisse Fragestellungen, bei denen qualitative Aussagen im Vordergrund stehen, auch interne Sensorik aus SBS eignen können. Dabei ist allerdings eine Kalibrierung mit externer Sensorik zur Quantifizierung des Offsets unerlässlich, da die exportierbaren Pixeldaten des SBS durch die Optimierung an die Sortieraufgabe von den unverfälschten Pixeln abweichen. Zuletzt konnte gezeigt werden, dass eine Vorhersage der Stoffstromzusammensetzung an einem späteren Punkt der Anlage auf Basis von Sensordaten von einem früheren Punkt möglich ist. Dabei ist eine Vorhersage auf 5s-Werte wenig sinnvoll, da Einflussgrößen in der Anlagenlinie eine zu große Schwankungsbreite haben. Die Erkenntnisse dieser Untersuchungen können der Entwicklung eines Stoffstromüberwachungssystems dienen, bei dem ein laufender Vergleich von Soll- und Istwerten stattfindet. Dies führt zu einer stabileren und damit verbesserten Anlagenperformance. Zusätzlich ermöglicht die Erweiterung des Modelles um ökonomische Faktoren für relevante Kennwerte eine Modellierung verschiedener Szenarien und kann damit neben dem ökologischen, auch einen wirtschaftlichen Anlagenbetrieb bewerkstelligen.

5 DANKSAGUNG

Das Forschungsprojekt EsKorte (Projektnummer: 877341) wird im Rahmen des Programms „Produktion der Zukunft“ der Österreichischen Forschungsförderungsgesellschaft (FFG) gefördert.

LITERATUR

- Botker, J., Wu, J.X., Rantanen J. (2019) Chapter 3.7 - Hyperspectral imaging as a part of pharmaceutical product design. *Data Handling in Science and Technology*. Volume 43. S 567 – 582. DOI: 10.1016/B978-0-444-63977-6.00022-5
- Kroell, N., Chen, X., Greiff, K., Feil, A. (2022) Optical sensors and machine learning algorithms in sensor-based material flow characterization for mechanical recycling processes: A systematic literature review. *Waste Management*. Volume 149. S. 259-290. DOI: 10.1016/j.wasman.2022.05.015
- Kueppers, B., Schloegl, S., Friedrich, K., Lederte, L., Pichler, C., Freil, J., Pomberger, R., Vollprecht, D. (2020) Influence of material alterations and machine impairment on throughput related sensor-based sorting performance. *Waste Management & Research*. Volume 39(1). DOI: 10.1177/0734242X20936745
- Liu, Y., Hongbin, P., Da.Wen, S. (2017) Hyperspectral imaging technique for evaluating food quality and safety during various processes: A review of recent applications. *Trends in Food Science & Technology*. Volume 69 - Part A. S. 25 – 35. DOI: 10.1016/j.tifs.2017.08.013
- Schlögl, S., Küppers, B. (2022) *Quantifying the Delabelling Performance using Sensor-based Material Flow Monitoring*. Conference: 9th Sensor-Based Sorting & Control 2022. Aachen, Germany. DOI: 10.2370/9783844085457
- Schwarzenbacher, M. (2022) *Quantitative Beurteilung der LIDAR-Technologie zur volumetrischen Stoffstromcharakterisierung von LVP-Material*. Masterarbeit. Montanuniversität Leoben. <https://pure.unileoben.ac.at/portal/files/8829840/AC16509071.pdf>
- Umweltbundesamt (UBA) (2021) *Sortierung und Recycling von Kunststoffabfällen in Österreich: Status 2019*. Report REP-0744. Wien 2021 – 2. Korrigierte Auflage.
- Zeng, J., Guo, Y., Han, Y., Li, Z., Yang, Z., Chai, Q., Wang, W., Zhang, Y., Fu, C. (2021) *A Review of the Discriminant Analysis Methods for Food Quality Based on Near-Infrared Spectroscopy and Pattern Recognition*. *Molecules*. Volume 26 - Issue 3. S. 749. DOI: 10.3390/molecules26030749