UNIVERSITÄT AUGSBURG
Universitätsbibliothek

OPEN ACCESS
OPUS AUGSBURG

Effizienzsteigerung in der sensorgestützten Sortierung

K. Friedrich, V. Spiess, R. Pomberger, Daniel Vollprecht

Angaben zur Veröffentlichung / Publication details:

Friedrich, K., V. Spiess, R. Pomberger, and Daniel Vollprecht. 2022. "Effizienzsteigerung in der sensorgestützten Sortierung." *Recy&DepoTech* 16 (1): 359–64.

Nutzungsbedingungen / Terms of use:

licgercopyright

Dieses Dokument wird unter folgenden Bedingungen zur Verfügung gestellt: / This document is made available under these conditions:
Deutsches Urheberrecht
Weitere Informationen finden Sie unter: / For more information see:
https://www.uni-augsburg.de/de/organisation/bibliothek/publizieren-zitieren-archivieren/publiz/

Effizienzsteigerung in der sensorgestützten Sortierung

K. Friedrich[1], V. Spiess[2], R. Pomberger[1] & D. Vollprecht[1]
[1)] Montanuniversität Leoben, Lehrstuhl für Abfallverwertungstechnik und Abfallwirtschaft, Leoben, Österreich
[2)] Montanuniversität Leoben, Lehrstuhl für Aufbereitung und Veredlung, Leoben, Österreich

KURZFASSUNG: Gegenwärtig werden sensorgestützte Sortieranlagen meist nicht am optimalen Betriebspunkt hinsichtlich des Durchsatzes und des erwünschten Sortierergebnisses betrieben, sondern entweder über- oder unterfahren je nach Verfügbarkeit von Abfallströmen. Anhand der stofflichen Zusammensetzung des Inputstroms und des Durchsatzes lassen sich mathematische Ansätze für vordefinierte „ideale" Mischungen finden. Dieser Beitrag beschäftigt sich daher mit dem Vergleich, ob- bzw. unter welchen Bedingungen sich mathematische Ansätze auf derselben sensorgestützten Sortiermaschine auf reale Abfälle anwenden lassen. Hierfür werden bereits aus Vorversuchen existierende Daten a priori für ideale Mischungen mit neu generierten Daten verglichen um signifikante Aussagen treffen zu können. Als Versuchsmaterial (Input) werden fünf, in regelmäßigen Abständen, genommene Proben aus 3D-Kunststoffen einer Ersatzbrennstoffaufbereitungsanlage herangezogen. Für vier dieser fünf Proben werden die Versuche der idealen Mischungen der PET-Fraktion mit realem Versuchsmaterial wiederholt, um anschließend die mathematischen Ansätze zu vergleichen. Eine direkte Anwendung derselben Ansätze erscheint für PET nicht als möglich, jedoch kann mit neuen mathematischen Ansätzen für den realen Abfallstrom ein Prognoseintervall für das sensorgestützte Sortierergebnis hinsichtlich Recovery (Masseausbringen), Ausbringung (Wertstoffausbringen) und Reinheit (Wertstoffgehalt) abgeleitet werden.

1 GRUNDLAGEN

Sensorgestützte Sortieranlagen sind sehr anfällig für Änderungen der Eingangsmenge und -qualität, wobei die Oberflächenbedingungen den Sortiererfolg stark beeinflussen und Anlagen häufig über- oder unterfahren werden, was die Sortiereffizienz verringert (Küppers et al. 2021).

Die Sortiereffizienz wird üblicherweise basierend auf Recovery, Ausbringung und Reinheit, drei massespezifischen [m%] Indikatoren, analysiert. Diese wurden zuvor von Friedrich et al. (2022) wie in den folgenden Absätzen definiert.

Recovery (R) ist der Quotient aus Produktmasse oder Masse des ausgeworfenen Materials (m_{eject}) und Gesamtmasse des Inputs (m_{input}) über einen bestimmten Zeitraum. Die Recovery gibt die Produktmenge an, die pro Zeiteinheit oder einer bestimmten Durchsatzrate erzeugt wird.

$$R = \frac{m_{eject}\left[\frac{t}{h}\right]}{m_{input}\left[\frac{t}{h}\right]} * 100\ \% \tag{1}$$

Ausbringung (Rw) ist definiert durch den Quotienten aus erzeugtem Produkt im Output (m_{input}*c_{input}) und Wertstoffen im Input (m_{input}*c_{input}). Mit dem Massestrom des Outputmaterials (m_{output}) und der errechneten Wertstoffkonzentration in der Outputfraktion (c_{output}) wird die erzeugte Produktmenge im Output berechnet.

$$R_w = \frac{m_{output}\left[\frac{t}{h}\right] * c_{output}[\%]}{m_{input}\left[\frac{t}{h}\right] * c_{input}[\%]} * 100\ \% \tag{2}$$

Feil et al. (2016) schlagen mit der Berechnung der Reinheit P_m einen weiteren Qualitätsindikator vor. Der Prozentsatz des korrekt ausgeschleusten Inputmaterials – Reinheit – errechnet sich wie folgt.

$$P_m = \frac{m_{recyclable\,material}[\frac{t}{h}]}{m_{impurity}[\frac{t}{h}]+m_{recyclable\,material}[\frac{t}{h}]} * 100\ \% \quad (3)$$

Das Finden des optimalen Betriebspunkts hinsichtlich des Durchsatzes für diese sensorgestützten Sortieraggregate ist für den Erfolg und die Rentabilität jeder Abfallverarbeitungsanlage von größter Bedeutung. Diese Optimierung kann empirisch erfolgen und ergibt eine akzeptable Annäherung, ist jedoch zeitaufwändig (Küppers et al., 2021).

Die Entwicklung eines mathematischen Ansatzes zur Optimierung der Durchsatzrate eines bestimmten Nahinfrarot-Sortieraggregats kann daher nicht nur wertvolle Zeit gespart und die Rentabilität bestehender Sortieranlagen erhöht, sondern auch die Anzahl der eingesetzten Betriebsmittel (bspw. Energie) durch einen Anlagenbetrieb am idealen Betriebspunkt verringert werden.

Dieser Beitrag beschäftigt sich mit der Fragestellung, ob es möglich ist, einen bereits definierten mathematischen Ansatz für einen Stoffstrom, aus definierten Mischungsverhältnissen zweier Reinstoffe, auf die PET-Fraktion von mehreren realen Abfallproben bei Nutzung derselben sensorgestützten Sortiermaschine anzuwenden.

2 MATERIALIEN UND METHODIK

Bezugnehmend auf die vorliegenden Erkenntnisse zur Korrelation von stofflicher Inputzusammensetzung, Durchsatzleistung und den sensorgestützten Sortierergebnissen (Recovery, Ausbringung und Reinheit) von Küppers et al. (2021) ist bekannt, dass es innerhalb dieser Parameter einen Zusammenhang in mathematischen Funktionen für ideale synthetische definierte Mischungen von Kunststofffraktionen mit definiertem Mischungsverhältnis gibt.

Die Forschungsneuheit dieses Beitrags besteht nun darin, zu evaluieren, ob diese gefundenen mathematischen Ansätze auf die PET-Fraktion in realen Kunststoffabfall und seine Inputzusammensetzungen auf demselben Sortieraggregat übertragen werden können.

2.1 Versuchstand für sensorgestützte Sortierung

Das hierfür verwendete Sortieraggregat ist der Versuchstand für sensorgestützte Erkennung und Sortierung am Lehrstuhl für Abfallverwertungstechnik und Abfallwirtschaft der Montanuniversität Leoben. Es handelt sich hierbei um einen Schurrensortierer, welcher in einer offenen Bauweise hergestellt wurde, die es ermöglicht, einfache Umbauten vorzunehmen um Prozesseinflüsse daraus ableiten zu können. Der Versuchstand ist als Zweiwegemaschine mittels Druckluftaktor als austragende Einheit ausgeführt und beinhaltet drei Sensoren (Abb. 1):

- Nahinfrarot (NIR), um die molekulare Zusammensetzung von nahinfrarotaktiven Partikeln zu bestimmen,
- Visuelle Spektroskopie (VIS), um die Absorbierung des sichtbaren Lichts von elementaren Komponenten zu bestimmen (angewendet für Sortierung nach Trennmerkmal Farbe),
- Induktion, um metallische Komponenten/Partikel zu identifizieren.

(Friedrich et al., 2022)

Im gegenständlichen Anwendungsfall wird der Nahinfrarotsensor Helios NIR G2-320 eingesetzt.

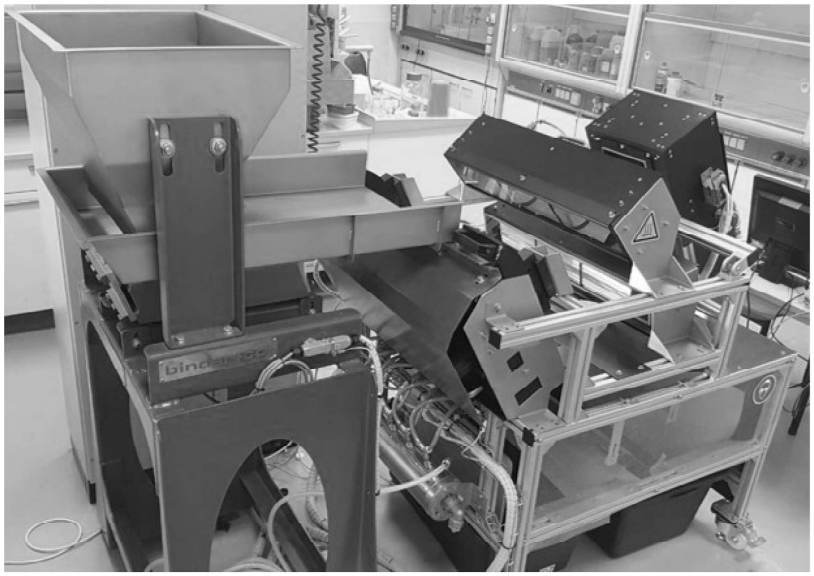

Abb. 1: Versuchstand für sensorgestützte Erkennung und Sortierung (Küppers et al., 2021)

2.2 Probennahme

Aufgrund der Vielzahl verschiedener Kunststoffabfälle, besteht der erste Schritt darin, einen Kunststoffabfallstrom zu definieren, der den idealen Materialien, die Küppers et al. (2021) verwendet hatte hinsichtlich der stofflichen Zusammensetzung möglichst nahekommt. Da es sich in diesen Versuchen um Polyolefin-Kunststoffchips handelte, wurde entschieden, dass eine reale Probe aus Ersatzbrennstoffen (EBS) die größte Ähnlichkeit zu dieser Referenzprobe aufweist. Daneben wurde eine bereits im Einsatz stehende, sensorgestützte Sortiermaschine- oder die Möglichkeit eine solche Anlage einzusetzen in der Probenauswahl berücksichtigt.

Um möglichst repräsentative Proben zu gewährleisten, erfolgte die Probenahme mit einem ausreichend groß dimensionierten Behältnis, welches am Fallpunkt eines Bandförderers parallel zu dessen Achse langsam von links nach rechts bewegt wurde bis das Behältnis befüllt war. Dieses Probenahmeverfahren wurde in gewissen Tagesabständen durchgeführt, um Schwankungen der stofflichen Anteile des Inputstroms der EBS-Aufbereitungsanlage zu berücksichtigen. Autokorrelationsanalysen zu Schwankungen der stofflichen Zusammensetzung dieser Inputströme wurden nicht durchgeführt.

2.3 Materialien

Von den fünf gezogenen Proben wird die Probe 1 als Referenzfraktion zur Erstellung des NIR-Modells herangezogen. Die Probe 1 wird gewählt, da diese eine höhere Masse als die weiteren vier Proben aufweist und somit eine größere Partikelanzahl für den Anlernprozess abbildet.

Im ersten Schritt, bevor die Versuche zur Durchsatzabhängigkeit durchgeführt werden, werden die metallische Partikel aus allen Fraktionen abgetrennt. Metalle besitzen eine höhere Dichte als die Kunststoffe der EBS-Fraktion und bewegen sich daher in anderen Bewegungstrajektorien und würden somit andere Einstellparameter (bspw. Verzögerungszeit, …) benötigen. Weiters wird die sensorgestützte Sortierung in Anlagen typischerweise nach einer Metallabtrennung verbaut, womit ein realer Einsatz nur mit einem bereits metallentfrachtendem Stoffstrom nachgestellt werden kann.

Tab. 1 zeigt die Probenzusammensetzung aus Metallen und metallentfrachteter Fraktion in deren Massen und prozentueller Verteilung.

Tab. 1: Probenzusammensetzung aufgeteilt in Metalle und metallentfrachtete Fraktion

Probe	1		2		3		4		5	
Entnahme	17.08.2020		19.08.2020		02.10.2020		06.10.2020		20.10.2020	
Einheit	[kg]	[m%]	[kg]	[m%]	[kg]	[m%]	[kg]	[m%]	[kg]	[m%]
Metallentfrachtet	6,33	86,8	2,88	70,3	3,88	74,3	3,82	85,4	3,86	90,0
Metalle	0,96	13,2	1,22	29,7	1,34	25,7	0,66	14,6	0,43	10,0
Summe	7,29	100,0	4,10	100,0	5,22	100,0	4,48	100,0	4,29	100,0

Da die Untersuchungen an den metallentfrachteten Proben durchgeführt werden, werden diese in genauer hinsichtlich ihrer stofflichen Zusammensetzung manuell sortiert. Materialien, welche nicht in *Tab. 2* gelistet sind, wie beispielsweise Textilien, werden zum Rest „MC“ (Material Class) gezählt. Eine weitere Aufspaltung des Rests wäre nicht sinnvoll gewesen, da entweder einzelne große Partikel für den hohen Massenanteil verantwortlich waren, vermehrter Feinkornanteil (< 2 mm), die Partikel nicht zuordenbar oder die Massen für eine weitere Fraktion zu gering waren. Festgehalten sei, dass jedenfalls jene Kunststoffarten, welche in EBS anzufinden sind, unabhängig vom Massenanteil gewogen und als separate Fraktion angeführt wurden.

Tab. 2: Probenzusammensetzung der metallentfrachteten Fraktion aus ausgewählten zu betrachtenden Einzelfraktionen

Probe	1		2		3		4		5	
Entnahme	17.08.2020		19.08.2020		02.10.2020		06.10.2020		20.10.2020	
Einheit	[kg]	[m%]	[kg]	[m%]	[kg]	[m%]	[kg]	[m%]	[kg]	[m%]
PP	0,94	14,9	0,38	13,3	0,46	11,8	0,46	12,1	0,44	11,5
PET	1,68	26,5	0,73	25,2	0,85	22,0	1,17	30,5	1,23	32,0
PVC	0,25	3,9	0,14	4,9	0,26	6,8	0,17	4,4	0,11	3,0
Holz/Schaum	0,97	15,3	0,43	14,8	0,94	24,2	0,70	18,4	0,70	18,0
TPU	0,06	1,0	0,01	0,3	0,02	0,4	0,02	0,4	0,01	0,3
HDPE	0,18	2,8	0,06	2,0	0,05	1,2	0,04	1,0	0,11	2,9
LDPE	0,52	8,2	0,30	10,4	0,41	10,5	0,45	11,7	0,55	14,2
PS	1,00	15,8	0,72	25,0	0,64	16,4	0,54	14,3	0,57	14,8
Rest „MC“	0,74	11,6	0,12	4,1	0,26	6,7	0,28	7,2	0,13	3,2
Summe	6,33	100,0	2,88	100,0	3,88	100,0	3,82	100,0	3,86	100,0

2.4 Methodik

Mit dem Versuchstand für sensorgestützte Sortierung werden die Versuche, welche von Küppers et al. (2021) für Recovery, Ausbringung und Reinheit hinsichtlich des Durchsatzes und Inputzusammensetzung für ideale Mischungen durchgeführt mit den beschriebenen EBS-Fraktionen wiederholt. Ziel ist es festzustellen, ob sich die gefundenen mathematischen Ansätze zur Beschreibung des Idealmaterials auf die PET-Fraktion im Versuchsmaterial übertragen lassen.

Um eine Vergleichbarkeit sicherzustellen, wurden selbe Rohspektren für PET, welche bei Küppers et al. (2021) zum Einsatz gekommen sind, im NIR-Modell für die EBS-Fraktion angewendet.

Anhand der Inputzusammensetzungen aus Tab.3 (exklusive Probe 1, da diese als Rückstellprobe zurückgehalten wurde) bietet es sich an bestimmte mathematische Ansätze der idealen Mischungen mit den EBS-Fraktionen über unterschiedliche Durchsätze zu vergleichen. Bei der Betrachtung von PET als Wertstoffeject werden alle Fraktionen, die nicht PET sind, zur Fraktion Rest PET aufsummiert.

Der gewählte mathematische Vergleichsansatz („Vergleich“) ist in Tab. 3 ersichtlich. Bei PET erscheint der Maximalwert mit dem Vergleich 70/30 am passendsten, das zwei Proben einen Wert größer 30 % (4 und 5) aufweisen und eine dritte Probe eine Wert größer 25 % (2).

Tab. 3: Wahl der mathematischen Vergleichsansätze für die EBS-Fraktionen (2, 3, 4 und 5) mit jenen der idealen Mischungen (Vergleich) über die passendste Variante: Minimum (Min), Mittelwert (MW) oder Maximalwert (Max)

Probe	2	3	4	5	Min	MW	Max	Vergleich
Einheit	[m%]	[m%]	[m%]	[m%]	[m%]	[m%]	[m%]	[m%]
PET	25,2	22,0	30,5	32,0	22,0	27,4	**32,0**	30,0
Rest PET	74,8	78,0	69,5	68,0	78,0	72,6	**68,0**	70,0
Summe PET	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0

3 ERGEBNISSE

Die Auswertung der Versuchsreihen von Küppers et al. (2021) mit eigens erstellten idealen PO- und PET-Mischungen gegenübergestellt mit den Versuchsreihen der EBS-Fraktionen als reale Mischungen ist in Abb. 2 dargestellt.

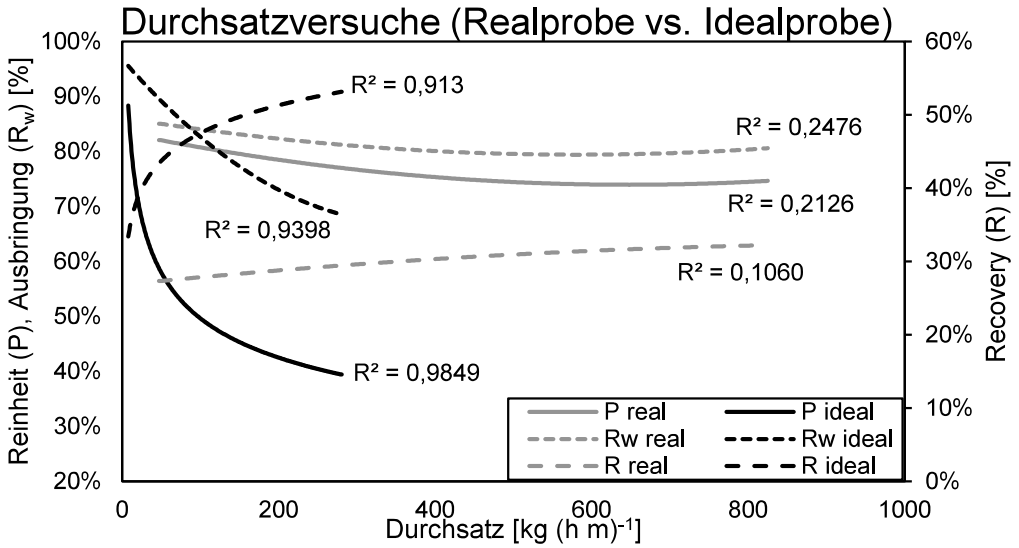

Abb. 2: Vergleichende Gegenüberstellung der bilanzierten Durchsatzversuche von unterschiedlichen Versuchsmaterialien: Synthetischen Idealproben (Mischungen im Verhältnis 70/30, schwarz dargestellt) und Realproben (PET Fraktion). Gegenüberstellung von Reinheit (P), Ausbringung (Rw) auf der ersten Ordinate und der Recovery (R) auf der zweiten Ordinate

Die untersuchten realen Abfallproben bei Austrag der PET-Fraktion weisen gleichmäßigere Recoveries (R), Ausbringungen (R_W) und Reinheiten (P) bei unterschiedlichen Durchsätzen auf als die Idealmischungen im Labor. Dies kann auf die unterschiedliche Partikelform (Ideale Mischungen mit Chips vs. Polydisperse reale Proben) zurückgeführt werden, welche das Verhalten während des Austrags hinsichtlich Überlappungen von Partikeln bei höheren Durchsätzen verändert.

Das Absinken der Reinheit und Ausbringung in den Idealmischungen ist vor allem auf die stark steigende Recovery des Ejectproduktes zurückzuführen. Die steigende Recovery bei steigenden Durchsätzen verschlechtert sowohl Reinheit als auch Ausbringung.

Grundsätzlich ist ersichtlich, dass selbe mathematische Ansätze von idealen Mischungen nicht direkt auf reale Abfallfraktionen angewandt werden können und diese für den Inputstrom in das sensorgestützte Sortieraggregat einer Aufbereitungsanlage separat erstellt werden müssen.

LITERATUR

Feil, A.; Thoden van Velzen, E. U.; Jansen, M.; Vitz, P.; Go, N. and Pretz, T. (2016) "Technical assessment of processing plants as exemplified by the sorting of beverage cartons from lightweight packaging wastes", Waste Management, Vol. 48, pp. 95–105, DOI: 10.1016/j.wasman.2015.10.023

Friedrich, K.; Koinig, G.; Pomberger, R.; Vollprecht, D. (2022) Qualitative analysis of post-consumer and post-industrial waste via near-infrared, visual and induction identification with experimental sensor-based sorting setup, MethodsX, Volume 9, 2022, 101686, DOI: 10.1016/j.mex.2022.101686

Küppers, B.; Schlögl, S.; Friedrich, K.; Lederle, L.; Pichler, C.; Freil, J.; Pomberger, R.; Vollprecht, D. (2021) Influence of material alterations machine impairment on throughput related sensor-based sorting performance. Waste Management & Research 39(1), DOI: 10.1177/0734242X20936745.