



Lehrstuhl für Abfallverwertungstechnik und Abfallwirtschaft

Masterarbeit



Stand der Technik von
Kunststoffsortieranlagen und Potentiale
durch sensorische Stoffstromüberwachung

Sabine Schlögl, BSc

Februar 2021



EIDESSTÄTTLICHE ERKLÄRUNG

Ich erkläre an Eides statt, dass ich diese Arbeit selbständig verfasst, andere als die angegebenen Quellen und Hilfsmittel nicht benutzt, und mich auch sonst keiner unerlaubten Hilfsmittel bedient habe.

Ich erkläre, dass ich die Richtlinien des Senats der Montanuniversität Leoben zu "Gute wissenschaftliche Praxis" gelesen, verstanden und befolgt habe.

Weiters erkläre ich, dass die elektronische und gedruckte Version der eingereichten wissenschaftlichen Abschlussarbeit formal und inhaltlich identisch sind.

Datum 12.02.2021

Unterschrift Verfasser/in
Sabine Schlögl

DANKSAGUNG

Mein Dank gilt an erster Stelle meinem Betreuer, Dr. Daniel Vollprecht, welcher mir einerseits die Freiheit gegeben hat diese Arbeit gemäß meiner Interessen zu strukturieren und andererseits eine stetige Unterstützung auf persönlicher und wissenschaftlicher Ebene war. Seine Ideen und sein kritischer Blick auf Details haben diese Arbeit maßgeblich bereichert und die fachlichen Diskussionen zum Thema Kunststoffrecycling haben mich dazu inspiriert viele Aspekte noch tiefergreifender darzustellen.

Weiters möchte ich mich bei jenen Menschen bedanken, die mich im vergangenen Jahr vor allem mental unterstützt haben. Dazu zählen mein Partner, meine Familie und viele Freunde. Ohne eure lieben Worte zur Bestärkung genauso wie viele schöne geteilte Momente zur Ablenkung und zum Ausgleich hätte ich das alles niemals auf diese Weise geschafft. Meinem Partner möchte ich außerdem von Herzen dafür danken, dass er so viele wertvolle Stunden investiert hat, um mir bei der Erstellung einiger Grafiken dieser Arbeit zu helfen. Meinem Vater möchte ich neben dem Dank für die Unterstützung auf emotionaler Ebene auch für die finanzielle Unterstützung danken, welche mir mein Studienleben ohne Geldsorgen ermöglicht hat.

Abschließend möchte ich der Österreichischen Forschungsförderungsgesellschaft (FFG) meinen Dank aussprechen, die das Forschungsprojekt EsKorte (Entwicklung und Erprobung eines sensorgestützten Stoffstromüberwachungssystems) im Rahmen des Programms "Produktion der Zukunft" unter Projektnummer 877341 fördert. Darüber hinaus natürlich allen Projektpartnern (Brantner Österreich GmbH, EVK DI Kerschhaggl GmbH, Omnetric GmbH, RWTH Aachen, Siemens Österreich AG), die gemeinsam diese Arbeit ermöglichten. Ein besonderer Dank gilt auch Bastian Küppers, welcher bei Stadler Anlagenbau GmbH dem assoziierten Partner des Projektes arbeitet, da er mir häufig spontan bei Verständnisfragen zur Verfügung gestanden ist.

Kurzfassung

Stand der Technik von Kunststoffsortieranlagen und Potentiale durch sensorische Stoffstromüberwachung

Steigende Mengen an Kunststoffverpackungsabfällen, sowie strengere Recyclingquoten und deren neue Berechnungsmethode verursachen einen hohen Innovationsbedarf in der europäischen Abfallwirtschaft in den kommenden Jahren. Ziel dieser im Rahmen des Projekts „EsKorte“ verfassten Arbeit ist es, den Stand der Technik von Kunststoffsortieranlagen darzustellen und daraus die Potentiale durch sensorische Überwachung abzuleiten. Dabei wird im ersten Abschnitt auf die zugrundeliegenden Einflussfaktoren auf Zusammensetzung und Menge des Anlageninputs eingegangen, welche in der Folge die Möglichkeiten der Anlagenüberwachung und Prozessoptimierung determinieren. Weiters werden die Funktionsweise und Einflussparameter typischer Aggregate der Anlage beschrieben und abschließend einige Möglichkeiten zur Implementierung von sensorischer Stoffstromüberwachung abgeleitet. Der Schwerpunkt liegt dabei auf der Situation in Österreich, wobei für die umfassende Betrachtung des Themas auch andere europäische Anlagen und Systeme berücksichtigt werden. Wesentliches Ergebnis der Arbeit ist die Bedeutung der Positionierung von sensorischen Überwachungsmodulen in einer Anlage. Beispielsweise kann durch eine Stoffstromüberwachung direkt vor der Presse eine Qualitätssicherung der Outputfraktionen erfolgen, während dieselbe Sensoreinheit an einer anderen Stelle in der Anlage die Funktionsweise von einzelnen Aggregaten beurteilen kann. Diese Arbeit stellt somit die thematische Grundlage der Forschungsarbeit im Projekt „EsKorte“ dar, in welchem grundlagenorientierte Untersuchungen zur Entwicklung und Erprobung eines sensorgestützten Stoffstromüberwachungssystems für Kunststoffrecyclingtechnologien durchgeführt werden.

Abstract

State of the art of plastic packaging sorting plants and potentials of sensor-based material flow monitoring

To successfully handle increasing amounts of plastic packaging waste and meet stricter recycling quotas, innovation will need to occur in European waste management in the coming years. The aim of this paper, written within the project "EsKorte", is to present the state of the art of plastic packaging sorting plants and to describe the resulting potential of sensor-based material flow monitoring. In the first section, the factors influencing the composition and quantity of the plant input are discussed, which subsequently determine the possibilities of plant monitoring and process optimization. Furthermore, the operating principle and influencing parameters of typical aggregates of the plant are described. Finally some possibilities for the implementation of sensor-based material flow monitoring are presented. The focus of this work is on the situation in Austria, although other European plants and systems are also taken into account for a comprehensive consideration of the topic. The main result of the work is the importance of the positioning of sensor-based monitoring modules in a plant. For example, material flow monitoring directly upstream of the press can provide quality assurance of output fractions, while the same sensor unit at another location in the plant can assess the functioning of individual aggregates. This work thus represents the thematic basis of the research work in the "EsKorte" project, in which basic research-oriented investigations are being carried out for the development and testing of a sensor-based material flow monitoring system for plastic packaging sorting plants.

Inhaltsverzeichnis

	Seite
1 EINLEITUNG	2
1.1 Problemstellung	9
1.2 Zielsetzung	9
2 METHODIK	10
3 EINFLUSSFAKTOREN AUF DIE SENSORISCHE ÜBERWACHUNG	11
3.1 Sammelsysteme für Kunststoffverpackungen	11
3.1.1 Sammel- und Verwertungssysteme.....	12
3.1.2 Varianten der LVP-Sammlung in Österreich	13
3.1.3 Demografische Einflussfaktoren.....	17
3.1.4 Wirtschaftliche Einflussfaktoren.....	19
3.1.5 Europäischer Vergleich	21
3.2 Anlagenspezifische Einflussfaktoren.....	29
3.2.1 Anlagenaufbau	31
3.2.2 Anlagenperformance	59
4 BEURTEILUNG DER IMPLEMENTIERUNGSMÖGLICHKEITEN DER ANLAGENÜBERWACHUNG	67
4.1 Geeignete Sensorsysteme.....	67
4.1.1 NIR- und VIS-Sensoren.....	68
4.1.2 Tracer-/ Marker-Erkennung	69
4.1.3 Spezifische Sensoren: 3D-LT, Induktionssensoren.....	69
4.1.4 Kosten von sensorischen Überwachungssystemen	70
4.2 Mögliche Positionen und resultierende Erkenntnisse.....	71
5 ZUSAMMENFASSUNG UND AUSBLICK.....	80
Ausblick82	
6 VERZEICHNISSE	83
6.1 Literatur.....	83
6.2 Abkürzungsverzeichnis	92
6.3 Tabellen	93
6.4 Abbildungen	94
ANHANG.....	I
I. Restmüllanalyse in Niederösterreich.....	I

1 Einleitung

In der EU wurden im Jahr 2017 14,5 Mio. t Kunststoffverpackungsabfälle generiert, wodurch diese Kategorie nach „Papier und Kartonagen“ den zweitwichtigsten Verpackungsabfallstrom darstellt. Im Vergleich zum Jahr 2007 wurde ein Anstieg an Kunststoffverpackungen um 12,7 % festgestellt (Eurostat 2020a). In Österreich machen Kunststoffverpackungen mit ca. 300.000 t rund ein Viertel der Gesamtkunststoffe aus, die jährlich auf den Markt kommen (ARA 2019b). Obwohl Kunststoffe generell wichtige Werkstoffe mit hoher Funktionalität und geringen Produktions- und Transportkosten sind, werden vielerlei Umweltprobleme mit der Verwendung von Kunststoffen assoziiert. In der EU-Richtlinie 2019/904 über die Verringerung der Auswirkung bestimmter Kunststoffprodukte wird die Situation folgendermaßen beschrieben:

„Durch größere Kunststoffteile und daraus resultierende Fragmente oder Mikroplastikpartikel kann es zu erheblicher Bodenverschmutzung und -kontamination kommen, und diese Kunststoffe können in die Meeresumwelt gelangen.“ (EU 2019/904).

Besonders jene Kunststoffe mit einer kurzen Nutzungsdauer stehen in der Kritik. Die Lösungsansätze sind hierbei einerseits auf der Konsumentenseite die gezielte Abfallvermeidung durch Verbote bestimmter Produkte (definierte „Single Use Plastics“ zu Deutsch „Einwegplastik“), sowie durch Förderung von Mehrwegverpackungen. Andererseits im Bezug auf die Abfallwirtschaft und Produktion die Förderung der Kreislaufschließung durch Konsumenteninformation, getrennte Sammlung, verbesserte Abfallsortierung und vermehrte Herstellung von Kunststoffrezyklaten. Beispiele für die Umsetzung sind die sogenannte „Erweiterte Herstellerverantwortung“ sowie Mindestquoten für getrennte Sammlung und Recycling, wie sie bereits für Verpackungen existieren. (EU 2019/904, EU 2018/852).

Kunststoffrecycling ist ein mehrstufiger Prozess, welcher in Abbildung 1 dargestellt ist. Aus nachwachsenden oder fossilen Rohstoffen wird – optional unter Zugabe von Rezyklaten – der Ausgangsstoff hergestellt, aus welchem die Kunststoffprodukte mittels Kunststoffverarbeitung erzeugt werden. Dieser Ausgangsstoff wird meist als Granulat ausgeführt, kann aber auch die Form eines Pulvers oder Filaments besitzen. Rezyklate können aber auch direkt in der Kunststoffverarbeitung eingesetzt werden. Sowohl in der Kunststoffproduktion als auch in der Kunststoffverarbeitung entstehen Produktionsabfälle, welche direkt recycelt werden können. Dieses wiedereingesetzte Material wird als „Regranulat“ und nicht als „Rezyklat“ bezeichnet, wobei bei dieser, wie auch bei anderen Begrifflichkeiten im Bereich des Kunststoffrecyclings, die Bezeichnungen auch in Fachkreisen nicht einheitlich genutzt werden (GPA 2019, Hellerich 2010, Ecoplast 2021).

Nach der Nutzungsphase entsteht Abfall, welcher entweder (getrennt) gesammelt wird oder durch sogenanntes „Littering“ in die Umwelt gelangt (Vgl. Abbildung 1). Getrennt gesammelte Kunststoffe werden in Kunststoffsortieranlagen durch mehrstufige Prozesse in thermisch oder stofflich verwertbare Fraktionen getrennt. Die stofflich verwertbaren Sortierprodukte werden in Kunststoffrecyclinganlagen aufbereitet, wodurch verwertbares Rezyklat entsteht (GPA 2019, Hellerich 2010 und Reh et al. 2013).

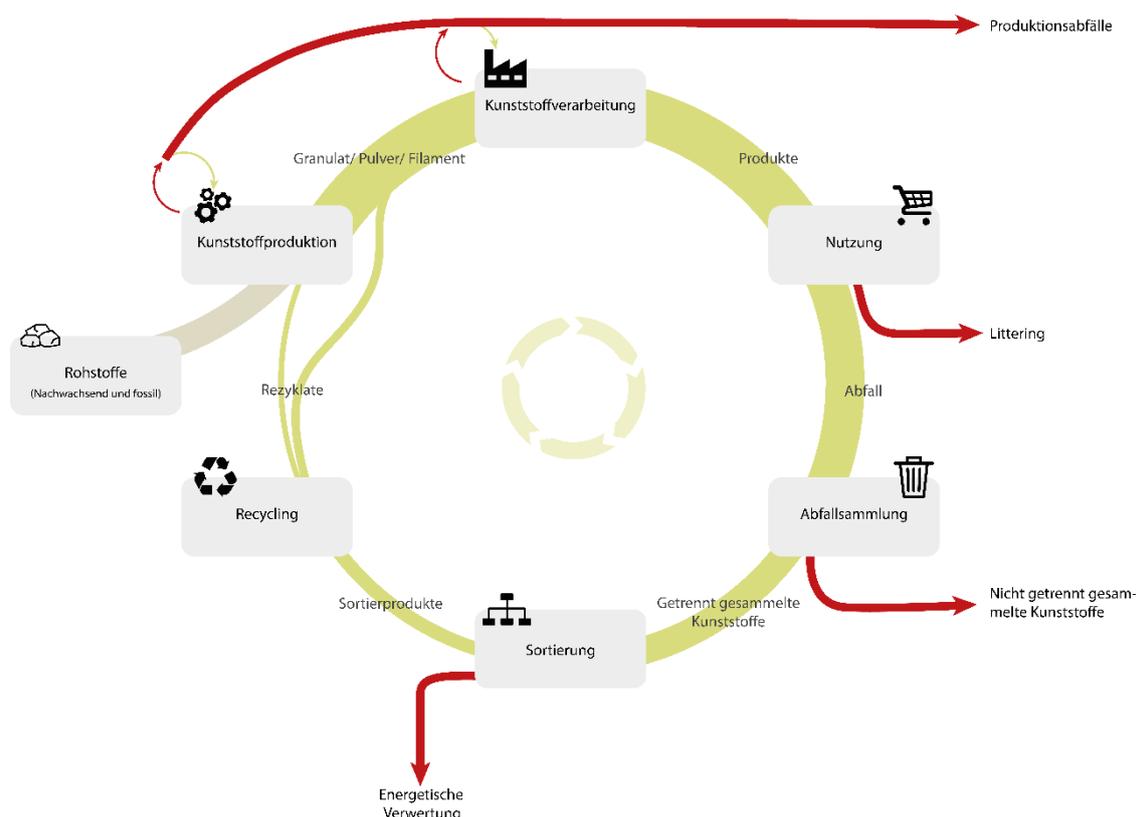


Abbildung 1: Kunststoffkreislauf (grün) mit verschiedenen Verlustebenen (rot) (Erstellt auf Basis von GPA 2019, Hellerich 2010 und Reh et al. 2013).

Durch die neue und einheitliche Berechnungsmethode für Recyclingquoten soll gewährleistet werden, dass die Zahlen auf EU-Ebene besser vergleichbar sind. Dabei werden nur noch jene Mengen berücksichtigt, welche tatsächlich einem Recyclingverfahren zugeführt werden. Die Bestimmung der Recyclingmengen erfolgt dabei üblicherweise in der Recyclinganlage direkt beim Eintrag in den rezyklierenden Schritt (z.B. Extruder beim Kunststoffrecycling). Nur im streng regulierten Ausnahmefall soll es möglich sein das Gewicht der recycelten Verpackungsabfälle auf der Grundlage der Messung der Outputströme aus einer Abfallsortieranlage zu bestimmen. Die Fraktionen einer Sortieranlage, welche keinem Recycling zugeführt werden, dürfen dabei aber jedenfalls nicht mitberücksichtigt werden (EU 2018/852, Die Presse 2019)

Diese neue Berechnungsmethode ergibt, wie auch in anderen europäischen Ländern, eine Änderung der aktuell erreichten Recyclingquote in Österreich. Im Jahr 2019 lag die Quote für Kunststoffverpackungen nach alter Berechnungsmethode bei rund 34 Prozent, nach neuer Berechnungsmethode reduziert sich dieser Wert, je nach Quelle, auf lediglich 22,5 – 25 %. Dem gegenüber stehen, wie in Abbildung 2 dargestellt, die ambitionierten Recyclingziele der EU: Bis 2025 sollen 50 % und bis 2030 55 % der Kunststoff-Verpackungsabfälle recycelt werden (Die Presse 2019, ARA 2019b, EU 2018/852). Anzumerken ist hierbei, dass die EU-Recyclingquoten für die Verpackungskategorien von Papier, Glas und Metallen für das Jahr 2025 bereits im Jahr 2017 übererfüllt wurden. Es zeigt sich dadurch ein besonderer Innovationsbedarf im Bereich der Kunststoffverpackungen (ARA 2019b).

Weiters gibt es zukünftig auch speziell für Polyethylenterephthalat-Flaschen (kurz: PET-Flaschen) eigens festgeschriebene Quoten für die Sammlung. Hier wurde im Jahr 2018 in Österreich ein Wert von rund 76 % erzielt, welcher knapp unter den EU-Zielen von 77 % für 2025 und deutlich unter den Zielen für 2029 von 90 % liegt (Vgl. Abbildung 2) (ARA 2019b).



Abbildung 2: Gegenüberstellung EU-Recyclingziele und Sammelquoten für Getränkeflaschen in den Jahren 2025 und 2030 mit der Situation in Österreich (ARA 2019b).

PET-Flaschen machen in Österreich etwa 14 % der Kunststoffverpackungen aus. Das entsprach im Jahr 2019 rund 41.500 t an PET-Material mit einem hohen Recyclingpotential (ARA 2019b). Allein durch die „PET to PET Recycling Österreich GmbH“ wurden 2019 rund 26.300 t PET-Material der Wiederverwertung zugeführt. Teilweise können dadurch 100 % Rezyklatanteil in der PET-Flaschenproduktion erreicht werden (PET to PET 2020).

Diesem Stoffstrom wird deshalb eine besondere Bedeutung zugeschrieben. PET-Flaschen sollen daher zukünftig in Österreich, wie auch aktuell schon in anderen EU-Ländern, mit einem Einwegpfand versehen werden, um die Sammlung zu maximieren und die Kreislaufschließung zu garantieren. Dies wird einen signifikanten Einfluss auf die Sammelmengen und die nötige Anlagenkonzeptionierung von Kunststoffsortieranlagen haben, da die mit einem Pfand versehenen Einwegverpackungen direkt den nachgeschalteten industriellen Aufbereitungsprozessen für die Kunststoffproduktion oder Kunststoffverarbeitung (Vgl. Abbildung 1) zugeführt werden können (ORF 2020, ARA 2019b).

Neben PET-Verpackungen aller Art (Flaschen, Trays, etc.) sind besonders Verpackungen aus Polyolefinen in Europa verbreitet. Sie machten im Jahr 2007 etwa 74 % der Verpackungskunststoffe aus. Polyethylen (PE) mit 52 % und Polypropylen (PP) mit 22 % sind dabei am häufigsten (Thomé-Kozmiensky und Goldmann 2010). „Low Density“ PE-LD (auch mit LDPE abgekürzt) wird beispielsweise für Folien und „High Density“ PE-HD (auch mit HDPE

abgekürzt) für Hohlkörper eingesetzt. PP wird unter anderem für Verpackungsfolien und starre Verpackungen verwendet (Umweltbundesamt 2017).

Ein großes Problem ist die Tatsache, dass etwa die Hälfte des in Europa für das Recycling gesammelten Kunststoffs zur Weiterverarbeitung außerhalb Europas exportiert wird. Dort kann nicht sichergestellt werden, dass die Umweltschutzstandards der EU eingehalten werden. Im Zuge von „Green Fence“, dem Einfuhrverbot von Kunststoffabfällen in China 2018, wurde der Druck auf die europäische Recyclingwirtschaft weiter erhöht. Mit der Plastikstrategie aus 2018 setzt die EU ein Rahmenwerk, um den europäischen Markt für Recycling-Verpackungskunststoffe anzuregen und damit die nötigen Grundlagen für höhere Recyclingquoten zu schaffen (Europäisches Parlament 2018).

Um die Sammel- und Recyclingziele in Österreich erreichen zu können müssen Verbesserungen auf mehreren Ebenen erzielt werden. Die Altstoff Recycling Austria (ARA) beschreibt zwölf Handlungsfelder für alle Stakeholder im Verpackungskunststoffbereich, welche in Tabelle 1 aufgelistet sind.

Tabelle 1: Maßnahmen zur Steigerung der Sammel- und Recyclingquoten in Österreich (ARA 2019a).

Abfallwirtschaftliche Maßnahmen	Unterstützende Maßnahmen
1) High-Tech-Sortieranlagen für eine höhere Sortiertiefe sowie Output-Qualität	1) Öffentlichkeitsarbeit und Bewusstseinsbildung
2) Ausbau der getrennten Sammlung aus Haushalten sowie im Event-Bereich	2) Abfallvermeidung und Re-Use (z.B. Einwegverpackungen mit unzureichender Sammelquote)
3) Neukonzeption: Erfassung von Verpackungen aus Gewerbebetrieben (Verwertungsgebot)	3) Verpackungsgestaltung zur Sicherstellung der Recyclingfähigkeit
4) Sortierung von Restmüll und Gewerbeabfall (Auch für Nicht-Verpackungen)	4) Öko-Modulation der Lizenztarife als Anreizsystem (Recyclinggerechte Verpackungen, hoher Rezyklateinsatz)
5) Digitalisierung aller Prozesse	5) Öffentliche Beschaffung mit gezielter Nachfrage nach Rezyklathalt
6) Chemisches Recycling im industriellen Maßstab (mittelfristig)	6) Kunststoff Roadmap 2030

Hierbei liegt die Priorität bei jenen Bereichen und Maßnahmen, die einen starken Einfluss auf die Verbesserung der Sammlung und der Sortiertiefe haben. In diesen beiden Kategorien muss bis 2025 eine Steigerung von jeweils etwa 22 Prozentpunkten erzielt werden, um die Recyclingquote erreichen zu können (Vgl. Abbildung 3). Die Sortiertiefe soll insbesondere durch High-Tech-Kunststoffsortieranlagen unter dem Einsatz von Robotik, digitaler Bildgebung und Formerkennung, u.v.m. verbessert werden. Dies soll laut ARA ab 2021 entweder durch

neue Anlagen oder durch die Nachrüstung bestehender Anlagen realisiert werden. Das Ziel des zugehörigen Handlungsfeldes soll die Verdopplung der Recyclingmengen sein. Ein weiteres wichtiges Handlungsfeld ist die Digitalisierung aller möglichen Prozesse, welche u.a. eine Optimierung und damit eine Effizienzsteigerung ermöglicht (ARA 2019b).

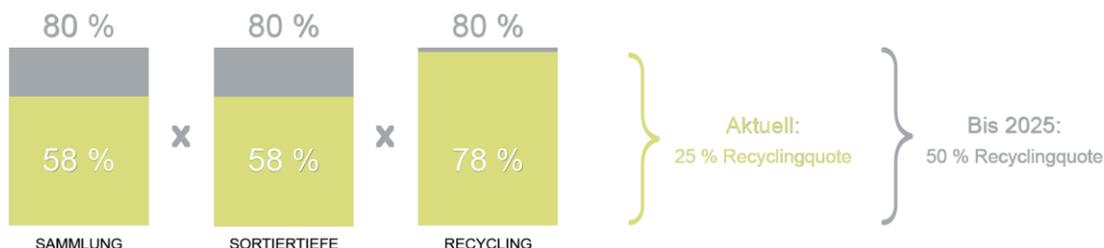


Abbildung 3: Istwerte (grün) und Sollwerte (grau) zum Erreichen der 50 %-Recyclingquote in den Bereichen Sammlung, Sortiertiefe und Recycling (Datenquelle: ARA 2019b).

Die Sortiertiefe, auch „Wertstoffausbringen“, „Wertstoffausbringung“ oder „Inhaltsausbringen“, beschreibt dabei üblicherweise den Anteil des verwertbaren Materials im Input, der als Wertstofffraktion aussortiert wird. Manchmal wird der Begriff aber auch für die Menge an Wertstoffen im Output bezogen auf die Gesamtinputmenge benutzt (Pomberger 2020, Feil et. al 2016b). Abbildung 4 zeigt beispielhaft die Sortiertiefen für einige Kunststoffe. Getränkeverpackungen aus PET (PET GVP) liegen dabei deutlich über dem Durchschnitt, wohin gehend sonstige PET-Verpackungen, sowie Polystyrol (PS) und Polypropylen (PP) deutlich unter dem Durchschnitt liegen. Das höchste Potential zur Verbesserung der Sortiertiefe liegt laut ARA (2019) im Bereich der Folien sowie der PS/PP-Fraktion.



Abbildung 4: Status (dunkelgrün) und Potentiale (hellgrün) der Sortiertiefen in Österreich für verschiedene Kunststoffe sowie die Durchschnittswerte über alle Kunststoffarten (ARA 2019a).

Ein mögliches Szenario zur Umsetzung der Ziele ist die Einführung des Einwegpfands auf Kunststoffflaschen und Getränkedosen. Dies würde die Menge an Flaschen, die aktuell im Restmüll für das Recycling verloren gehen, reduzieren und somit die Sammelquote erhöhen.

Durch diesen zusätzlich parallellaufenden Sammelweg reduziert sich je nach Sammelsystem (Vgl. Kapitel 3.1) die Menge an Kunststoff-Leichtverpackungen¹ (LVP) in den etablierten Sammel- und Verwertungssystemen um 20 – 70 m%. Das wiederum würde als zwingende Folge eine Änderung des etablierten Sammelsystems in vielen Regionen bedeuten (z.B. Inkludieren anderer Kunststoffverpackungen oder gemeinsame Sammlung mit Metallverpackungen - Vgl. Kapitel 3.1.2) und somit eine weitere Änderung der Materialzusammensetzung des Inputs in Kunststoffsortieranlagen verursachen (Hauer et al. 2020).

Daraus folgt ein hoher Innovationsbedarf für Betreiber von Kunststoffsortieranlagen in Österreich. Sie müssen sich einerseits auf potenzielle plötzliche Änderung des Inputs durch Änderungen in der Art und Menge der Sammlung einstellen und andererseits müssen Menge und Qualität der rezyklierbaren Outputfraktionen gesteigert werden, um die Anforderungen an die höhere Sortiertiefe zu erfüllen. Dies ist die Voraussetzung für eine erfolgreiche stoffliche Verwertung in einer nachfolgenden Recyclinganlage (Hauer et al. 2020, ARA 2019b).

Wie viele Output-Fraktionen generiert werden und was die Mindestanforderungen an die Output-Qualitäten sind (z.B. maximaler Störstoffanteil) wird in Verträgen festgeschrieben. In Tabelle 2 sind typische Outputfraktionen einer Kunststoffsortieranlage, sowie jeweils ein Beispiel für einen möglichen Verwertungsweg des Materials angeführt.

Tabelle 2: Typische Outputfraktionen einer Kunststoffsortieranlage und beispielhafte Verwertungswege (PET to PET 2020, Neubauer et al. 2020).

Outputfraktion	Beispielhafter Verwertungsweg
PET-Flaschen (z.B. Blau, Grün, Natur)	Neue PET-Flaschen
Sonstige PET-Verpackungen	Lebensmittelverpackungen
HDPE (Eimer, Kanister, Flaschen)	Verpackungen (Kisten, Tonnen)
LDPE (Bunt, Natur, Mischfraktion)	Müllsäcke
PS/PP Mischfraktion	Gartenbau (z.B. Pflanzgefäße)
Getränkeverbundkarton	Hygienepapier, Energetische Verwertung
Metalle (Eisen, Nicht-Eisen)	Neue Metallprodukte
Feingut	Energetische Verwertung
Mischkunststofffraktion	Energetische Verwertung

¹ Verpackungsabfälle aus Kunststoffen, Materialverbunden, textilen Faserstoffen, Keramik oder Holz, welche üblicherweise im Gelben Sack oder der Gelben Tonne getrennt gesammelt werden. Sammelkriterien sind lokal unterschiedlich (ARA 2005)

Dabei ist es wichtig zu unterscheiden, ob ein Material schlussendlich auch tatsächlich die nötigen Qualitätskriterien für eine stoffliche Verwertung erfüllt. Folgende Kriterien spielen zum Erreichen der realen Recyclingfähigkeit (im Gegensatz zur theoretischen und technischen Recyclingfähigkeit) nach Pomberger (2020) eine Rolle:

- Erkennbarkeit des Materials (z.B. reduziert durch Verschmutzungen, Label)
- Sortierbarkeit des Materials (z.B. reduziert durch schlechte Flugeigenschaften)
- Technische Möglichkeit des Recyclings
- Wirtschaftlichkeit des Recyclingverfahrens nach Marktsituation

Essenziell für die Erfüllung der Anforderungen an Kunststoffsortieranlagen ist der Einsatz von sensorischen Überwachungssystemen. Der Einsatz von intelligenten Sensorik-Kombinationen ermöglicht zumindest theoretisch ein breites Spektrum von Innovationen insbesondere in folgenden Bereichen:

- Inputüberwachung
- Anlagenoptimierung
- Anlagensteuerung
- Qualitätssicherung der Outputströme
(Küppers et al. 2020b)

Inputüberwachung ist die Beobachtung der Menge und Zusammensetzung des Materials, welches der Anlage zugeführt wird. Wertstoff- bzw. Störstoffanteil im Input schwanken beispielsweise in Abhängigkeit vom Sammelsystem oder saisonalen Schwankungen. Da die Maschinenperformance der Aggregate einer Anlage maßgeblich vom Input abhängig ist, ist die Kenntnis über Durchsatz und Materialzusammensetzung besonders relevant. Darüber hinaus gibt es Ansätze zur verbesserten Öffentlichkeitsarbeit auf Basis häufiger Fehlwürfe in einer Region. Auch dies wäre auf Basis der Inputüberwachung eventuell möglich (Küppers et al. 2020b)

Unter Anlagenoptimierung ist unter anderem die Lokalisierung von „Flaschenhälsen“ in der Prozesskette und die Gewährleistung eines idealen Durchsatzes bzw. einer idealen Flächenbelegung je nach Aggregat gemeint (Vgl. Kapitel 3.2.2). Durch die Ermittlung der Prozessstabilität verschiedener Aggregate und die Berücksichtigung der Input-Anforderungen nachfolgender Aggregate kann durch ausreichend ausführliche und verlässliche sensorische Überwachung eine Änderung der Reihenfolge der Aggregate einer Anlage vorgenommen werden (Küppers et al. 2020b).

Eine intelligente Anlagensteuerung auf Basis von sensorischer Überwachung bedeutet unter anderem eine adaptive und damit ideale Beschickung von Aggregaten. Ein Beispiel hierfür ist eine (automatische) Anpassung der Einstellungen von Zerkleinerungsaggregaten zur Regulierung des Durchsatzes. Die Änderung des Schnittspaltes bei einem

Einwellenzerkleinerer¹ verursacht eine Verschiebung der Wertstoffe in einen anderen Korngrößenbereich, was wiederum einen Einfluss auf die Massenströme in einer Anlage nach der Siebung hat (Küppers et al. 2020b).

Die Qualitätssicherung der Outputströme erfolgt durch sensorische Überwachung der Bänder zwischen den Outputbunkern und der Presseinheit. Damit kann sichergestellt werden, dass die geforderte Produktreinheit der Outputströme konstant erreicht wird (Küppers et al. 2020b).

1.1 Problemstellung

Um die Recyclingziele der EU im Bereich der Kunststoffverpackungen zu erreichen muss neben der verbesserten getrennten Sammlung auch eine verbesserte Sortiertiefe erreicht werden. Zwei wichtige Aspekte für Kunststoffsortieranlagen sind Qualitätssicherung und Anlagenoptimierung. Für beide Bereiche ist der Einsatz von sensorischer Überwachung nötig. Da die Preismargen im Abfallbereich gering sind, ist der Einsatz teurer Monitoring-Systeme nicht so verbreitet wie in anderen Branchen. Art und Anzahl der Sensoren sowie deren Positionierung in der Anlage müssen daher intelligent gewählt werden, um einen möglichst geringen Gesamtaufwand bei gleichzeitigem maximalem Informationsertrag zu gewährleisten. Weiters ist die Abfallsortierung komplex und von vielen Einflussfaktoren geprägt, welche bei einer sensorischen Anlagenüberwachung mitberücksichtigt werden müssen.

1.2 Zielsetzung

Das Ziel dieser Arbeit ist es, den Stand der Technik der sensorischen Überwachung von Kunststoffsortieranlagen darzustellen und Potentiale für zukünftige Entwicklungen aufzuzeigen. Dabei soll das spezielle Augenmerk auf die Möglichkeiten, die durch Anlagenüberwachung entstehen, gelegt werden. Der Fokus liegt dabei auf europäischen Anlagen, wobei die Unterschiede zwischen verschiedenen Sortieranlagen innerhalb Europas exemplarisch aufgezeigt werden sollen. Die Situation und die Potentiale in Österreich soll hingegen vertieft dargestellt werden.

¹ Zerkleinerungsaggregat, welches unter anderem zur Aufbereitung von Verpackungskunststoffen (auch als komplette Ballen) eingesetzt wird. Einwellenzerkleinerer haben nur einen Rotor, der mit einer Umfangsgeschwindigkeit von ca. 5 –10 m/s läuft (Kranert 2018:195).

2 Methodik

Zur Ermittlung der Implementierungsvarianten von sensorischer Stoffstromüberwachung und der Ableitung der damit verbundenen Potentialen wurde eine umfassende Literaturrecherche durchgeführt. In Tabelle 3 sind die verwerteten Quellen aufgeschlüsselt nach der Art der Quelle, wie Paper, Buch oder Internetquelle, aufgeschlüsselt. Die Gesamtanzahl der genutzten Quellen beträgt 80, wobei mehr als ein Viertel der Quellen die in Fachzeitschriften veröffentlichte Paper ausmachen.

Tabelle 3: Übersicht über Art und Anzahl der genutzten Quellen

Quellentyp	Anzahl
Peer reviewte Paper	21
Sonstige Paper und Publikationen (z.B. Berichte, Studien, Masterarbeiten, etc.)	19
Bücher	13
Internetquellen (z.B. Websites von Maschinenherstellern, Artikel, etc.)	25
Sonstiges (z.B. Statistikdaten, Gesetzestexte, Interviews, etc.)	6
Summe	84

Die gesammelten Informationen wurden bezüglich ihrer Relevanz für die Arbeit bewertet. Jene Informationen die als relevant eingestuft wurden, wurden textlich oder grafisch aufbereitet und dabei entweder inhaltlich verknüpft oder gegenübergestellt und verglichen. Von den 47 Grafiken in dieser Arbeit wurden 13 selbst erstellt. Bei jenen Grafiken, die nicht direkt übernommen wurden, ist ein entsprechender Hinweis in der Abbildungsbeschreibung zu finden (z.B. „Vereinfacht dargestellt nach [...]“ oder „Datenquelle: [...]“).

In den Kapiteln 1 und 3 werden die Ergebnisse der Literaturrecherche, bezogen auf diverse Hintergrundinformationen zu Abfallwirtschaftssystemen und Anlagentechnik, ausführlich dargestellt. In Kapitel 4 werden diese Informationen genutzt, um Implementierungsvarianten auszuarbeiten und deren jeweiligen Vor- und Nachteile darzustellen. In die Ergebnisse fließen darüber hinaus Erkenntnisse aus diversen Anlagenbesuchen und Besuchen in Technika für sensorgestützte Sortierer und Anlagenbau ein. Außerdem basieren die Schlüsse auf der Erfahrung der Autorin im Bereich sensorgestützte Sortierung durch jahrelange Versuchsdurchführung insbesondere mit Kunststoffmaterialien.

3 Einflussfaktoren auf die sensorische Überwachung

Die Qualität und Nutzbarkeit der Daten einer sensorischen Überwachung ist von vielen Einflussfaktoren abhängig, welche im folgenden Kapitel beschrieben werden. Wie in der Einleitung dargestellt, steht die Kunststoffsortieranlage in der Kette zwischen der Sammlung von LVP-Abfällen und dem Recycling definierter Kunststoffsorten. Das Sammelsystem hat dabei einen großen Einfluss auf die Menge und Zusammensetzung des Inputs in die Sortieranlage, welcher wiederum die Möglichkeiten der sensorischen Überwachung beeinflusst. Auch die die Art, Menge und Anordnung der Aggregate, sowie deren Performance ist relevant für den Sortiererfolg. Diese Faktoren sind nicht unabhängig voneinander zu betrachten, sondern vielmehr als komplexes System mit wechselseitigen Einflüssen.

3.1 Sammelsysteme für Kunststoffverpackungen

Die Sammlung von Kunststoffverpackungen erfolgt in Österreich nicht nach einheitlichen Regeln. Je nach regionalen Gegebenheiten und historisch gewachsenen Strukturen unterscheiden sich die Verträge zwischen dem Sammel- und Verwertungssystem und der Kommune und damit die Art der Abholung und die Trennanweisungen an die Bevölkerung. Abbildung 5 zeigt einen Überblick über die Varianten, auf die in den folgenden Abschnitten im Detail eingegangen wird. Unter anderem bestimmt die Art der Verwertung die erforderliche Art der Erfassung und die Tiefe der Vorbehandlung. Die Sortierprodukte für die stoffliche Verwertung umfassen sortenreine Kunststofffraktionen (SKF), Metalle, Getränkeverbundkarton (GVK) und teilweise Mischkunststofffraktionen (MKF). MKF werden allerdings hauptsächlich energetisch verwertet, genauso wie der Sortierrest der Anlage und im Restabfall mitgesammelte LVP (Reh et al. 2013).

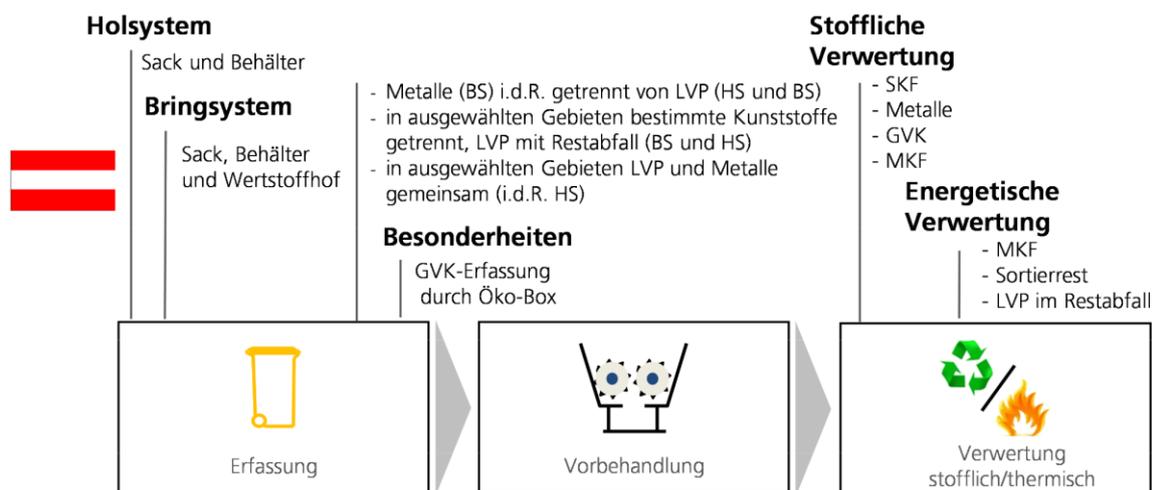


Abbildung 5: Ausgestaltung der Erfassung und Verwertung von Verpackungsabfällen in Österreich mit HS... Holsystem und BS... Bringsystem (Reh et al. 2013:22).

3.1.1 Sammel- und Verwertungssysteme

In Österreich sind die Inverkehrbringer von Verpackungen (Verpackungshersteller, Abfüller, Abpacker, Importeure, sowie der Handel) gesetzlich dazu verpflichtet dafür Sorge zu tragen, dass Verpackungsabfälle erfasst und ordnungsgemäß verwertet werden. Die Organisation wird üblicherweise in Form von Lizenzierungen an Sammel- und Verwertungssysteme übertragen, welche wiederum Verträge mit Kommunen, Entsorgern und Verwertern abschließen (Vgl. Abbildung 6). Das für Kunststoffverpackungen zuständige Sammel- und Verwertungssystem ist die ARA. (Abfallwirtschaft Steiermark 2016, Reh et al. 2013)

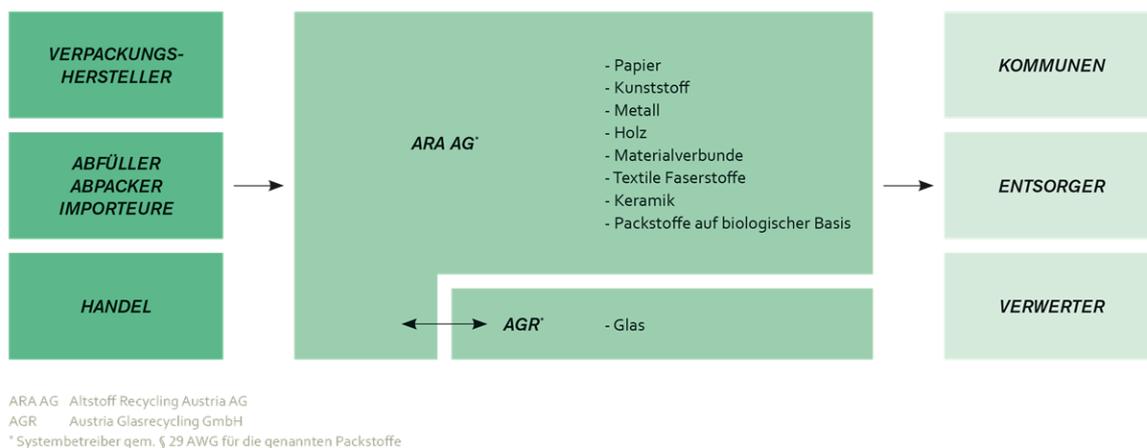


Abbildung 6: Übersicht über die Stakeholder im ARA-System. Links: Inverkehrbringer von Verpackungen, Mitte: Systembetreiber ARA für diverse Packstoffe, Rechts: Abfallwirtschaftliche Organisationseinheiten (Abfallwirtschaft Steiermark 2016).

Das Sammelkonzept der ARA unterscheidet allgemein sieben Module (Reh et al. 2013):

- Modul 1 – Haushalte
- Modul 2 – Kleingewerbe
- Modul 3 – Industrie und Gewerbe: Holsystem
- Modul 4 – Geschäftsstraßenentsorgung
- Modul 5 – Wertstoffhöfe
- Modul 6 – Zukauf Restabfall
- Modul 7 – Industrie und Gewerbe: Anlieferung beim Verwerter

Dies ist wichtig, da Sortieranlagen nur Abfälle definierter Module sortieren dürfen. Die Anfallstelle des Abfalls bestimmt dabei maßgeblich seine Eigenschaften (Fehlurfanteil, Korngröße, Materialzusammensetzung, Menge je Quelle, etc.) (Neubauer et al. 2020).

3.1.2 Varianten der LVP-Sammlung in Österreich

In der Sammlung von Abfällen werden allgemein zwei grundlegende Varianten unterschieden, wobei sich die Bezeichnungen auf den Abfallerzeuger beziehen:

- Holsystem (HS)
- Bringsystem (BS)

Beim Holsystem werden die Abfälle direkt vom Abfallerzeuger abgeholt (üblicherweise direkt an der Grundstücksgrenze), was einen hohen Komfort für den Abfallerzeuger bedeutet. Daraus ergibt sich eine höhere Sammelmenge. Darüber hinaus zeigt sich eine bessere Sammelqualität wegen der Identifizierung von Fehlwürfen durch die sogenannte „soziale Kontrolle“. Im Bereich der Kunststoffverpackungen werden dafür neben der Gelben Tonne auch Gelbe Säcke eingesetzt (Bilitewski und Härdtle 2013).

Das Bringsystem bedeutet einen Mehraufwand für den Abfallerzeuger, ist aber für das Entsorgungsunternehmen mit einem geringeren Aufwand im Bereich der Abfallsammlung verbunden. Im Bringsystem müssen die Abfälle entweder zu haushaltnahen Sammelcontainern (meist als „Müllinseln“ ausgeführt), oder zu zentralen Sammelstellen (Altstoffsammelzentren) gebracht werden (Bilitewski und Härdtle 2013).

Sollen nur stofflich verwertbare Flaschen aus Kunststoff, wie z.B. PET-Flaschen, im Zuge der sogenannten „Hohlkörpersammlung“ gesammelt werden, so sind die Container mit Einwurfstutzen oder Einwurföffnungen versehen. Das dient der Reduktion von Fehlwürfen (NÖ Umweltverbände 2019).

Im Haushaltsbereich sind für die Sammlung von Kunststoffverpackungen in Österreich zwei grundlegende Modelle im Einsatz (ARA 2020):

- (1) Die gemeinsame Sammlung mit anderen Leichtverpackungen (Holz-, Textil- und Keramikverpackungen und Verpackungen auf biogener Basis)
- (2) Die gezielte Sammlung von Plastikflaschen oder Hohlkörpern, teilweise kombiniert mit der Sammlung von Metallverpackungen.

Die Sammlung von den sogenannten „stofflich verwertbaren Kunststoffverpackungen“ (2) ist in Österreich seltener. Sie wird in Wien, Niederösterreich, Salzburg und Kärnten teilweise durchgeführt. 60 % des Bundesgebietes nutzt allerdings die umfassendere Leichtverpackungssammlung mit anschließender aufwändigerer Trennung nach Stoffarten in Sortieranlagen (ARA 2020).

In Tabelle 4 sind fünf Beispiele für Sammelsysteme in Niederösterreich dargestellt. Den unterschiedlichen Trennvorschriften sind Identifikationsnummern zugeordnet, um die Kommunikation in der Branche zu vereinfachen. Es zeigt sich, dass die Kategorie der „stofflich verwertbaren Flaschen“ in jedem System gesammelt wird. Getränkeverbundkartons werden ebenfalls in allen dargestellten Sammelsystemen gesammelt. „Sonstige

Kunststoffverpackungen“, „Sonstige Materialverbunde“ (Verpackungen ohne Getränkeverbundkartons) und „Metallverpackungen“ werden hingegen nur teilweise im Zuge der LVP-Sammlung mitgesammelt. Nicht-Verpackungen werden üblicherweise nicht in der LVP-Fraktion gesammelt. Die Ausnahmen sind dabei einerseits die „planmäßige Miterfassung“ und andererseits als Sonderform die „Wertstofftonne“. In der Wertstofftonne werden alle Materialien, welche für ein Recycling geeignet sind, gesammelt. Ob es sich dabei um Verpackungen handelt oder nicht, ist in diesem System unerheblich. Dies führt zu einer besonderen Situation, da lizenzierte und nicht-lizenzierte Abfälle gemeinsam gesammelt werden (NÖ Umweltverbände 2019).

Tabelle 4: Beispiele für Sammelsysteme in Niederösterreich. ✓ - wird gesammelt, (✓) - wird ggf. planmäßig miterfasst, X - wird nicht erfasst (Datenquelle: NÖ Umweltverbände 2019:22).

Material	System	Wertstoff-				
		910	915	930	935	tonne
Stofflich verwertbare Flaschen aus Kunststoff „Hohlkörper“ (z.B. PET-Flaschen, HDPE-Flaschen, etc.)		✓	✓	✓	✓	✓
Sonstige Kunststoffverpackungen		✓	X	✓	X	✓
Sonstige Kunststoffe (Stoffgleiche Nicht-Verpackungen)		(✓)	X	X	X	✓
Getränkeverbundkarton (GVK)		✓	✓	✓	✓	✓
Sonstige Materialverbunde		✓	X	✓	X	✓
Metallverpackungen		X	X	✓	✓	✓
Sonstige Verpackungsmaterialien (z.B. Holz, textile Faserstoffe, Keramik, etc.)		✓	X	✓	X	✓
Sonstige Nicht-Verpackungen, welche für ein Recycling geeignet sind		X	X	X	X	✓

In einer Studie im Auftrag des Fachverbandes Kartonverpackungen für flüssige Nahrungsmittel e. V. (FKN) wurde die Eignung verschiedener Erfassungssysteme für Getränkekartonagen untersucht. Die Ergebnisse zeigten, dass je nach Sammelsystem die Qualität des Wertstoffes (Hier: Getränkeverbundkarton) beeinflusst wurde. Die gemeinsame Sammlung mit Metall- und Glasverpackungen verursachte beispielsweise eine Erhöhung des

Feuchtegehaltes. Die gemeinsame Sammlung mit Altpapier beeinflusste die Qualität hingegen kaum (Bilitewski und Härdtle 2013).

Allgemein gilt: Die separate Sammlung von Wertstoffen (Monosammlung) erhöht die Qualität und reduziert den Aufwand der nachträglichen Sortierung. Gleichzeitig erhöht sich der Sammelaufwand durch zusätzliche Sammelbehälter und Sammeltouren. Die gemeinsame Sammlung erhöht hingegen die Sammelmengen und ist günstiger, weist aber meist geringere Qualitäten auf. Folglich muss standortspezifisch entschieden werden, welches Sammelsystem geeignet ist (Bilitewski und Härdtle 2013, Pötttschacher 2016).

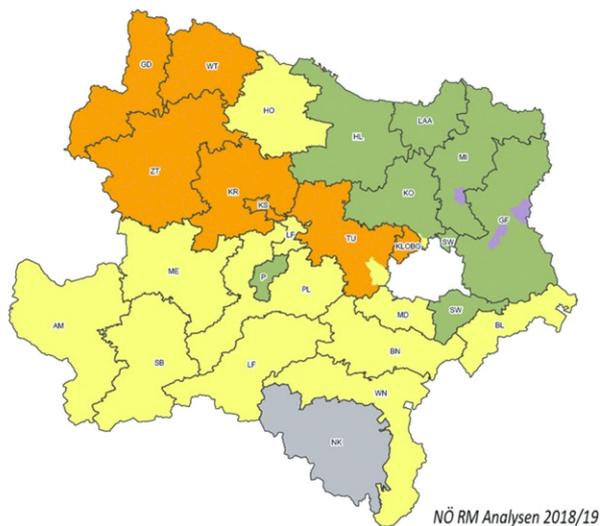


Abbildung 7: Verteilung der Sammelsysteme in Niederösterreich. Gelb: 910, Orange: 915, Violett: 930, Grün: 935, Grau: Neunkirchen Wertstofftonne und Weiß: Bundesland Wien (NÖ Umweltverbände 2019:23).

Die Verteilung der verschiedenen Sammelsysteme in Niederösterreich ist in Abbildung 7 dargestellt. Darin ist weitestgehend eine Korrelation zwischen der Art der Sammlung und der Sammelregion zu erkennen. Obwohl bereits in einem Bericht der Abteilung Umwelt- und Energiewirtschaft der Landesregierung Niederösterreich aus dem Jahr 2015 die Rede von einer Vereinheitlichung der Sammelsysteme die Rede ist, sind diese parallellaufenden unterschiedlichen Systeme noch immer aktuell. Diese potenziell zeitnahe Vereinheitlichung zu einer „Gesamtkunststofftonne“ und die damit einhergehende Änderung der Abfallströme (Menge und Zusammensetzung) zeigt deutlich, wie wichtig die Flexibilität und Adaptierbarkeit von Behandlungsanlagen ist (NÖ Umweltverbände 2019, Umwelt- und Energiewirtschaft NÖ 2015)

Zusätzlich zu den verschiedenen Sammelsystemen haben auch Erfassung, Transport und Umschlag einen Einfluss auf die Menge und Beschaffenheit der in einer Kunststoffsartieranlage eintreffenden Abfälle. Neben den Auswirkungen verschiedener Sammelfahrzeuge mit unterschiedlichen Verdichtungseinheiten spielt insbesondere der Abfallumschlag eine Rolle. Wird eine ökonomisch kritische Distanz zwischen Sammelort und

Kunststoffsortieranlage erreicht, ist es sinnvoll und üblich, dass die Abfälle das Transportmedium wechseln. Sie werden dabei gegebenenfalls (weiter) verdichtet und anschließend mit Abfällen anderer Herkunft zusammen weitertransportiert. Einen Überblick über die Varianten von Umschlagstationen soll Abbildung 8 geben (Bilitewski und Härdtle 2013).

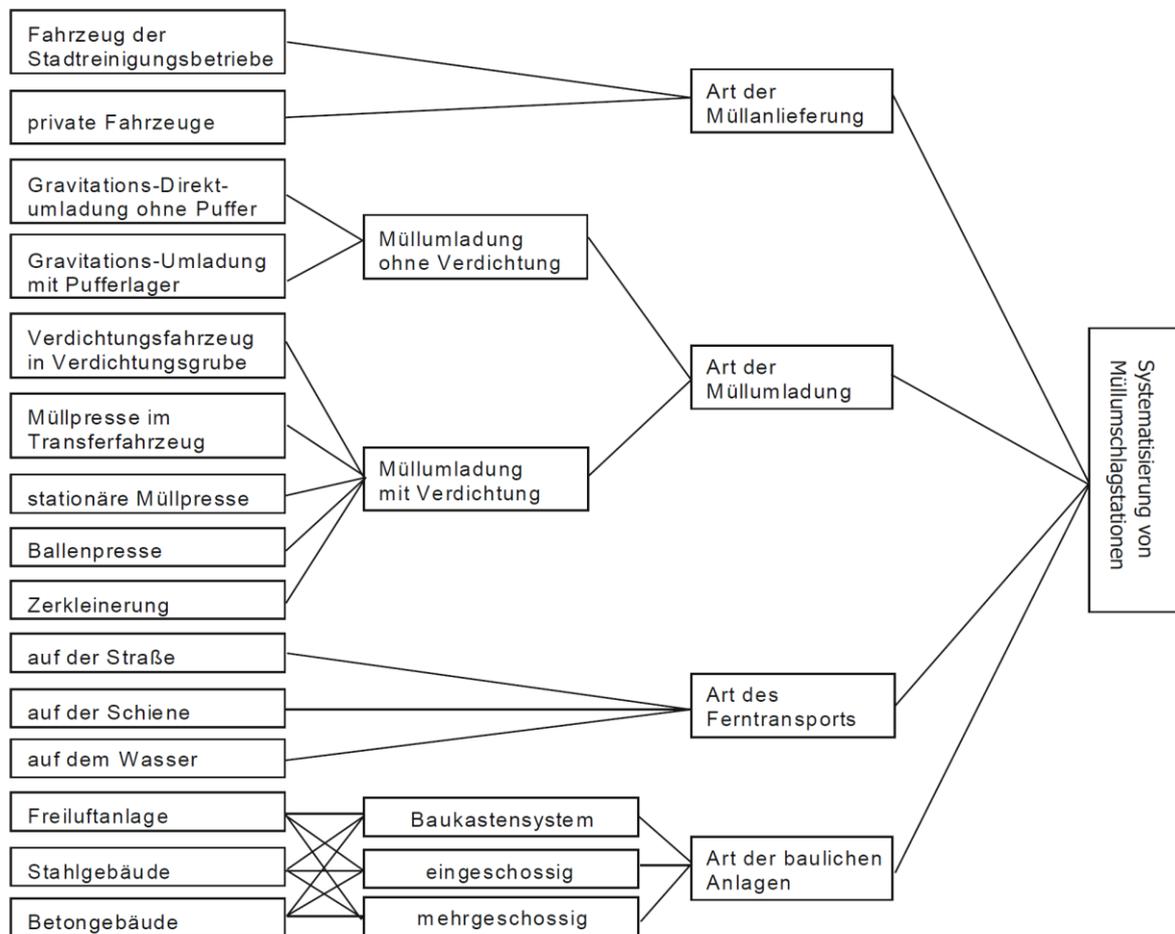


Abbildung 8: Systematische Darstellung verschiedener Varianten von Umschlagstationen (Bilitewski und Härdtle 2013:139).

Die verschiedenen Kombinationsmöglichkeiten von Trennvorschriften, Erfassungsarten, Transport- und Umschlagvarianten (mit oder ohne Verdichtung) haben jeweils eine direkte Auswirkung auf die Menge und Qualität der Abfälle, welche je Anlieferung in der Kunststoffsortieranlage eintreffen. Durch die bewusste Gestaltung der Sammelstruktur kann somit eine Verbesserung des Anlageninputs realisiert werden, ohne direkten Einfluss auf die Trennmoral der Bevölkerung durch Aufklärung und Marketing betreiben zu müssen (Bauer 2017).

3.1.3 Demografische Einflussfaktoren

Die Menge und Qualität der zur Verfügung stehenden Sammelfraktionen wird zu Beginn der Verwertungskette vom Abfallerzeuger determiniert. Untersuchungen zeigen, dass die zur Verfügung gestellte Menge an getrennt gesammelten Wertstoffen, sowie die Anzahl an (bewussten oder unbewussten) Fehlwürfen statistisch maßgeblich von demografischen Einflussfaktoren abhängt. Einige zentrale Punkte sind laut Bilitewski und Härdtle (2013):

- Alter
- Haushaltsgröße
- Bildungsgrad
- Beschäftigung
- Lebensstandard und Konsumverhalten
- Wohnform (Gartenfläche, Eigenversorgungsgrad)
- Wohnort (Bebauung, Gegebenheiten)
- Aufklärung und Information im Bereich Umweltschutz und Recycling

Eine qualitative Studie der Universität Wien machte deutlich, dass die individuellen Gründe für oder gegen Trennbereitschaft vielfältig sind und einem permanenten sozialen Wandel unterliegen. Neben strukturellen Beobachtungen werden darin auch konkrete Beispiele genannt: Mehrere Personen gaben an Müll dann nicht getrennt zu entsorgen, wenn dieser nicht direkt am Wohnstandort, sondern im Bringsystem gesammelt wird. Die genannten Gründe dafür sind neben Bequemlichkeit auch prinzipieller Natur. Beispielsweise wurden von den Interviewten viele Vergleiche zu besseren und komfortableren Systemen in anderen Regionen Österreichs oder der Welt gezogen und Unverständnis geäußert, warum in Wien ein solcher Mehraufwand geleistet werden soll. Dies zeigt, dass vergangene Wohnsitze oder Reiseziele ebenfalls eine Auswirkung auf das Trennverhalten haben können. Interessant ist auch, dass die Hürde zur regelmäßigen Nutzung von Sammelinseln von Hundebesitzern potenziell geringer ist, da der Weg dorthin mit dem täglichen Auslauf verbunden werden kann und dieser demzufolge weniger als Zusatzbelastung empfunden wird (Udway 2013).

Eine wichtige Kenngröße zur Ermittlung der Trennbereitschaft ist der „Erfassungsgrad“ bzw. die „Erfassungsquote“. Diese wird gemäß Formel (1) ermittelt und ist das Verhältnis der aus den Haushalten als getrennt gesammelte Fraktionen erfassten Wertstoffe und den insgesamt anfallenden Wertstoffen in denselben Haushalten. Der Wert wird üblicherweise durch Sortieranalysen des Restmülls und der getrennt gesammelten Fraktionen ermittelt. Die Erfassungsquote ist in der Praxis deutlich unter 100 %, da stets ein gewisser Anteil an Wertstoffen (bewusst oder unbewusst) im Restmüll entsorgt wird (Kranert 2018).

$$\text{Erfassungsquote} = \frac{\text{Erfassbare Wertstoffe}}{\text{Wertstoffpotenzial}} \times 100\% \quad (1)$$

Um die Erfassungsquote zu erhöhen ist es essenziell die Einflussfaktoren auf das Trennverhalten verschiedener demografischer Gruppen zu ermitteln. Zu den Hauptaspekten gehört dabei die benutzerfreundliche Gestaltung des Wertstoff-Sammelsystems. Dabei ist zu

beachten, dass unterschiedliche Personengruppen individuelle Bedürfnisse haben. In Bezug auf die Öffentlichkeitsarbeit zur Steigerung der Motivation (häufig als „Trennmoral“ bezeichnet) ist die Betonung des Umweltschutzgedankens bei gleichzeitigem Deutlichmachen des persönlichen Nutzens besonders relevant. Dabei ist die gezielte Übermittlung von Informationen wichtig. Dazu zählen beispielweise Ziele und Auswirkungen der getrennten Sammlung, genaue Daten über den Organisationsablauf und die lokal geltenden Trennvorschriften mit entsprechender Begründung (Bilitewski und Härdtle 2013).

Eine quantitative Studie des Meinungsforschungsinstituts Civey im Jahr 2019 untersuchte im Auftrag des Entsorgungsunternehmens SUEZ Deutschland die Gründe für schlechte Trennmoral. Die Befragung von rund 10.000 Personen ergab als Hauptgründe dafür den Siedlungsabfall nicht korrekt zu trennen „Müll wird sowieso zusammen verbrannt“ (14 %), „Müll geht ins Ausland und wird nicht recycelt“ (8,3 %) sowie „Müll landet sowieso auf einer Deponie“ (7 %). In Summe ergibt dies 29,3 % der Befragten, die aufgrund von Vorurteilen eine geringe Motivation zur korrekten Mülltrennung haben. Weitere 9,9 % der Befragten gaben „Bequemlichkeit“ als Grund an. Nur 67,2 % der Befragten gaben an, ihren Müll korrekt zu trennen, woraus sich ein wichtiges Handlungsfeld für Öffentlichkeitsarbeit inklusive Informationskampagnen ergibt (bvse 2020).

Darüber hinaus können auch finanzielle Anreize geschaffen werden, die dem Abfallerzeuger einen finanziellen Vorteil durch die getrennte Sammlung verschafft (Bilitewski und Härdtle 2013). Im Bereich der LVP-Abfälle wird dies in Österreich gemacht, da der Konsument bereits beim Kauf eines verpackten Produktes die Entsorgungskosten mitträgt (Lizenzierungssystem). Bei einer Entsorgung im Restmüll wird somit doppelt bezahlt, da die getrennte Erfassung, beispielweise im Gelben Sack, kostenfrei ist, für die Restmüllentsorgung aber Kosten anfallen (AWV Steiermark 2021).

3.1.4 Wirtschaftliche Einflussfaktoren

Das gesamte Wertstoffpotenzial des Siedlungsabfalls kann aufgrund unvermeidbarer Verluste niemals ausgeschöpft werden. Welcher Anteil des Gesamtpotenzials schlussendlich verwertet wird, ist aber neben den bisher genannten sozialen und ökologischen Gründen, maßgeblich eine wirtschaftliche Frage. Abbildung 9 zeigt vereinfacht verschiedene Ebenen der Verluste (Bilitewski und Härdtle 2013).

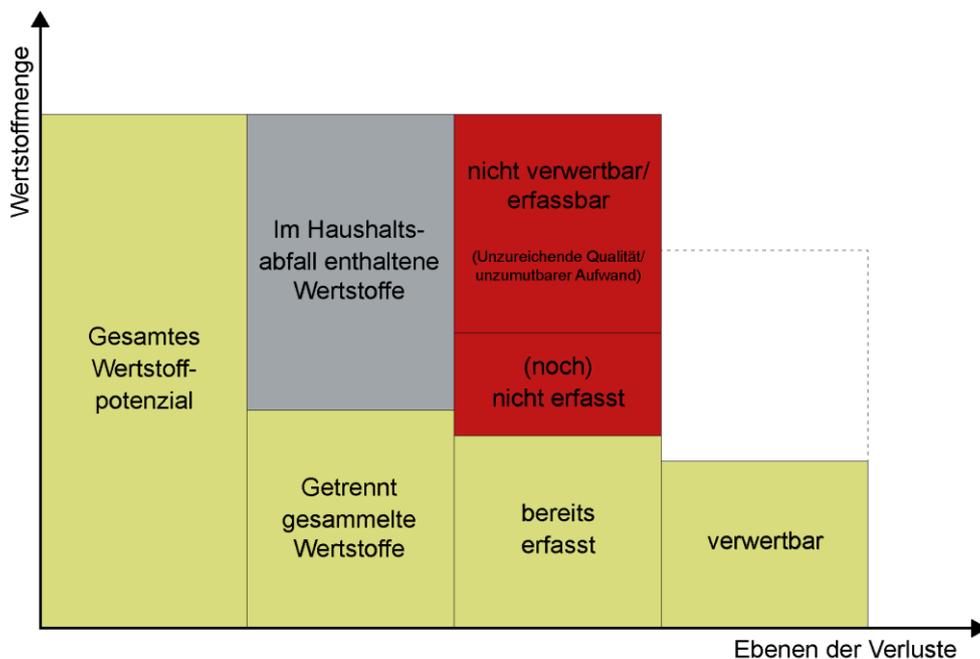


Abbildung 9: Ebenen der Verluste und resultierender Anteil an verwertbarem Material im Vergleich zum gesamten Wertstoffpotenzial. Verwertungspotential als strichlierte Linie. (Vereinfacht dargestellt auf Basis von Bilitewski und Härdtle 2013:152).

Durch die korrekte und umfassende Trennung direkt durch die Abfallerzeuger können Stoffströme hoher Qualität erzeugt werden. Der Einsatz vieler Sammelbehälter für verschiedene Stoffströme wird aber in der Regel nur umgesetzt, wenn es wirtschaftlich interessant ist. Die „Verlustebene 1“ bezieht sich demnach auf fehlende Infrastruktur. Dadurch wird die maximale Wertstofftrennung am Anfallsort nicht ermöglicht und die Erfassungsquote (Vgl. Formel (1)) entsprechend reduziert. Das Gesamtwertstoffpotenzial teilt sich folglich in getrennt gesammelte Wertstoffe und weiterhin im Haushaltsabfall enthaltene Wertstoffe. Als Beispiel dient das in Kapitel 3.1.2 beschriebene Sammelsystem 915, in dem ausschließlich PET-Flaschen und Getränkeverbundkartons gesammelt werden, während die übrigen Kunststoffverpackungen bewusst in den Restmüll verlagert werden (Bilitewski und Härdtle 2013, NÖ Umweltverbände 2019).

Die nächste Ebene betrifft die sogenannte „qualitativ nutzbare Wertstoffmenge“. Das ist jener Anteil der qualitativ hochwertigen, im Haushaltsabfall enthaltene Wertstoffe zuzüglich der bereits getrennt gesammelten Wertstoffe. „Verlustebene 2“ umfasst jene Wertstoffe, die durch falsche Trennung (bewusst oder unbewusst) am Anfallsort verloren gehen. Diese Fraktion, in

der Grafik als „(noch) nicht erfasst“ bezeichnet ist, kann bei ausreichendem wirtschaftlichem Interesse, durch finanzielle Anreize für den Abfallerzeuger oder durch verstärkte Öffentlichkeitsarbeit positiv beeinflusst werden (Bilitewski und Härdtle 2013).

Die letzte Ebene umfasst jene Wertstoffe, deren Qualität in der Praxis für eine Verwertung ausreichend ist („Verwertbare Wertstoffe“). Werden diese auf die gleiche Abfallmenge bezogen, sodass das Gesamtwertstoffpotential keine Importe von zusätzlichem Material beinhaltet, ergeben sich nach Kranert (2018) die folgenden beiden Kennzahlen:

$$\text{Sortierquote} = \frac{\text{Verwertbare Wertstoffe}}{\text{Erfassbare Wertstoffe}} \times 100\% \quad (2)$$

$$\text{Verwertungsquote} = \frac{\text{Verwertbare Wertstoffe}}{\text{Wertstoffpotenzial}} \times 100\% \quad (3)$$

In (Kunststoff-)Sortieranlagen werden aus dem gemischten Input über teilweise komplexe Abfolgen von Trennaggregaten Wertstoffen aussortiert. Störstoffe und zu stark verschmutzte Wertstoffpartikel oder Agglomerate werden abgeschieden. Als Resultat ergeben sich im Output verwertbare Wertstoffe. Das Verhältnis von verwertbaren und erfassbaren Wertstoffen wird als Sortierquote (meist äquivalent zu „Sortiertiefe“) bezeichnet und gemäß Formel (2) ermittelt. Die „Verlustebene 3“ umfasst demnach bezogen auf einen spezifischen Wertstoff-Output jene Wertstoffe, die im Zuge der Sortierung in den Anlagenreststrom oder in einen falschen Output gelangen (Kranert 2018). Je nach wirtschaftlichem Interesse kann dabei durch bessere oder zusätzliche Sortieraggregate, Rezirkulierung, Qualitätskontrolle durch Handsortierung und andere Maßnahmen die Sortierquote erhöht werden. Außerdem kann neben den getrennt gesammelten Wertstoffen auch der Restabfall sortiert werden, um darin verbliebene Reststoffe verwerten zu können.

Die Verwertungsquote, welche nach Formel (3) berechnet wird, ist das Verhältnis des schlussendlich aus der Sortieranlage entstammenden Wertstoff-Outputs der tatsächlich verwertet wird und des Gesamtwertstoffpotenzials aus dem Haushaltsabfall (Kranert 2018). Die „Verlustebene 4“ entsteht durch den Marktwert des Abfalls. Die Menge der tatsächlich verwertbaren Wertstoffe ist abhängig von der Marktlage (national und global) und der Wertstoffqualität. Dadurch kann die „nationale“ Verwertungsquote, also jene, bei der Importe nicht berücksichtigt werden, womöglich deutlich niedriger als die Gesamt-Verwertungsquote einer Region sein. Durch Importe von hochqualitativen Recycling-Materialien könnte die Verwertungsquote (3) theoretisch deutlich höher als die Erfassungsquote (1) sein. (Bilitewski und Härdtle 2013). Die Verwertungsquoten sinken außerdem automatisch, wenn die Preise der Primärprodukte geringer sind als die der Recyclingprodukte (Ferreira et al. 2012).

Sofern der Input von Recyclingmaterial also nicht gesetzlich zwingend ist, ist die „nationale“ Verwertungsquote maßgeblich von den Preisen der Primärprodukte und den globalen Marktpreisen von Recyclingmaterialien abhängig. Die Motivation Maßnahmen in den verschiedenen Verlustebenen zu setzen wird demnach primär von wirtschaftlichem Interesse geprägt.

3.1.5 Europäischer Vergleich

Aufgrund der starken europäischen Vernetzung macht es heute wenig Sinn ein nationales System isoliert zu betrachten. Durch die zahlreichen Vorgaben der Europäischen Union (EU) im Bereich der Abfallwirtschaft ist der Vergleich der verschiedenen Systeme und die Ausarbeitung deren Vor- und Nachteile unerlässlich, um die eigene Abfallwirtschaft zu optimieren. Dieses Kapitel soll einen groben Überblick über die Mengen und Qualitäten von Kunststoffverpackungsabfällen und Abfallwirtschaftssystemen in Europa geben. Der Fokus liegt dabei auf Ländern, deren Stand der Technik zumindest gleichwertig zu jenem in Österreich ist. Außerdem sollen einige alternative Sammelsysteme kurz dargestellt werden.

Sammelmengen und Recyclingquoten

In Abbildung 10 sind die Kunststoffverpackungsabfallmengen europäischer Länder im Vergleich dargestellt. Links in der Grafik befinden sich jene Länder, welche das höchste Abfallaufkommen pro Person haben. Dazu zählen Irland, Island und Luxemburg mit über 42 kg/EW. Neben der Abfallmenge pro Person ist für die Gestaltung der Abfallwirtschaft und die Anforderungen an eine Aufbereitungsanlage aber vor allem die absolute Menge relevant. Den höchsten Wert erzielt dabei Deutschland mit über 3,2 Mio. t, dahinter das Vereinigte Königreich (2,36 Mio. t), Frankreich (2,36 Mio. t) und Italien (2,29 Mio. t). Irland, Island und Luxemburg haben aufgrund ihrer geringen Bevölkerungsanzahl trotz des hohen pro-Kopf-Verbrauches ein vergleichsweise niedriges Gesamtabfallaufkommen (Europäisches Parlament 2018, Eurostat 2020b).

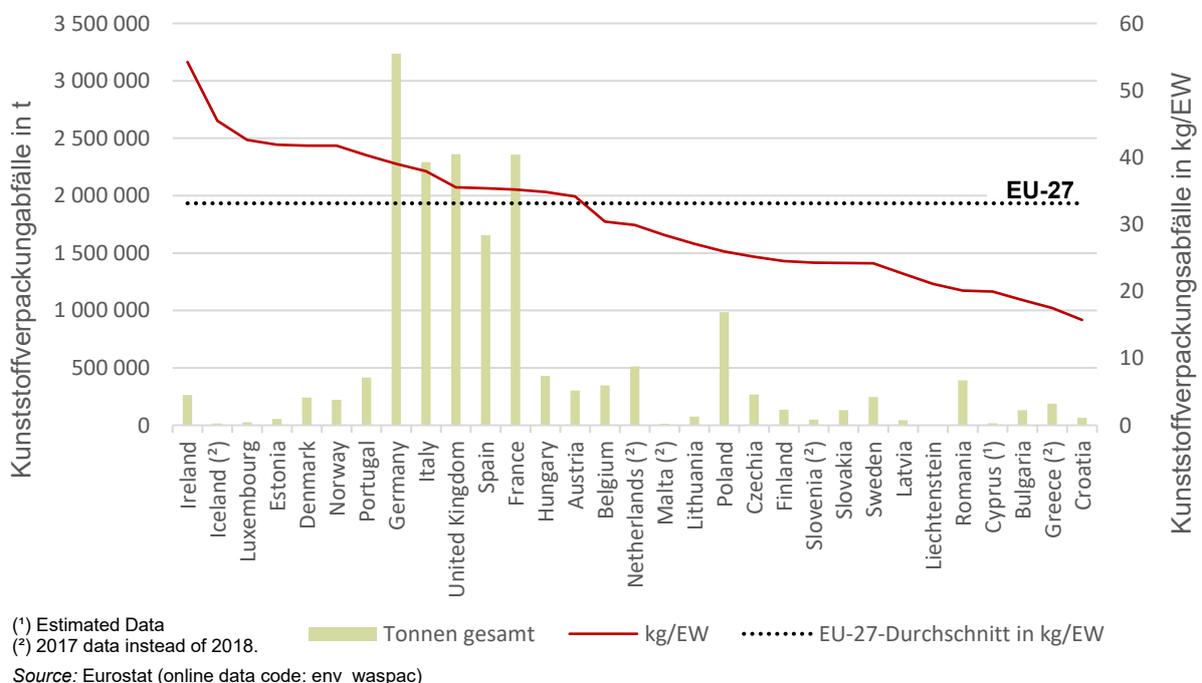
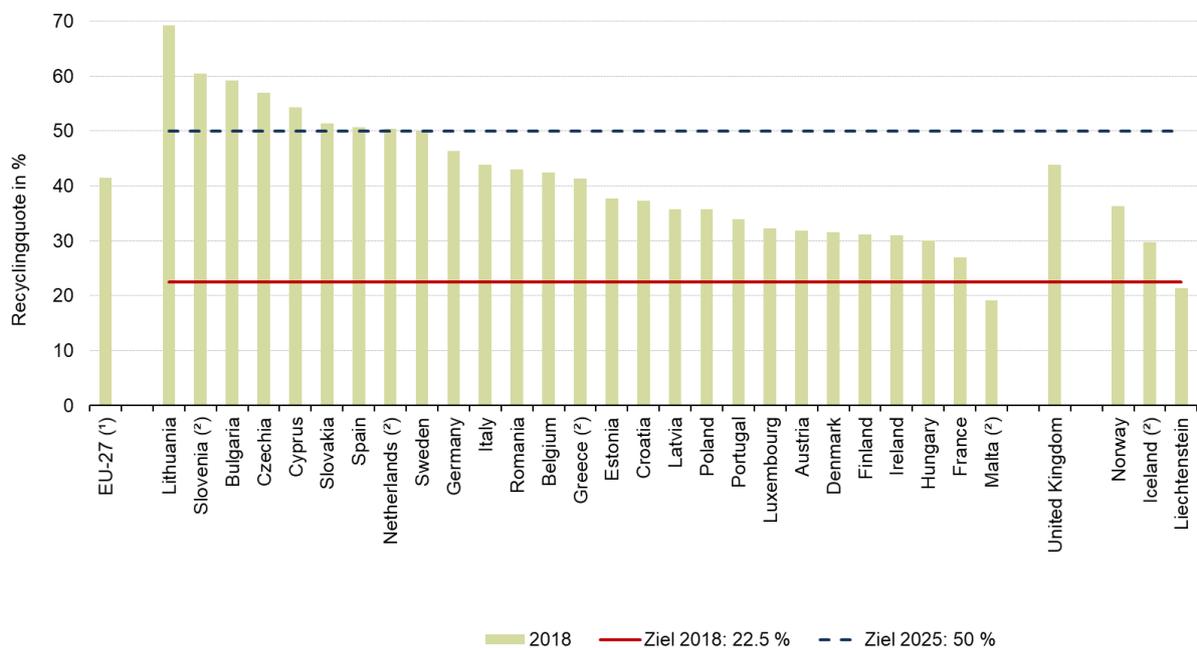


Abbildung 10: Menge an Kunststoffverpackungsabfällen im europäischen Vergleich im Jahr 2018 in Tonnen gesamt (grün) und kg/EW (rot bzw. schwarz, strichliert für EU-27-Durchschnitt). Geschätzte Daten sind mit (1) und Daten aus 2017 mit (2) markiert (Datenquelle: Eurostat 2020b).

Österreich hatte im Jahr 2016 ein Gesamtabfallaufkommen im Kunststoffverpackungsbereich von 297.837 t, was deutlich unter dem EU-28-Schnitt von 582.087 t im selben Jahr war. Dennoch lag Österreich damit auf dem zwölften Platz und damit im Ranking vor Irland (13), Schweden (14) und Tschechien (15). Im Jahr 2018 war der Wert in Österreich bereits bei 302.000 t (+1,4 %). Deutschland hatte im gleichen Zeitraum eine Steigerung um 4,5 %, Belgien um 2,3 %. Durchschnittlich erhöhten sich die Kunststoffverpackungsmengen zwischen 2016 und 2018 im EU-28-Raum um 5,3 %. (Eurostat 2020b).

Dies bedeutet folglich, dass es nötig ist die Kapazitäten für Sammlung, Sortierung und Verwertung europaweit stetig auszubauen, um nicht nur die aktuelle Recyclingquote zu halten, sondern die neuen Recyclingziele für 2025 von 50 % und 2030 von 55 % erreichen zu können. Abbildung 11 zeigt die Recyclingquoten von Kunststoffverpackungsabfällen in Europa vom Jahr 2018 (Berechnet nach der damals gültigen Berechnungsmethode). Das Recyclingziel von 22,5 % konnten die meisten Länder erreichen, jenes von 50 % erreichten zum damaligen Stand lediglich Litauen, Slowenien, Bulgarien, Tschechien, Zypern, Slowakei, Spanien, Niederlande und Schweden. Von diesen neun Ländern haben sieben Gesamtabfallmengen von weniger als 300.000 t. Daraus lässt sich schlussfolgern, dass Länder mit großen Abfallmengen komplexere Abfallwirtschaftssysteme benötigen, um zumindest gleichwertige Ergebnisse zu erzielen (EU 2018/852, Eurostat 2020c).



(¹) Eurostat estimates.

(²) 2017 data instead of 2018.

Source: Eurostat (online data code: env_waspacr)

Abbildung 11: Recyclingraten von Kunststoffverpackungsabfällen im Jahr 2018 in Europa (grün) Geltendes Recyclingziel 2018 von 22,5 % (rot) und Recyclingziel 2015 von 50 % (schwarz; strichliert). Geschätzte Daten sind mit (¹) und Daten aus 2017 mit (²) markiert (Datenquelle: Eurostat 2020c).

Varianten von Sammelsystemen

In Europa sind viele Varianten von Abfallwirtschaftssystemen im Einsatz. Viele Länder, wie auch Österreich, haben teilweise starke regionale Unterschiede und kein einheitliches System. Während in einigen Ländern die regelmäßige Abholung von Abfällen am Wohnstandort (Holservice) in den meisten Regionen üblich ist, wird die getrennte Sammlung in anderen Ländern hauptsächlich im Bringservice durchgeführt. In Belgien gibt es beispielsweise das System des „Grünen Punkts“ („The Green Dot“), welches als Mindestservice eine Abholung der erlaubten Leichtverpackungen und Metallverpackungen („PMD“) zweimal pro Monat beinhaltet. Zusätzlich gibt es meist Sammelinseln und Abfallsammelzentren, in denen die Abgabe von PMD-Material ebenfalls möglich ist. In Portugal werden Verpackungsabfälle hingegen üblicherweise in Sammelinseln oder Abfallsammelzentren gesammelt und nicht im Holservice. Der Anteil an getrennt gesammelten Verpackungsabfällen im Holservice liegt bei unter 5 % (Marques et al. 2014).

In Abbildung 11 ist zu sehen, dass Litauen im Jahr 2018 mit 69,3 % die mit Abstand höchste Recyclingrate in Europa erreichte. Ein Hauptgrund dafür dürfte das 2016 eingeführte Pfandsystem sein. Durch den flächendeckenden Einsatz von Pfandrücknahmeautomaten, welche in großen Einzelhandelsketten installiert wurden, konnten die Zielfractionen in hoher Reinheit gesammelt werden. Slowenien, welches im Ranking mit 60,4 % Platz 2 erreicht, (Vgl. Abbildung 11) hat in den letzten 15 Jahren eine enorme Entwicklung vorzuweisen. Die slowenische Bevölkerung hat heute ein hohes Bewusstsein für die Bedeutung von Mülltrennung und Kreislaufschließung, obwohl vor 15 Jahren noch kein Recycling betrieben wurde. Hier wurde in Ljubljana neben der Öffentlichkeitsarbeit vor allem auch in ein komfortables Holsystem und zwei Abfallsammelzentren investiert. Bulgarien, welches mit 59,2 % die drittbeste Recyclingquote Europas hat (Vgl. Abbildung 11) hat in den letzten Jahren in moderne Sortieranlagen investiert und dadurch die hohe Rate erreicht (Carbonaro 2019, Eurostat 2020c).

Sammlung im Wertstoffsack

Nicht nur die Art der Abholung (Hol- oder Bringsystem) sondern auch die Art der Sammelbehälter ist in Europa nicht einheitlich. In Nordeuropa sind zusätzlich zu den Sammelcontainern oder transparenten Sammelsäcken, die mit dem österreichischen System vergleichbar sind, auch Mehrkammer-Behälter und stark gefärbte Sammelsäcke üblich. Mehrkammer-Behälter ermöglichen die gemeinsame Sammlung mehrere Abfallarten in einem Sammelbehälter, welcher aber in Kompartimente unterteilt ist. Beispielsweise können dadurch verschiedene Verpackungsarten (Papier, Plastik, Glas, Metall, etc.) in einem Behälter gesammelt und in geeigneten Sammelfahrzeugen zusammen abgeholt werden. In Schweden und Dänemark ist diese Art der Sammlung in verschiedenen Modifikationen verbreitet und auch in Finnland scheint dieses System an Popularität zu gewinnen. Ein Vorteil dieses Systems ist die Platzeinsparung durch die reduzierte Anzahl an Sammelbehältern. Nachteilig ist der Bedarf an speziellen Behältern und Sammelfahrzeugen. Da Schweden eine gute

Verpackungsplastik-Recyclingquote vorweist (50,0 %), scheint dieses System Potential zu haben (Fråne et al. 2015, Eurostat 2020c).

Eine andere Variante der Abfallsammlung ist die Nutzung von gefärbten Wertstoffsäcken in klar differenzierbaren Farben. Die verschiedenen Abfallarten werden von den Abfallerzeugern in den Sack der entsprechenden Farbe entsorgt und verschlossen. Üblicherweise sind dabei drei bis fünf verschiedene Sackfarben im Einsatz, in seltenen Fällen werden auch sechs verschiedene Abfallarten auf diese Art gesammelt. Die Säcke werden in einer gemeinsamen Tonne gesammelt und zusammen abtransportiert. Im Anschluss werden die Säcke in einer Vorsortieranlage nach Farbe getrennt. Die Säcke der jeweiligen Fraktion werden dann geöffnet und getrennt gebunkert. Die Abfallströme werden dann zu den entsprechenden Verarbeitungsunternehmen, wie Kunststoffsortieranlagen, Biogasanlagen oder Verbrennungsanlagen transportiert (Fråne et al. 2015).

Dieses System ist gut geeignet für Kunststoff-, Metall- und Papierverpackungen sowie Restmüll und Biomüll. Altglas wird nicht auf diese Art gesammelt, da Bruchglas die Säcke beschädigen würde. Dieses „Sack-im-Behälter“-Verfahren wird beispielsweise in Norwegen verstärkt eingesetzt. Der Vorteil dieses Systems ist ebenfalls der verringerte Platzbedarf für Containerstellflächen. Außerdem wird die Benutzerfreundlichkeit erhöht, da die Abholung fast aller Abfallfraktionen direkt am Grundstück erfolgt. Allerdings ist die Nutzlast im Sammelfahrzeug im Vergleich zur Sammlung in Containern verringert und der Sortieraufwand durch die zusätzlich notwendige Sortierstufe deutlich erhöht. (Fråne et al. 2015, Sörme et al. 2019, Bilitewski und Härdtle 2013). Eine weitere Herausforderung ist die Tatsache, dass die Farbcodierung der Abfallarten nicht einheitlich ist. Dadurch können gefärbte Abfallsäcke aus Ländern mit unterschiedlicher Zuordnung nicht gemeinsam sortiert werden. Die EU plant daher bis 2022 neue Richtlinien zur Vereinheitlichung der Farbsysteme zu veröffentlichen (euractiv 2020).

Die grundsätzliche Anwendung der Sammlung in Wertstoffsäcken bietet auch die Möglichkeit eines Lenkungseffektes durch monetäre Anreize. Durch unterschiedliche Preise der Restmüll- und Wertstoffsäcke kann die Bevölkerung dazu animiert werden, die Abfälle besser zu trennen. Außerdem gibt es bei einer solchen Bepreisung pro Sack eine direkte Korrelation der verursachten Abfallmenge und der Sammel- und Entsorgungspreise. Bei einem fixen Entsorgungsintervall eines Containers, unabhängig von dessen Füllstand, sieht der Abfallerzeuger keinen direkten Vorteil darin seine Abfallmenge zu reduzieren. Bei einem solchen System ist es unerlässlich, dass die Sammelsäcke transparent sind, um eine visuelle Kontrolle des Reinheitsgrades zu ermöglichen. Sammelsäcke mit unpassendem Inhalt werden bei der Abholung zurückgelassen. Daher wird bei dieser Anwendung der Wertstoffsäcke, im Gegensatz zum „Sack-im-Behälter“-Verfahren, üblicherweise eine getrennte Abholung der Abfallarten durchgeführt. (Bilitewski und Härdtle 2013).

Pfandsystem

Eine spezielle Art der Abfallsammlung ist das Pfandsystem, welches für ausgewählte Produkte eingesetzt wird. Für Getränkeverpackungen, insbesondere PET-Flaschen und Aluminium-Dosen, ist dieses System weltweit verbreitet. In etwa 20 % der Länder ist Einweg-Pfand für Getränkeverpackungen im Einsatz. In Europa gibt es bereits in neun Ländern ein Einweg-Pfandsystem, darunter neben bekannten Systemen in den skandinavischen Ländern und Deutschland auch weniger bekannte Beispiele wie Island und Kroatien. In sieben europäischen Ländern ist die Einführung bis spätestens 2024 geplant und in 10 weiteren, darunter auch Österreich, ist sie aktuell in Diskussion (Statista 2020).

Zu den Vorteilen des Pfandsystems zählt die hohe Rücklaufquote in hoher Reinheit. Weiters werden durch das gezielte Ausschleusen von beispielsweise PET-Flaschen außerhalb der LVP-Sammlung Kapazitäten in den Kunststoffsortieranlagen frei (Vgl. Abbildung 12), welche für eine tiefergehende Trennung anderer Kunststoffverpackungsabfälle genutzt werden kann. Dadurch könnte die Recyclingquote für andere Kunststoffe erhöht werden. Außerdem gibt es auch indirekte Effekte für das Abfallwirtschaftssystem: Die Gleichstellung von Einweg und Mehrweg in Bezug auf den Komfort (Notwendigkeit zur Rückgabe der Verpackung im Supermarkt) führt dazu, dass Mehrweggebinde attraktiver werden und sich Einweg-Verpackungskunststoffe in der Folge reduzieren könnten. Darüber hinaus zeigte sich in Litauen, Norwegen und Dänemark durch den monetären Anreiz eine Reduktion des Littering. Nachteilig ist die komplexere Logistik eines Pfandsystems und die damit verbundenen Kosten für Implementierung und Betrieb (Statista 2020, Schweiger 2020).

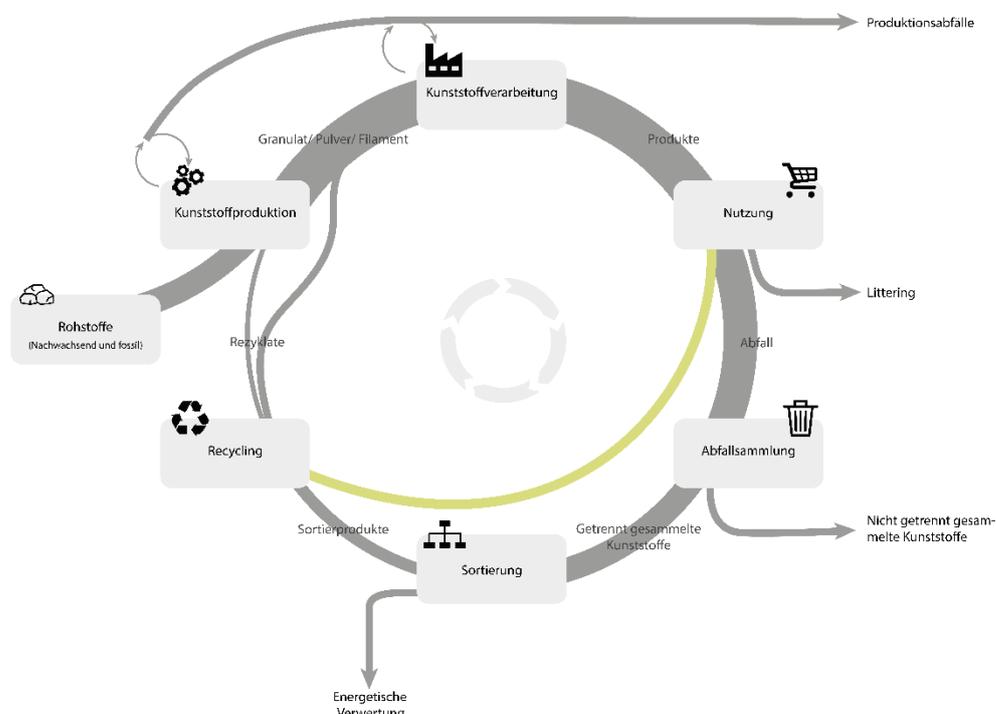


Abbildung 12: Stoffstromänderung im Kunststoffkreislauf durch das Pfandsystem (grün) (Erstellt auf Basis von GPA 2019, Hellerich 2010, Reh et al. 2013 und Schweiger 2020).

In Deutschland gibt es für die Rücknahme von mit einem Pfand versehenen Einweg-Getränkeflaschen zwei Varianten: Die manuelle und die maschinelle Rücknahme. Dabei kann sich ein Geschäft mit einer Geschäftsfläche von unter 200m² auf die Rücknahme ausschließlich jener Marken beschränken, die im jeweiligen Sortiment enthalten sind. Alle übrigen Einzelhändler sind verpflichtet alle pfandpflichtigen Einweg-Getränkeverpackungen jener Materialarten zurückzunehmen, welche vertrieben werden. Nach der manuellen Rücknahme an der Kasse wird das Material an Zählzentren geliefert, in welchen die Verrechnung der Pfandsumme durchgeführt und das Material sortiert wird. Bei der maschinellen Rücknahme werden Automaten mit oder ohne Verdichtungseinheit genutzt. Die Verrechnung erfolgt dabei auf Basis der durch den Rücknahmeautomaten erfassten Daten (Anker Andersen 2021, DPG 2021). Je nach Ausführung können in einem Rücknahmeautomaten unterschiedlich viele Fraktionen sortiert, kompaktiert und getrennt voneinander gelagert werden (TOMRA 2021).

Österreich und Deutschland haben in Bezug auf das Abfallwirtschaftssystem viele Parallelen. Ein maßgeblicher Unterschied ist das Einwegpfand auf PET-Flaschen und Getränkedosen in Deutschland. Für den Vergleich der beiden Systeme ist die Betrachtung einiger Kennzahlen sinnvoll. Eine häufig genutzte Kennzahl ist der „Fehlwurfanteil“ (Vgl. Abbildung 13a), also der Anteil an Nicht-Verpackungen (stoffgleich oder nicht-stoffgleich), die in der getrennten Sammlung miterfasst werden. Der Fehlwurfanteil ist in Österreich mit 20 Gew.-% deutlich geringer als jener in Deutschland (35 Gew.-%). Der Grund dafür dürfte die Existenz sehr selektiver Sammelsysteme (z.B. Identifikationsnummer 915, Vgl. Tabelle 4) sein, welche eine geringe Fehlwurfquote haben. Im Gegensatz dazu ist der „Fremdmüllanteil“, also der Anteil von LVP und Metallen im Restmüll (Vgl. Abbildung 13b) in Deutschland geringer. In Österreich werden 4 Gew.-% an LVP und Metallen im Restmüll gezielt miterfasst und auch entsprechend mit der ARA verrechnet. Dieser Anteil wird als „Zukaufmenge“ bezeichnet. Doch auch unter Berücksichtigung dieser Besonderheit sind die Ergebnisse in Deutschland besser (5 Gew.-% statt 9 Gew.-% - beides inkl. Anhaftungen und Restinhalte). Der Anteil an LVP und Metallen in der getrennten Sammlung („Abschöpfungsgrad“) ist in Deutschland ebenfalls besser als in Österreich. In Deutschland werden 60 Gew.-% getrennt erfasst, während es in Österreich nur 51 Gew.-% sind (Vgl. Abbildung 13c). Der Lizenzierungsgrad, also der Anteil an lizenzierten Verpackungsabfällen ist in Österreich dafür deutlich besser. Der Vorsprung liegt hier je nach Literaturangabe im Bereich 6 - 20 Gew.-% (Vgl. Abbildung 13d) (Reh et al. 2013).

a) Fehlwurfanteil in der Verpackungssammlung



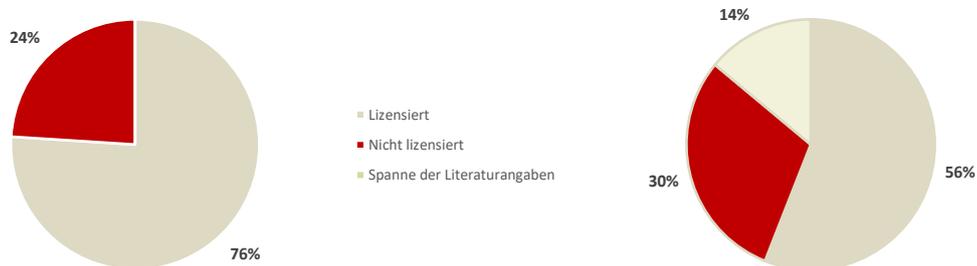
b) LVP und Metalle im Restmüll



c) Anteil getrennt gesammelte LVP und Metalle



d) Lizenzierungsgrad



Österreich

Deutschland

Abbildung 13: Vergleich einiger Kennzahlen bzgl. Trennung und Lizenzierung in Österreich (links) und Deutschland (rechts). Alle Angaben in Gew.-% (Datenquelle: Reh et al. 2013:27).

Ein Pfandsystem optimiert somit nicht automatisch alle relevanten Kennzahlen eines Abfallwirtschaftssystems, kann aber ein wichtiger Teil eines modernen Sammelsystems sein.

Rein technische Trennung

Ein alternativer Ansatz zur Sammlung und Aufbereitung von Kunststoffverpackungsabfällen ist eine rein technische Trennung von nicht getrennt gesammelten Abfällen. Feil et al. (2016a) beschreibt die Möglichkeit einer rein mechanisch-biologischen Aufbereitung (MBA) von gemischten Haushaltsabfällen als Alternative zum Sammelsystems von Verpackungsabfällen im Gelben Sack. Die Basis für die Untersuchung sind die beiden niederländischen Systeme von „Bronscheiding“ (getrennte Sammlung) und „Nascheiding“ (Gemeinsame Sammlung im Restmüll mit anschließender Trennung in einer MBA).

Diese gemeinsame Sammlung mit anschließender Trennung würde sich nicht ausschließlich auf Verpackungsabfälle konzentrieren, sondern alle Kunststoffe zur Zielfraktion machen. Dadurch erhöht sich das Kunststoffpotential doppelt: Einerseits, weil man keine Verluste vom Gelben Sack in den Restmüll hat (Vgl. Abbildung 13b und c) und andererseits, weil man auch Nicht-Verpackungen für ein Recycling berücksichtigt. Diese werden im aktuellen System gemeinsam mit dem Restmüll verbrannt und sind somit für ein Recycling verloren. Somit können in diesem System die Abfallmengen deutlich erhöht werden, während die Qualität durch Verunreinigungen und biologische Aktivität abnimmt. In den Versuchen von Feil et al. (2016a) konnten zwei rezyklierbare Fraktionen aus dem gemischten Abfall gewonnen werden. Insbesondere für urbane Regionen, in denen die getrennte Sammlung besonders schlecht funktioniert, könnte ein solches System aber eine valide Alternative sein (Feil et al. 2016a).

Implementierung anderer Systeme in Österreich

Bei Überlegungen zur Implementierung neuer Systeme in Österreich ist stets zu berücksichtigen, dass die Gesamtabfallmengen in Österreich mit ca. 300.000 t gering sind. Allein in einer Anlage in Nordrhein-Westfalen (D) werden jährlich 95.000 t LVP-Material sortiert. Eine der größten Kunststoffsortieranlagen in Österreich hat im Gegensatz dazu bloß einen jährlichen Input von rund 20.000 t (Eurostat 2020b, umwelt.nrw 2018, Brantner 2021). Diese infrastrukturellen Unterschiede sind maßgeblich dafür, ob ein System wirtschaftlich sein kann oder nicht. Dennoch ist die Orientierung an gut funktionierenden Systemen innerhalb und außerhalb Europas wichtig, um die Recyclingquoten in Österreich zu verbessern.

3.2 Anlagenspezifische Einflussfaktoren

Wie im vorigen Abschnitt bereits erläutert, sind Kunststoffsortieranlagen in Europa und auch innerhalb Österreichs aufgrund der unterschiedlichen Abfallmengen sehr unterschiedlich. In Österreich sind einerseits die Abfallmengen gering (300.000 t pro Jahr) und andererseits existieren aufgrund der historisch gewachsenen und teilweise geografisch und demografisch bedingten Struktur viele kleine Kunststoffsortieranlagen. Während große Anlagen üblicherweise einen hohen Automatisierungsgrad haben und insbesondere auch mehrere Sortierstufen von sensorgestützten Sortierern implementiert sind, ist bei kleinen Anlagen die händische Sortierung weniger Zielfractionen bzw. der Einsatz einer geringen Anzahl sensorgestützter Sortierer üblich. Folglich ist das Potential für Modernisierung in Österreich besonders hoch, da es viele Anlagen mit einem geringen Automatisierungsgrad gibt. Allerdings ist dieses Potential durch ökonomische Grenzen nicht voll ausschöpfbar.

Im folgenden Kapitel sollen die anlagenspezifischen Einflussfaktoren auf das Potential einer sensorischen Überwachung näher erläutert werden. Dies umfasst jene Parameter, welche innerhalb des Betriebs einer Kunststoffsortieranlage besonders relevant sind. Konkret ist der Fokus dabei auf dem Aufbauten und der Anlagenperformance. Die jeweiligen Parameter sind in weiterer Folge für die sensorische Überwachung ausschlaggebend. Teilweise sind sie auch wichtige Stellschrauben für die Optimierung einer bestehenden Kunststoffsortieranlage, welche auf Basis des Informationsgewinnes durch eine sensorische Überwachung variiert werden könnten.

Zur Beschreibung der Performance von einzelnen Aggregaten sowie der gesamten Anlage ist es einerseits relevant, wie viel in den jeweiligen Fraktionen anfällt und andererseits, wie groß der Störstoffgehalt in den jeweiligen Fraktionen ist. Eine Visualisierung eines beliebigen Sortierprozesses ist in Abbildung 14 zu sehen. Der Inputstrom wird dabei in eine Zielfraktion („Eject“, „Produkt“, oder „Wertstofffraktion“) und einen Reststrom („Reject“) geteilt.

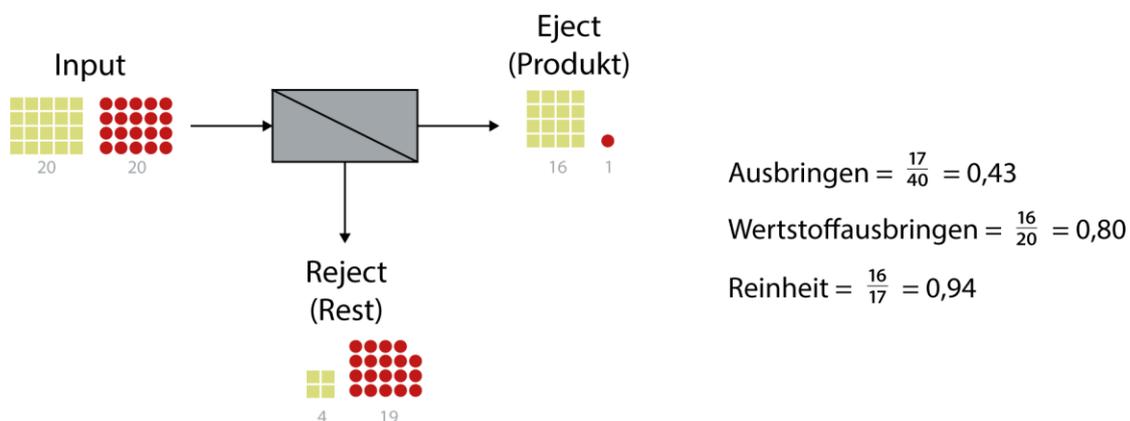


Abbildung 14: Input- und Outputströme in einer Sortierstufe inkl. Berechnung von Ausbringen, Wertstoffausbringen und Reinheit in dieser Stufe (Wertstoffe: grün, eckig, Störstoffe: rot, rund).

Zur Beurteilung der Gesamtmengen in den jeweiligen Output-Fractionen nutzt man das „Ausbringen“ (alternativ: „Ausbringung“), welches das Verhältnis zwischen der Gesamtmasse im Eject und der Gesamtmasse im Input darstellt (Vgl. Formel 5). In dem konkreten Beispiel ergibt dies ca. 43 %. Das „Wertstoffausbringen“ stellt hingegen dar, welcher Anteil der Wertstoffe (grün, eckig) im Input wie gewünscht in das Eject gelangt (Vgl. Formel 6). Im gewählten Beispiel werden 16 von 20 Wertstoffen im Eject ausgetragen, was einem Wertstoffausbringen von 80 % entspricht. Da für das stoffliche Recycling gewisse Qualitätsanforderungen gelten, ist auch der Anteil der Störstoffe (rot, rund) im Eject relevant. Die zugehörige Kennzahl heißt „Reinheit“ und wird als Verhältnis der Wertstoffe im Eject zur Gesamtmenge des Ejects angegeben. In dem Beispiel beträgt die Reinheit rund 94 %. Diese drei Kennzahlen werden üblicherweise auf Basis der jeweiligen Massen berechnet. Theoretisch ist aber auch die Angabe der Mengen in Volumina möglich (Feil et al. 2016b).

$$\text{Ausbringen} = \frac{\text{Gesamtmenge Eject}}{\text{Gesamtmenge Input}} \times 100\% \quad (5)$$

$$\text{Wertstoffausbringen} = \frac{\text{Menge Wertstoff im Eject}}{\text{Menge Wertstoff im Input}} \times 100\% \quad (6)$$

$$\text{Reinheit} = \frac{\text{Menge Wertstoff im Eject}}{\text{Gesamtmenge Eject}} \times 100\% \quad (7)$$

(Wertstoff-)Ausbringen und Reinheit können nicht unbeschränkt gleichzeitig in einem Sortierschritt optimiert werden. In der Praxis muss entschieden werden, ob der Fokus an einer großen Menge an Eject liegt oder ob das Sortierprodukt nur einen kleinen Störstoffgehalt vorweisen darf. Je nachdem werden die variablen Parameter eines Sortieraggregates gewählt, um die gewünschten Ergebnisse bestmöglich zu erzielen. Diese Wahl kann für jedes Aggregat einzeln getroffen werden, um schlussendlich Outputfraktionen der Anlage in gewünschter Menge und Qualität zu realisieren (Feil et al. 2019).

3.2.1 Anlagenaufbau

Abhängig vom implementiertem Sammelsystem, den Inputmengen und den Anforderungen bezüglich der Anzahl und Qualität der Output-Fractionen variiert die Komplexität einer Kunststoffsortieranlage. Die wichtigsten Grundoperationen sind aber in Anlagen, welche dem Stand der Technik entsprechen, ident. Die folgende Liste umfasst die wichtigsten Schritte in einer Kunststoffsortieranlage nach der Materialanlieferung:

- (1) Sacköffner zur Freilegung der Abfälle
 - (2) Störstoffabtrennung (z.B. Folienabtrennung, Abtrennung großer Eisenteile, etc.)
 - (3) Siebung (z.B. mittels Trommelsieb) zur Konditionierung des Stoffstromes
 - (4) Windsichtung zur Abtrennung von Leichtgut
 - (5) Magnetscheidung zur Abtrennung von Eisenmetallen
 - (6) Wirbelstromscheidung zur Abtrennung von Nicht-Eisenmetallen (z.B. Alu)
 - (7) Ballistische Separatoren zur Trennung von 2D- und 3D-Material
 - (8) Sensorgestützte Sortierung zur Trennung verschiedener Kunststoffarten
 - (9) Handsortierung bzw. händische Nachsortierung (z.B. zur Qualitätssicherung)
 - (10) Presse zur Verdichtung der Output-Fractionen
- (Kaiser et al. 2017, Neubauer et al. 2020, Nachhaltig in Graz 2018)

Die einzelnen Aggregate und deren wichtigste Einflussfaktoren werden in diesem Kapitel überblicksartig beschrieben. Um in weiterer Folge Einflüsse und Zusammenhänge besser beschreiben zu können, werden drei verschiedene Anlagenvarianten unterschieden:

- (1) Anlage mit geringem Automatisierungsgrad
- (2) Anlage mit mittlerem Automatisierungsgrad
- (3) Anlage mit hohem Automatisierungsgrad

Die Einteilung erfolgt nach folgenden Kriterien: In einer Anlage mit geringem Automatisierungsgrad (1) werden viele Sortierschritte mittels Handsortierung durch Sortierpersonal manuell durchgeführt. In Abbildung 15 ist beispielhaft eine Anlage visualisiert, welche einem mittleren Automatisierungsgrad (2) entspricht. Dabei werden alle relevanten Sortierschritte durch Maschinen durchgeführt, lediglich einzelne Fractionen werden händisch sortiert. Primär wird Sortierpersonal aber zur händischen Nachsortierung eingesetzt, um die Reinheit der Output-Fractionen zu erhöhen. Als Erweiterung der im Fließbild gezeigten Aggregate sind in Anlagen der Gruppe (2) auch VIS-Sortierer zur Trennung nach Farbe möglich, wobei diese in Österreich primär zur Trennung verschiedenfarbiger PET-Flaschen genutzt werden. Da dies in Ländern mit PET-Pfandflaschensystem bei Anlagen mit mittlerem Automatisierungsgrad aber üblicherweise nicht implementiert ist, wurde im Fließbild darauf verzichtet. Anlagen mit einem hohen Automatisierungsgrad (3) nutzen Handsortierung lediglich zur Nachreinigung. Sortierschritte werden außerdem häufig mehrstufig durchgeführt, um die Verluste zu reduzieren. Dadurch können hohe Durchsätze realisiert werden ohne gleichzeitige Einbußen in Bezug auf das Ausbringen.

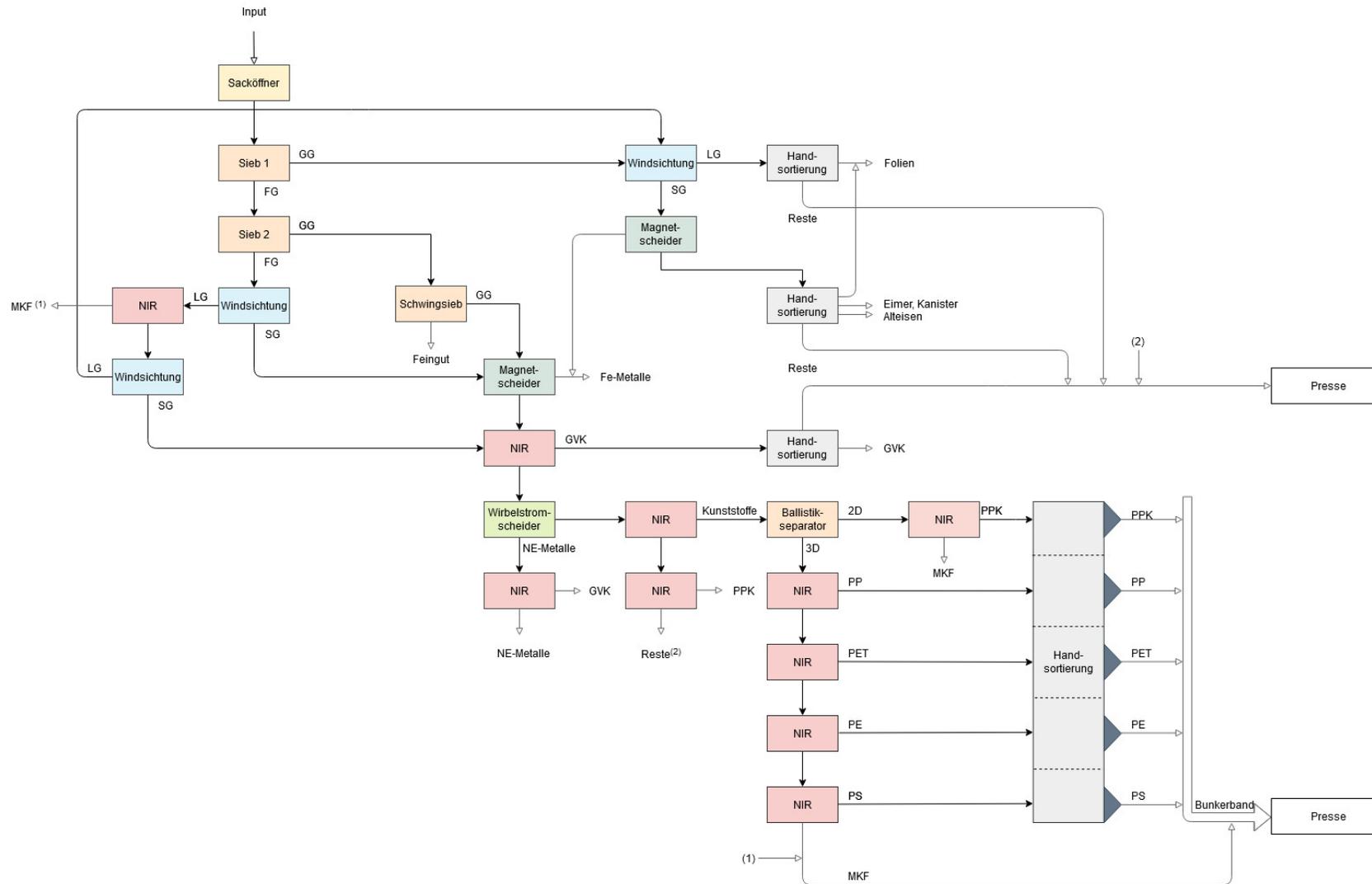


Abbildung 15: Möglicher Anlagenaufbau einer Sortieranlage mit mittlerem Automatisierungsgrad mit FG: Feingut, GG: Grobgut, LG: Leichtgut und SG: Schwergut (Erstellt auf Basis von: Umwelt- und Energiewirtschaft NÖ 2015 und Kaiser et al. 2017).

Österreich hat nach dieser Einteilung hauptsächlich Anlagen der Gruppe (1) und (2). Die Haupt-Aggregate von vier der größten Abfallsortieranlagen in Österreich sind in Abbildung 16 angeführt. Da die meisten Fraktionen durch Maschinen sortiert werden, aber dennoch Handlesebänder bzw. Sortierkabinen zur Handsortierung eingesetzt werden, können alle vier dieser Anlagen der Gruppe (2) zugeordnet werden.

Aggregat / Einrichtung / Technische Ausführung	Saubermacher Dienstleistungs AG	Brantner Sort4you GmbH	Tiroler Recycling GmbH	Energie AG
Brückenwaage	X	X	X	X
Radlader	X	X	X	X
Krangreifer	X			
Sacköffner	X	X	X	X
Trommelsieb/ Folientrommel/-splitter	X	X	X	X
Handlesebänder/ Sortierkabinen	X	X	X	X
Kreisschwingsieb / Spanwellensieb	X		X	
Windsichter			X	X
Flaschenquetsche/ Perforator	X		X	
Fe-Magnetabscheider (Überband)	X	X	X	X
NE-Abscheider	X	X		X
Ballistischer Separator	X	X	X	
Nah-Infra-Rot-Technologie	X	X	X	X
Ballenpresse	X	X	X	X

Abbildung 16: Gegenüberstellung der Ausstattung von vier Kunststoffsortieranlagen in Österreich (Neubauer et al. 2020).

Die größte dieser vier Kunststoffsortieranlagen bezogen auf den Anlageninput ist die Anlage der Saubermacher Dienstleistungs AG in der Steiermark mit rund 29.000 t im Jahr 2018 und einem Anteil an abgetrennten Zielfraktionen, also Anteil an „nicht-Sortierrest“ am Gesamt-Output, von 38,1 % (Vgl. Tabelle 5). Danach folgt die Anlage der Energie AG in Oberösterreich mit rund 24.000 t und die der Tiroler Recycling GmbH mit rund 23.000 t. Den geringsten Input der betrachteten Anlagen hat die Brantner Sort4you GmbH in Niederösterreich, welche aber eine bessere Trennleistung (35,4 %) als die beiden größeren Anlagen in Oberösterreich (33,1 %) und Tirol (31,2 %) erzielt (Neubauer et al. 2020).

Tabelle 5: Anlageninput und Anteil an abgetrennten Zielfractionen bezogen auf den Gesamt-Output im Jahr 2018 (Neubauer et al. 2020).

Anlage	Anlageninput	Anteil an abgetrennten Zielfractionen bezogen auf den Gesamt-Output
Saubermacher Dienstleistungs AG	28.820 t	38,1 %
Brantner Sort4you GmbH	18.734 t	35,4 %
Tiroler Recycling GmbH	23.404 t	31,2 %
Energie AG	24.088 t	33,1 %

Im folgenden Abschnitt wird detaillierter auf die einzelnen Anlagenbestandteile und Sortierstufen einer Sortieranlage nach Stand der Technik eingegangen. Dabei liegt der Fokus auf den Zusammenhängen zwischen verschiedenen Schritten und den Einflussparametern auf die Funktionsweise der jeweiligen Aggregate und nicht auf der tiefergehenden technischen Beschreibung der Maschinentypen und -varianten.

Materialanlieferung und Lagerung

Der Input einer Kunststoffsortieranlage wird üblicherweise mittels LKW angeliefert. Die Abfälle werden mittels Brückenwaage gewogen, entladen und in Flach- oder Tiefbunkern unterschiedlicher Größe zwischengelagert. Teilweise werden zusätzlich Containersysteme, Silos oder Bigbags für die Lagerung genutzt. Das Material kann lose vorliegen, oder zu Ballen verpresst bzw. von Säcken („Gelber Sack“) umschlossen sein (Neubauer et al. 2020).

Eine Sichtkontrolle im Zuge des Anlieferungsvorganges soll einen Mindeststandard des Anlageninputs sicherstellen. Dieser wird von einer geschulten Person durchgeführt. Auch ausführliche Inputanalysen, durch Handsortierung des Materials, finden in regelmäßigen Abständen statt. Reklamationen zum Inputmaterial sind allerdings selten. (Neubauer et al. 2020). Im Falle einer offenen Lagerung können die Materialeigenschaften durch Witterungseinflüsse beeinflusst werden. Eine relevante Größe ist dabei die Feuchte des Materials (Küppers et al. 2019).

Sacköffner

Das erste stationäre Aggregat einer Aufbereitungsanlage ist üblicherweise der sogenannte „Sacköffner“, ein spezielles Zerkleinerungsaggregat, welches mittels Radlader oder Krangreifer batchweise beschickt wird. Diese Maschine ist besonders robust gebaut, da ein schneller Verschleiß bei einem Aggregat, das nicht-vorsortiertes Material bearbeitet, ungeeignet wäre. In der Praxis sind viele verschiedene Bauformen für Sacköffner im Einsatz. Eine Möglichkeit ist eine Hammermühle. Die langsam drehende Trommel der Hammermühle

fördert das Material zu einem Gegenkamm, dessen Spaltbreite einstellbar und damit auf den Stoffstrom anpassbar ist. Säcke im Aufgabegut werden aufgerissen und das darin enthaltene Material fällt nach unten auf das Fördersystem, welches häufig als Steigband ausgeführt ist, das das grob vereinzelt Material zu weiteren Aufbereitungsschritten führt (directindustry 2021, Kranert 2018).

Eine häufig eingesetzte Alternative ist ein kontinuierlich rotierender Aufreißkamm mit anpassbarer Rotationsgeschwindigkeit. Er ist mit versetzt angeordneten Rotorsternen ausgestattet, welche jeweils acht konzentrisch angeordnete Aufreißmeißeln besitzen (Vgl. Abbildung 17). Optional sind an den Seiten zusätzlich Einschubmesser angebracht, welche eine bessere Öffnung und Entleerung von kleinen Säcken bewirken. Wie in Abbildung 18 zu sehen ist, wird der Aufreißkamm über einem Rotor mit Mitnehmern eingebaut. Der kontinuierlich asynchron laufende Rotor transportiert das Material zum Aufreißkamm und kann damit einen Durchsatz von 20 t/h generieren. (Recycling-Portal 2018, Matthiesen 2021).

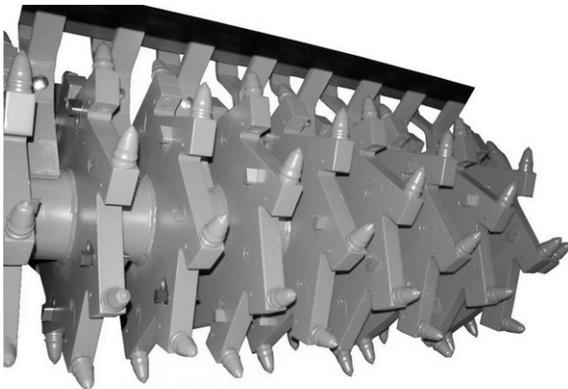


Abbildung 17: Aufreißkamm mit versetzt angeordneten Rotorsternen und acht konzentrisch angeordneten Aufreißmeißeln je Element (Recycling-Portal 2018)



Abbildung 18: Aufreißkamm in eingebautem Zustand über Rotortrommel mit Mitnehmern (Matthiesen 2021)

Eine seltene Variante ist der pneumatische Sacköffner, bei dem die Öffnung der Gelben Säcke kontaktlos mit einem Druck von etwa 5 bar ermöglicht wird (Wertstoffwende.eu 2013).

Der Sacköffner ist in jeder Variante ein Zerkleinerungsaggregat, welches zum groben Aufschluss des im Sack enthaltenen LVP-Materials dient. Dabei soll das Material aus dem Sack möglichst vollständig entfernt, aber nicht beschädigt werden. Gleichzeitig ist er im weiteren Sinne ein Dosieraggregat, da bei einer laufenden batchweisen Aufgabe ein annähernd gleichmäßiger Stoffstrom entsteht (Kranert 2018, Recycling-Portal 2018). Ist die Funktionsweise dieses Aggregates eingeschränkt (z.B. durch eine ungeeignete Spaltbreite, Verstopfung oder Verschleiß) und die Säcke werden folglich nicht ausreichend aufgerissen, funktionieren alle weiteren Sortierschritte nicht.

Störstoffabtrennung und Generieren einer geeigneten Korngrößenverteilung mittels Handsortierung und/oder Siebung

Da in einem LVP(-Metall)-Abfallgemisch eine beträchtliche Menge an Folien, aufgerissenen Säcken und anderem sogenanntem „2D-Material“, aber auch sehr sperrige Objekte, wie beispielsweise große Kunststoffkanister oder potentiell für die Anlage problematische Fehlwürfe aus anderem Material enthalten sind, ist die Konditionierung des Stoffstromes ein essenzieller Schritt für die weitere Aufbereitung. Konditionierung erfolgt insbesondere durch manuelle Störstoffentfernung in Handsortierkabinen und/oder Siebklassierung z.B. mittels Trommelsieb bzw. auch durch Aufschlusszerkleinerung. Dieser Schritt ist so wichtig, weil viele nachfolgende Prozessstufen nur in definierten Korngrößenbereichen in der erforderlichen Qualität funktionieren. Außerdem verringert sich der Energiebedarf der Anlage und der Verschleiß der Aggregate durch die Reduktion des Durchsatzes. Neben dem bereits beschriebenen „Grobgut“ muss daher auch das „Feingut“, welches aufgrund der zu geringen Korngröße nicht gut sortierbar ist, abgeschieden werden (Kranert 2018).

Durch eine geschickte Anordnung von mehreren Sieben kann dabei auch in einer stark automatisierten Anlage eine Stoffanreicherung bestimmter Materialien erfolgen. Ein Beispiel dafür sind große Kunststofffolien, welche sich im Korngrößenbereich > 220 mm anreichern. Die am häufigsten eingesetzten Siebtypen im Kunststoffverpackungsbereich sind nach Kranert (2018):

- a) Trommelsiebe (grobes und mittleres Material > 100 mm),
- b) Kreisschwingsiebe (mittleres Material $10 - 100$ mm) und
- c) Spannwellensiebe (feines Material < 10 mm).

In den folgenden Abbildungen sind die Funktionsprinzipien der Siebmaschinen skizziert. In Abbildung 20 ist ein Trommelsieb mit zwei Siebböden dargestellt. Das Feingut wird im ersten Siebboden mit dem kleineren Lochdurchmesser ausgetragen („Drawer 1“). Das mittlere Gut bewegt sich durch den zweiten Siebboden mit einem größeren Lochdurchmesser („Drawer 2“). Das Grobgut passiert beide Siebböden und gelangt zur hinteren Öffnung der Siebtrommel („Drawer 3“). Je nach Komplexität der realen Anlage werden alle drei Stoffströme oder nur einzelne Stoffströme weiter sortiert. Obwohl Trommelsiebe insbesondere für grobes Material gut geeignet sind, ist durch die Möglichkeit verschiedene Siebböden einzusetzen in der Praxis die Abscheidung von < 40 mm und > 40 mm zu Beginn der Anlagenlinie mit Trommelsieben besonders verbreitet. Dabei sollte für eine optimale Trennung der Füllgrad der Siebtrommel etwa 15 % des Trommelvolumens ausmachen (Kranert 2018, Feil et al. 2019, Pretz und Feil 2015).

Durch einen Unwuchterreger entsteht in Kreisschwingsieben (Vgl. Abbildung 19) eine kreisförmige Schwingung des Siebbodens, wodurch das Material gelockert und transportiert wird. Das Grobgut wandert als Siebüberlauf an das untere Ende des Siebbodens, während der Siebunterlauf (Feingut) den Siebboden passiert. Kreisschwingsiebe können im Bedarfsfall auch mit zwei Siebböden ausgestattet sein, wobei sich der feinere Siebboden unter jenem mit

größeren Siebdurchmesser befindet. Somit können ebenfalls bis zu drei Stoffströme entstehen (Kranert 2018).

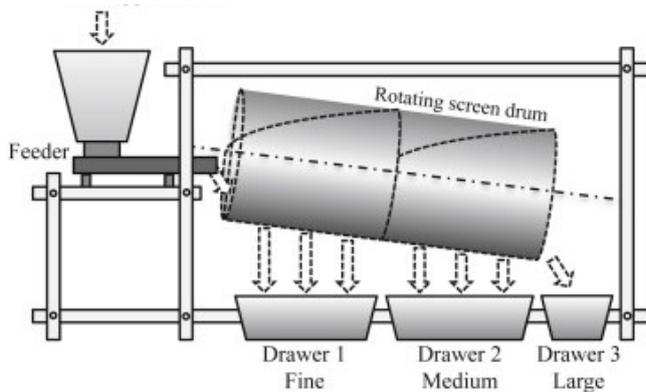


Abbildung 20: Skizze eines Trommelsiebes (Bellocq et al. 2016).

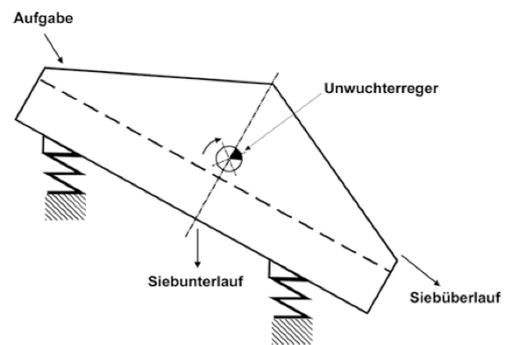


Abbildung 19: Skizze eines Kreisschwingsiebes (Kranert 2018:215).

In Abbildung 21 ist ein Spannwellensieb und dessen Funktionsprinzip dargestellt. Es ist für besonders siebschwieriges Material geeignet, welches Sieböffnungen häufig verstopft. Beispiele dafür sind feuchtes oder unregelmäßig geformtes Material im feinen Korngrößenbereich. Die elastischen Siebeläge aus Kunststoff werden abwechselnd gespannt und entspannt, wodurch das Material wie auf bei einem Trampolinsprung nach oben beschleunigt wird. Dies führt zu einer Auflockerung des Materials. Auch in diesem Fall wird das Feingut durch den Siebelag hindurch und das Grobgut an das untere Ende des Siebbodens transportiert (Kranert 2018).

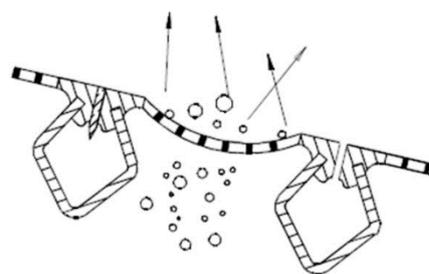
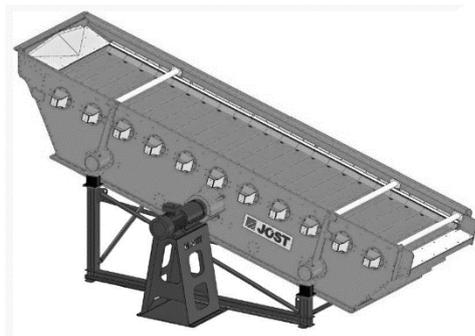


Abbildung 21: Spannwellensieb (links) und Funktionsprinzip (rechts) mit Kraftvektorpfeilen (AT-Minerals 2013).

Zur Beurteilung des Sieberfolges einer Siebstufe dient der „Siebwirkungsgrad η “. Für den realen Sieberfolg ist die „offene Siebfläche A_0 “ ausschlaggebend. Da sich elastische, eindimensionale Partikel häufig um die Stege des Siebbodens wickeln, große Folien die Siebfläche zudecken oder die Sieböffnungen verklebt werden reduziert sich im Anlagenbetrieb die offene Siebfläche. In der Folge sinkt die Wahrscheinlichkeit, dass ein Partikel das Sieb passiert und in den Siebunterlauf gelangt. Allgemein gilt: Je länger die Siebfläche ist, umso

besser ist die Siebgüte, weil die Partikel mehr Möglichkeiten haben eine Sieböffnung zu passieren. (Kranert 2018).

Folgende Material- bzw. Stoffstromeigenschaften beeinflussen nach Kranert (2018) den tatsächlichen Siebwirkungsgrad einer Siebmaschine:

- Schüttdichte
- Kornform
- Kornfestigkeit
- Größtkorn im Input
- Feuchte
- Durchsatz

In wenig automatisierten Anlagen erfolgt die Störstoffabscheidung ausschließlich durch Handsortierung, bei welcher verschiedene Zielfractionen (z.B. Folien, Kanister, etc.) manuell in verschiedene Bunker sortiert werden (Balthasar und Rehrmann 2017, DSD 2004).

2D-3D-Trennung mittels Windsichter und/oder Ballistik-Separator

Da für eine hohe Produktqualität der Stoffstrom noch weiter vorkonditioniert werden muss, werden je nach Technologisierungsgrad der Anlage zur Abscheidung von kleinerem 2D-Material und verbleibendem Feingut Windsichter und/oder Ballistik-Separatoren eingesetzt. Das Ziel ist ein Produktstrom, in dem gut sortierbares 3D-Material (z.B. Hohlkörper) verblieben ist (Kranert 2018).

Die (Wind-)Sichtung beruht auf dem Prinzip der Gleichfälligkeit, also der gleichen Endfallgeschwindigkeit von spezifisch ähnlichen Partikeln in fluiden Medien (z.B. Luft). Das Material wird dabei in einen Kanal mit unterschiedlicher Geometrie eingebracht, welcher mit einem definierten Luftstrom durchströmt ist. Leicht flugfähige Stoffe („Leichtgut“) werden mit dem Luftstrom mitgerissen, das Schwergut hingegen nicht und kann getrennt erfasst werden. (Bilitewski und Härdtle 2013, Kranert 2018). Einige Varianten sind in Abbildung 22 skizziert:

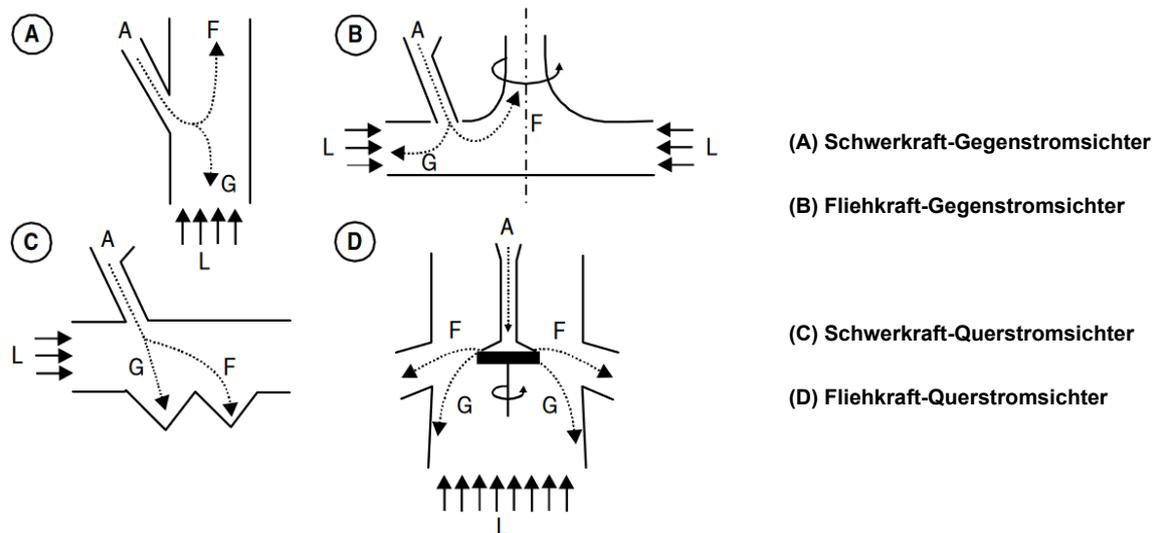


Abbildung 22: Funktionsprinzipien von Windsichtern (Schwister 2010:101).

Der in der Abfallwirtschaft am häufigsten eingesetzte Sichtertyp ist der Querstromsichter. In Abbildung 23 ist der Aufbau dargestellt. Das Material wird über ein schnelllaufendes Förderband (1) zugeführt, um das Material während des Transportes zu vereinzeln. Dies verbessert den Trennerfolg im Sichterkanal (2), welcher am Kopfende des Förderbandes installiert ist. Der Ventilator (7) erzeugt einen Luftstrom, welcher über die Einblasöffnung (8) schräg von unten in den Sichterkanal gelangt. Das Schwergut fällt nach unten und wird mittels Förderband (10, rechts) zu weiterführenden Prozessen transportiert. Das Leichtgut wird vom Luftstrom mitgerissen und gelangt über eine Rohrleitung (3) in einen Abscheider, in dem die Partikel aufgrund der geringen Luftgeschwindigkeit absinken und über die Zellradschleuse auf einen Gurtförderer (10, links) gelangen. Zellradschleusen dienen dem Partikelaustrag unter Luftabschluss und werden in verschiedenen Windsicherbautypen eingesetzt. Die im Abscheider (4) grob gereinigte Luft wird über eine weitere Rohrleitung (6) zur Saugseite des Ventilators rückgeführt. Außerdem ist der Aufbau mit einem Schlauchfilter (9) ausgestattet, in welchem etwa 30 % der umlaufenden Luftmenge entnommen und gereinigt werden, um die

- (1) Gurtförderer - schnelllaufend
- (2) Sichterkanal
- (3) Rohrleitung
- (4) Abscheider
- (5) Gerüst
- (6) Rohrleitung zur Saugseite des Ventilators
- (7) Ventilator
- (8) Einblasöffnung
- (9) Rohrleitung zu Schlauchfilter
- (10) Austraggurtförderer

Staubbelastung durch das Aggregat zu minimieren (Kranert 2018).

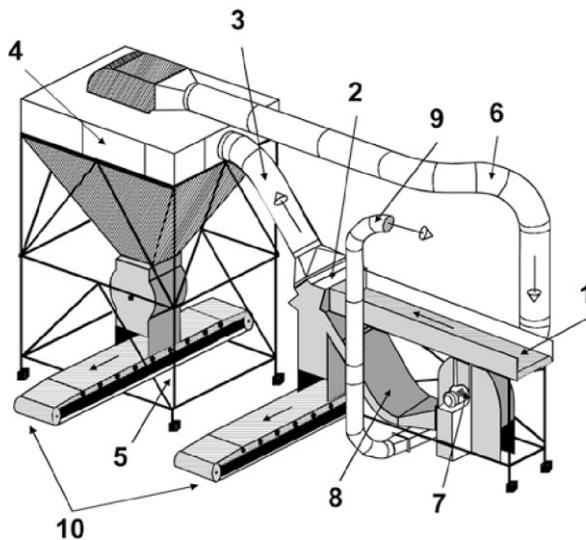


Abbildung 23: Skizze eines Querstromsichters (Kranert 2018:234).

Die wichtigsten Material- und Stoffstromeigenschaften, welche determinieren, ob ein Partikel in Leichtgut oder Schwergut transportiert wird, sind nach Bilitewski und Härdtle (2013) und Kranert (2018):

- Dichte
- Korngröße
- Kornform
- Beladung (Menge Aufgabegut pro m³ Luft)
- Feuchte
- Vorhergehende mechanische Beanspruchung
- Abfallzusammensetzung

Eine besondere Form des Sichters ist der Ballistik-Separator. In diesem Aggregat ist das Hauptmerkmal der Trennung die Kornform. Die Trennfläche des Ballistik-Separators ist ein schräger (Sieb-)Boden, welcher durch einen Kurbelmechanismus kreisförmige Bewegungen vollzieht (Vgl.

Abbildung 24). Je nach Ausführung kann der Boden mit Sieböffnungen versehen sein oder aus durchgehenden Längselementen bestehen. Das 3D-Material bekommt durch diese Bewegung zwar einen aufwärtsgerichteten Impuls, da es rollfähig ist bewegt es sich aber durch die Schwerkraft in Richtung des unteren Endes der Trennfläche und wird dort ausgetragen. 2D-Material ist nicht rollfähig und wird folglich wegen des Reibschlusses mit den Längselementen des (Sieb-)Bodens nach oben transportiert und dort ausgetragen. Feingut wird je nach Ausführungsart durch die Sieböffnungen oder durch die Spalte zwischen den Längselementen des (Sieb-)Bodens ausgetragen (Kranert 2018).

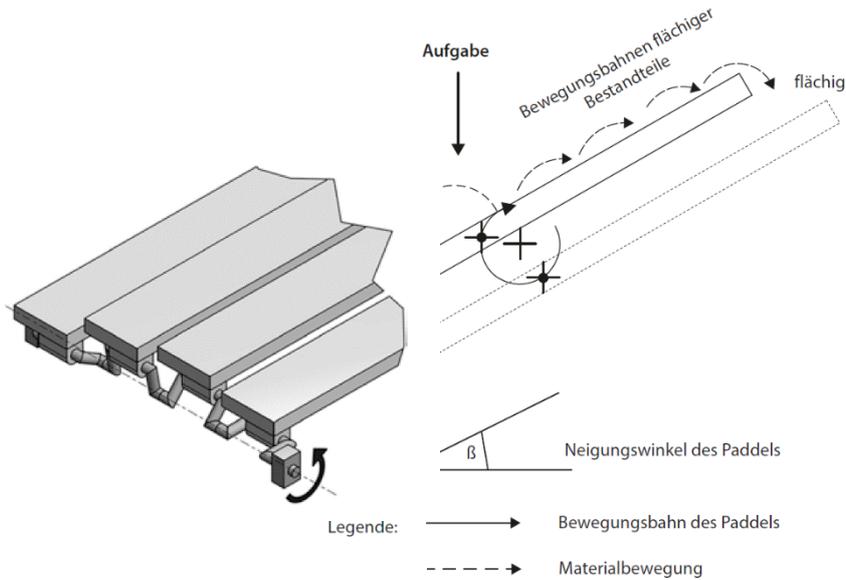


Abbildung 24:
 Funktionsprinzip eines
 Ballistik-Separators (links)
 und Aufbau des
 Siebbodens mit
 durchgehenden
 Längselementen (Kranert
 2018:237,238).

Ballistik-Separatoren eignen sich für Korngrößen ab 50 mm, da feineres Material aufgrund der Breite der Längselemente nicht gut getrennt werden kann. Sie sollten daher erst nach einer Feinkornabsiebung in einem Sortierprozess angeordnet werden. Die relevanten Material- und Stoffstromeigenschaften sind mit jenen von allgemeinen Windsichtern deckungsgleich (Kranert 2018).

Magnetscheidung

Ein weiteres wichtiges Aggregat zur mechanischen Aufbereitung von Kunststoffabfällen ist der Magnetscheider. Er dient einerseits zur Erzeugung des Eisen- und Stahlproduktes (z.B. Weißblechdosen) und soll andererseits nachfolgende Aggregate davor schützen von diesen Teilen beschädigt zu werden. Dies ist insbesondere für eine nachfolgende Wirbelstromscheidung wichtig, da feine Eisenteile zu Problemen führen (Kranert 2018, Kranert und Landwehr 2010).

Folgende Arten von Magnetscheidern sind nach Kranert (2018) zur Erzeugung der Eisenfraktion (Fe-Metalle) verbreitet:

- a) Überbandmagnete
- b) Trommelmagnetscheider
- c) Bandrollenmagnetscheider

In der Praxis werden Magnetscheider häufig als Überbandmagnet ausgeführt. Diese sind über dem Förderband angebracht und ziehen ferromagnetische Bestandteile aus dem Stoffstrom durch ein magnetisches Feld an (Vgl. Abbildung 25). Die Anziehungskraft ist dabei stark genug, um die Partikel aus dem Stoffstrom auszuheben. Sie werden je nach Ausführung parallel oder quer zur Förderrichtung durch einen Gurtförderer ausgetragen, welcher den Magneten umschließt. Das Magnetfeld wird dabei durch Elektromagnete oder Permanentmagnete erzeugt. Die Trennleistung dieses Aggregates ist gut, bei körnigem Material ist ein Eisenausbringen von 97 % bei einem Reinheitsgrad von 98 % möglich (Bilitewski und Härdtle 2013, Kranert 2018).

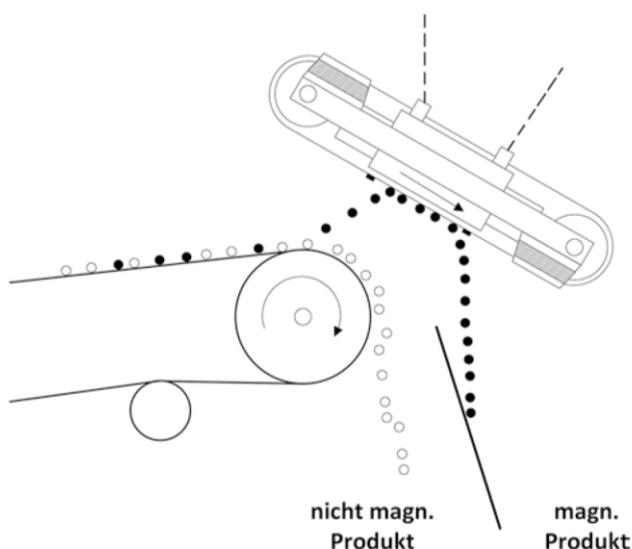


Abbildung 25: Funktionsskizze eines Überbandmagneten (Kranert 2018:227).

Sollte dennoch eine Nachreinigung erforderlich sein, werden dafür Trommelmagnetscheider (Vgl. Abbildung 26) oder Bandrollenmagnetscheider (Vgl. Abbildung 27) genutzt. In manchen Anlagen findet man diese Magnetscheider auch anstatt eines Überbandmagneten. Trommelmagnetscheider können im Gegensatz zu Überbandmagneten auch sehr kleine oder schwach magnetisierbare Teile zuverlässig austragen (Kranert 2018).

Trommelmagnetscheider sind nicht über dem Band, sondern an einem Abwurfpunkt positioniert. Der Magnet eines Bandrollenmagnetscheiders befindet sich am Ende eines Fördergurtes in dessen Inneren, wodurch diese Bauform den Vorteil hat einen besonders geringen Platzbedarf zu haben. In beiden Bauformen haften magnetisierbare Partikel an der Oberfläche, während nicht oder zu schwach magnetisierbare Teile ihrer Flugbahn folgen. Dadurch werden die beiden Fraktionen räumlich getrennt. Die Fe-Fraktion gelangt je nach Anlagenaufbau direkt in einen Sammelbehälter bzw. einer Presse oder wird über Förderbänder zu einer Nachreinigung weitertransportiert. Das nicht magnetisierbare Produkt folgt der weiteren Sortierlinie (Kranert 2018).

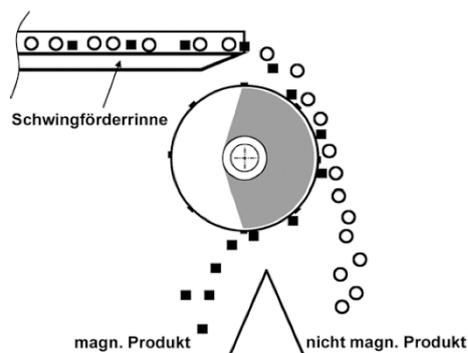


Abbildung 26: Funktionsskizze eines Bandrollenmagnetscheiders (Kranert 2018:230).

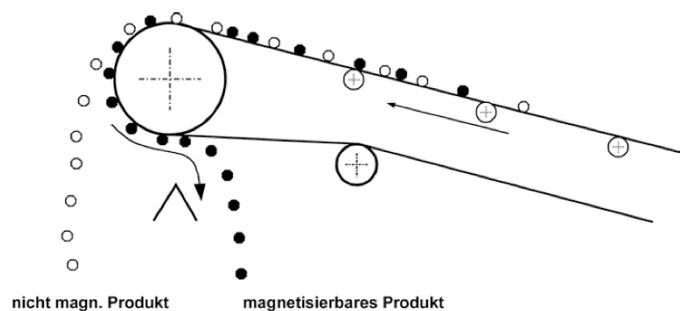


Abbildung 27: Funktionsskizze eines Trommelmagnetscheiders (Kranert 2018:229).

Das Sortierergebnis ist nach Kranert (2018) vor allem von folgenden Material- und Stoffstromeigenschaften abhängig:

- Ferromagnetische Eigenschaften
- Korngröße
- Aufschluss
- Anteil (flächige) Materialien im Stoffstrom, welche leicht mitgerissen werden können

Wirbelstromscheidung

Zur Abtrennung von Nicht-Eisen-Metallen (NE-Metallen), wie beispielsweise Aluminiumdosen, werden Wirbelstromscheider eingesetzt. Das dabei genutzte Sortierkriterium ist die elektrische Leitfähigkeit. Im Wirbelstromscheider wird durch ein sich schnell umlaufendes Polrad mit Neodym-Bor-Permanentmagneten ein elektrisches Wechselfeld erzeugt. In einem sich durch dieses Magnetfeld bewegenden elektrischer Leiter werden Wirbelströme induziert, welche gemäß der Lenz'schen Regel ein Magnetfeld erzeugen, das dem Erregerfeld entgegengerichtet ist. Durch die resultierende abstoßende Kraft werden die NE-Partikel von ihrer ursprünglichen Flugbahn abgelenkt und folglich ausgetragen. Je besser ein Partikel leitet und je geringer seine Stoffdichte ist, umso stärker ist die darauf wirkende Kraft (Bilitewski und Härdtle 2013, Kranert 2018).

Die Unterscheidung der Wirbelstromscheider erfolgt nach der Positionierung des Polrades (Kranert 2018):

- a) Exzentrische Wirbelstromscheider
- b) Konzentrische Wirbelstromscheider

In Abbildung 28 ist ein Wirbelstromscheider mit einem exzentrisch angeordneten Polrad skizziert. Wie der Name impliziert ist das Polrad dabei nicht mittig in der Kopftrommel angeordnet, sondern sitzt nicht-zentral am Oberlauf des Gurtförderers. Diese Bauform hat gegenüber der konzentrischen Variante klare Vorteile: Einerseits ist die Lage des Polrades bei der exzentrischen Variante verstellbar, wodurch der Bereich des stärksten Feldes gezielt auf den Abwurfpunkt gelenkt werden kann. Andererseits ist der Verschleiß bei dieser Bauform geringer. Bei konzentrischen Wirbelstromscheider können feine Eisenpartikel auf die Unterseite des Förderbandes („Unterdrum“) gelangen, wo sie an der Kopftrommel festgehalten werden und sich durch das auf sie wirkende Magnetfeld erhitzen. In der Folge können die Kunststofftrommel oder auch das Förderband beschädigt werden (Kranert und Landwehr 2010)

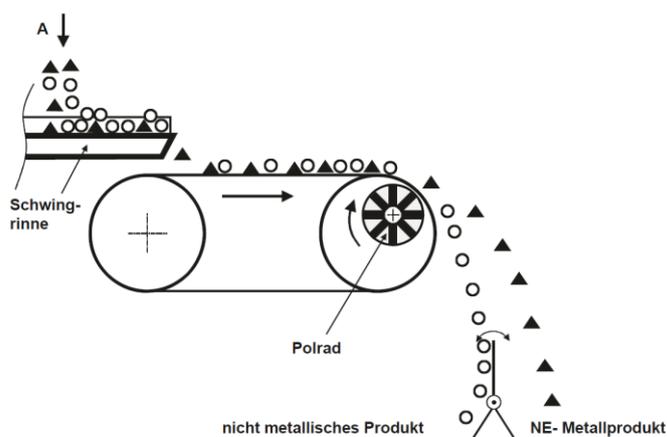


Abbildung 28: Wirbelstromscheider mit exzentrisch angeordnetem Polrad (Kranert 2018:232).

Die Trennung funktioniert nur dann gut, wenn die Korngrößenverteilung der Partikel ein Korngrößenverhältnis von Feinstkorn zu Gröbstkorn von 1:3 vorweisen. Je besser das Material vorklassiert ist, desto besser funktioniert die Trennung. Die Kornspanne sollte außerdem zwischen 1 und 150 mm liegen. Auch die Kornform ist für die Wirbelstromscheidung essenziell. Bei länglichen und flächigen Komponenten (z.B. Aluminiumfolien, Kupferdrähte, etc.) funktioniert die Trennung schlecht (Kranert 2018).

Allgemein gelten die folgenden Material- und Stoffstromeigenschaften nach Bilitewski und Härdtle (2013) und Kranert (2018) als besonders wichtig für die Wirbelstromscheidung:

- Elektrische Leitfähigkeit
- Stoffdichte
- Korngröße
- Kornform
- Korngrößenverhältnis im Stoffstrom

Zur Optimierung der Sortierergebnisse (Ausbringen und Reinheit des NE-Produktes) gibt es einige Variationsmöglichkeiten: Zunächst kann das Scheitelblech, welches zur Trennung der beiden Fraktionen dient, verstellt werden. Dadurch bestimmt der Benutzer individuell die nötige Abweichung von der unbeeinflussten Flugparabel für eine Sortierung in die NE-Fraktion. Außerdem können Gurt- und Polradgeschwindigkeit, sowie die Position des Polrades angepasst werden (Kranert 2018).

Sensorgestützte Sortierung

Bei der sensorgestützten Sortierung (SGS, engl.: “Sensor based sorting“ SBS) handelt es sich um eine Einzelkornsortierung, weshalb sie üblicherweise am Ende einer Aufbereitungslinie steht. Das besondere bei dieser Form der Sortierung ist die Entkopplung der physikalischen Trennmerkmals (z.B. Farbe) und dem Austragsmechanismus. Das bedeutet, dass Partikel nicht unmittelbar von einer Kraft, welche auf sie durch das Trennmerkmal wirkt, ausgetragen werden. Stattdessen sind Detektion, Austragsentscheidung und der tatsächliche Austrag bei SGS über einen Algorithmus verknüpft. (Kranert 2018, Robben und Wotruba 2019).

Essenziell für eine gute Trennqualität ist die Vereinzelung des Materials. Diese erfolgt durch ein geeignetes Fördermittel, wie beispielsweise einer Vibrationsförderrinne oder ein Beschleunigungsband (Vgl. Abbildung 29-I). Die Bandgeschwindigkeit liegt dabei bei rund 2,5 m/s. Anschließend wird das vereinzelte Material durch ein Sensorsystem analysiert (II). Die aufgenommenen Daten werden verarbeitet (IV) und mit dem Sortieralgorithmus abgeglichen. Entspricht ein Partikel den Sortierkriterien werden die entsprechenden Druckluftdüsen der pneumatischen Austragsleiste (III) angesteuert. Bei erfolgreichem Austrag landen die Partikel in der Positiv-Fraktion, dem „Eject“ (VI). In der Negativ-Fraktion, dem „Reject“ (V), landen im Idealfall nur jene Teile, die nicht den Sortierkriterien entsprechen (Kranert 2018, Feil et al. 2019, Uepping 2013, Balthasar und Rehrmann 2017).

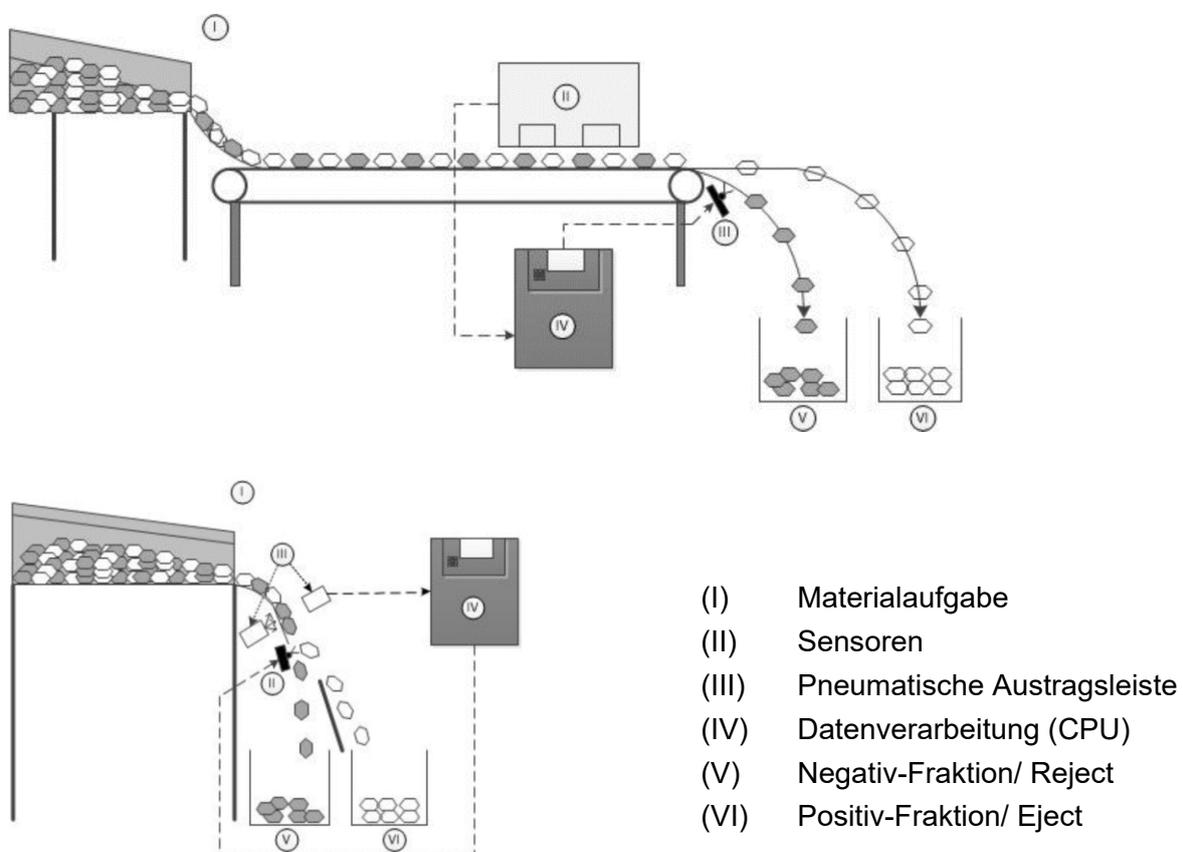


Abbildung 29: Schematischer Aufbau von Bandsortierern (oben) und Schurrensortierern (unten) (Robben und Wotruba 2019).

Neben dem pneumatischen Austrag gibt es für spezielle Anwendungen auch Roboter-Sortierung. Mit dem sogenannten „Pick and Place“-Prinzip werden die Zielfractionen von einem Roboterarm gegriffen (oder alternativ angesaugt) und in die jeweiligen Sammelbehälter bzw. auf weiterführende Förderbänder befördert. Dabei gibt es eine räumliche Trennung zwischen der Erkennung („Inspection zone“) und dem Austrag („Manipulation zone“). Die Erkennung kann dabei mittels verschiedener Sensoren durchgeführt werden (Gundupalli et al. 2020). Das Ausbringen von Robotersortierern ist allerdings deutlich geringer als jener von pneumatischen Sortierern.

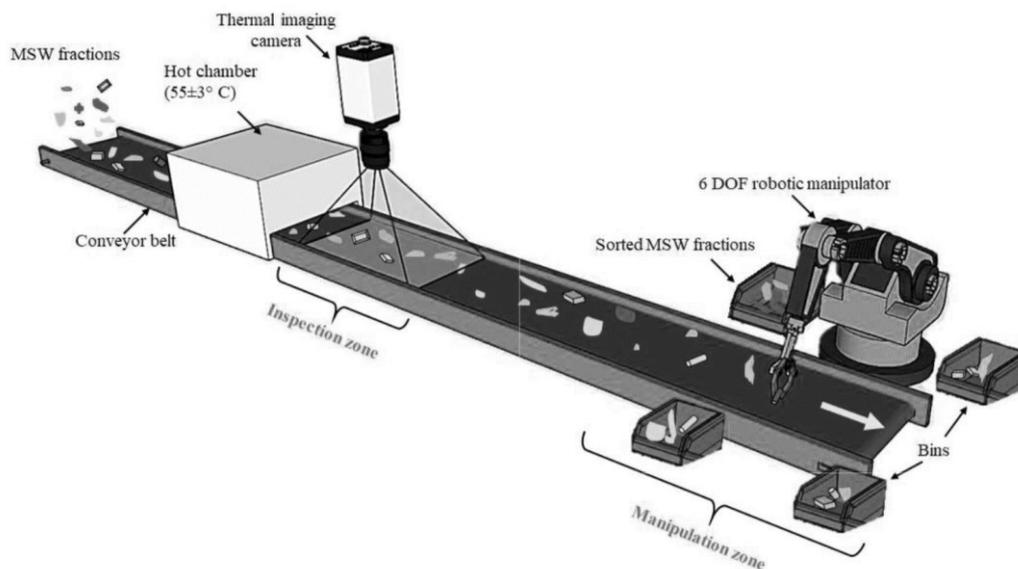


Abbildung 30: Positionierung der Robotersortierung ("Manipulation zone") nach der Materialerkennung ("Inspection zone") (Gundupalli et al. 2020).

In der Abfallwirtschaft sind viele verschiedene Sensorensysteme im Einsatz. Dabei unterscheidet sich einerseits der Sensortyp selbst und andererseits die Auswerteeinheit. Tabelle 6 gibt einen Überblick über die in der Kunststoffsortierung relevanten Sensortechnologien und die dabei genutzten Materialeigenschaften. Dabei sind jene Technologien, die aktuell noch nicht flächendeckend genutzt werden, grau hinterlegt. Außerdem ist jeweils ein Anwendungsbeispiel aus der Kunststoffverpackungssortierung angegeben. Es gibt in der Abfallwirtschaft auch noch weitere verbreitete Sensortechnologien, wie beispielsweise LIBS („Laser Induced Breakdown Spectroscopy“) oder XRF („Röntgenfluoreszenz-Spektroskopie“). Diese sind in der Kunststoffsortierung aber nicht üblich (Gundupalli et al. 2017).

Durch die Trennung von Trennmerkmal und dem Austragsmechanismus ist es bei der SGS möglich zu wählen, ob eine „Positivsortierung“ oder eine „Negativsortierung“ durchgeführt werden soll. Bei der Positivsortierung wird der Wertstoff ins Eject ausgetragen. Bei der Negativsortierung werden hingegen alle Partikel, die nicht dem Wertstoff entsprechen (anderes Material oder zu schlechte Qualität) ins Eject ausgetragen (Kranert 2018). Meist wird in der Praxis auf jene Stoffe geschossen, von welchen weniger im Input vorhanden sind.

Der Vorteil von SGS ist außerdem, dass die Detektion berührungslos funktioniert. Angepasst an die Anforderungen in einer Kunststoffsortieranlage arbeiten SGS mit sehr kurzen Messzeiten. Dies ermöglicht eine Inline-Sortierung unter hohem Materialdurchsatz, weshalb SGS in modernen Kunststoffsortieranlagen die Handsortierung weitestgehend ersetzt hat und heute Stand der Technik ist (Thomé-Kozmiensky und Goldmann 2011).

Tabelle 6: Überblick über relevante Sensortechnologien in der Kunststoffabfallsortierung, sowie die jeweils relevanten Materialeigenschaften und Anwendungsbeispiele. Grau: Noch nicht flächendeckend eingesetzte Technologien (Marthinussen 2006, Uepping 2013, Feil et al. 2019).

Sensortechnologie	Materialeigenschaft	Anwendungsbeispiel
Nahinfrarot-Spektroskopie (NIR)	Molekulare Zusammensetzung	Diverse Kunststoffverpackungen, Getränkeverbundkartons
Radar- bzw. THz-Zeilenkameras	Molekulare Zusammensetzung	Schwarze Kunststoffe
Visuelle Spektroskopie (VIS)	Farbe	Verschiedenfarbige PET-Flaschen
CMYK-Spektroskopie (Cyan, Magenta, Yellow, Black)	Farbe	Unterscheidung von 3- und 4-Farben-Druck
Farbzeilkameras (mit CCD-Sensoren)	Farbe, Form, Größe, Textur	Sortierung von opaken und transparenten Materialien
Marker-Erkennung (auch: „Tracer“)	Beliebig (Erkennung der Fluoreszenz)	Unterscheidung diverser Flaschen; schwarze Kunststoffe
3D-Lasertriangulation	Volumen	Bestimmung von Durchsatz (-schwankungen) u. Stillständen
Elektromagnetischer Sensor (Induktive Sensoren)	Elektrische Leitfähigkeit	Abtrennung von Metallen

In der LVP-Sortierung werden NIR- und VIS-Sensoren am häufigsten eingesetzt. Dennoch soll in diesem Abschnitt auch kurz auf einige andere Sensorsysteme eingegangen werden.

Mittels *elektromagnetischer (auch: „induktiver“)* Sensoren werden diverse Metalle (Fe, NE, Edelstahl), sowie Verbundstoffe mit metallischen Inhalten detektiert. Dabei reichen auch schon sehr geringe Metallgehalte aus, wodurch die Produkte einer solchen Sortierung geringere Qualitäten durch einen hohen Fremdstoffanteil haben können. Die Metallerkennung erfolgt durch eine Spulenleiste, welche unter dem Förderband positioniert ist. Metallische Partikel verursachen eine messbare Veränderung des Spulen-Feldes, wodurch bei pneumatischem Austrag die Luftdüsen im entsprechenden Bereich aktiviert werden, um die Objektaustrag zu realisieren. Die Empfindlichkeit des Sensors kann üblicherweise an den Stoffstrom angepasst werden (Kranert 2018, Uepping 2013).

Die *3D-Lasertriangulation (3D-LT)* wird in Kunststoffsortieranlagen zur kontinuierlichen quantitativen Volumenstrommessung eingesetzt. Dabei wird eine Laserlinie auf das Band geworfen. Diese wird durch das Material auf dem Förderband gebrochen und die resultierende Linie wird detektiert. Dieses Linienprofil wird durch den Auswertalgorithmus in ein Höhenprofil umgewandelt. Dieses wiederum wird nach der Kalibration (z.B. mit definierten Testzylindern) als Durchsatz (Volumen pro Zeiteinheit) ausgegeben (Feil et al. 2019).

Bei der Sortierung unter der Nutzung von *Fluoreszenzmarkern* („*Tracer Based Sorting*“ *TBS*) wird die Identifikation verschiedener Fraktionen nicht unmittelbar auf Basis der Materialeigenschaften (Farbe, Molekulare Zusammensetzung, etc.) getroffen. Eine Energiequelle (z.B. UV-Licht - Vgl. Abbildung 31) regt fluoreszierende Leuchtstoffe an. Dabei wird durch die Anregung im längeren Wellenlängenbereich eine Emission im kürzeren Wellenlängenbereich (VIS – Vgl. Abbildung 31) mit spezifischen Emissionslinien verursacht. Diese werden für die Identifikation des damit assoziierten Materials genutzt. Die Marker können entweder dem Verpackungsmaterial im Produktionsprozess zugegeben werden oder aber auf der Verpackung oder auf Etiketten appliziert werden. Diese Technologie ermöglicht theoretisch nicht nur eine Sortierung nach Material oder Farbe, sondern auch noch Spezifikation, Anwendung oder Marke. Damit könnten deutlich reinere Rezyklate erzeugt werden. Aktuell ist dies aber noch Stand der Forschung (Woidasky et al. 2020).

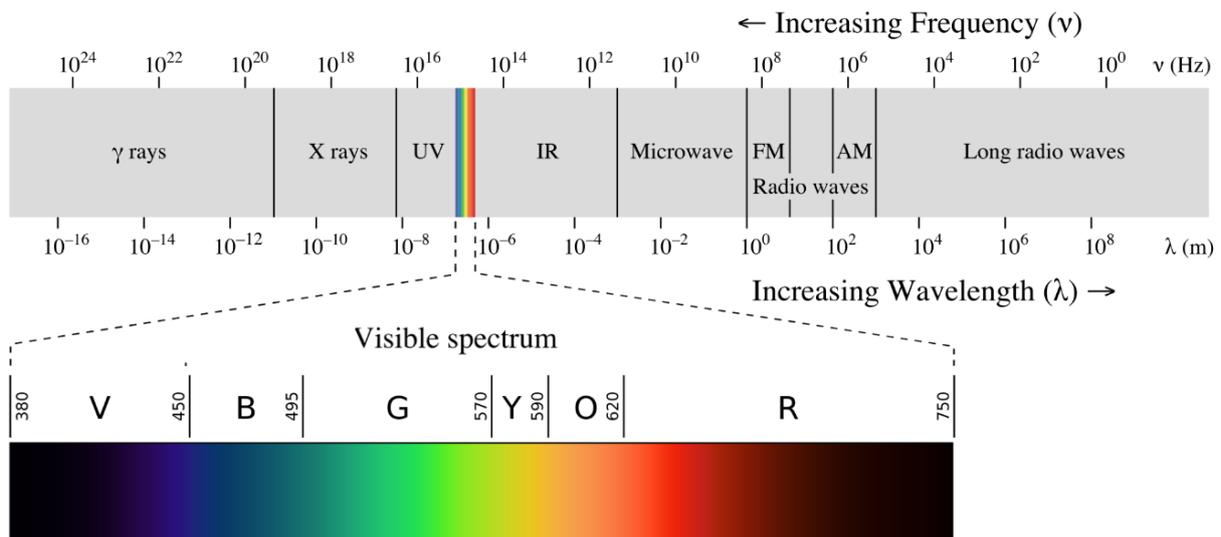


Abbildung 31: Elektromagnetisches Spektrum mit jeweiliger Wellenlänge und Frequenz (Gringer 2013).

Die häufig eingesetzten *Farbzeilenkamera-Systeme* bestehen aus CCD-Sensoren (Engl.: „Charge-Coupled Device“). Diese lichtempfindlichen elektronischen Bauteile können gleichzeitig mehrere Objekteigenschaften mit hoher räumlicher Auflösung erfassen. Dazu zählen Farbe, Form, Größe und Oberflächenstruktur. Unterschieden wird dabei zwischen Auflicht- und Durchlichtsortierung. Bei der Durchlichtsortierung wird das Licht detektiert, welches durch die Partikel durchdringt (Transmission). Dies dient beispielsweise der

Unterscheidung von transparenten und opaken Objekten. Bei der Aufsicht-Sortierung hingegen wird jenes Licht detektiert, welches von dem Partikel reflektiert bzw. zurückgestreut wird. Die Qualität der Erkennung ist von einer gleichmäßigen und stabilen Ausleuchtung abhängig. Für eine hohe Zeilenfrequenz ist außerdem eine hohe Lichtintensität nötig, um die erforderliche kurze Belichtungszeit realisieren zu können. Um diese Anforderungen zu erfüllen werden meist starke LED-Lampen genutzt, mit denen die Intensität über die Sortierbreite individuell angepasst werden kann (Uepping 2013).

Ein ähnliches Funktionsprinzip haben *VIS-Sensoren*. Auch in diesem Fall werden die Objekte mit einer Lichtquelle bestrahlt (Durchlicht oder Aufsicht). Statt lichtempfindlichen CCD-Sensoren erfolgt die Verarbeitung allerdings durch visuelle Spektrometrie. Dabei werden die spektralen Informationen, welche am Detektor erfasst werden, den Absorptionsbanden verschiedener Farben zugeordnet. Der relevante Wellenlängenbereich liegt dabei zwischen 400 und 700 nm (Vgl. Abbildung 31). Der Austrag erfolgt, wenn die Farbe des Partikels in dem für die Sortierung gewählten Bereich des Farbraums (z.B. „XYZ“, „L*u*v“) liegt. Entspricht die Partikelfarbe den hinterlegten Informationen werden die entsprechenden Partikel ausgetragen (Uepping 2013, Gringer 2013, Balthasar und Rehrmann 2017).

Sensorische Detektion und Trennung auf Basis von Spektroskopie ist auch in anderen Wellenlängenbereichen möglich. Mit angepasster Lichtquelle (Emitter) wird dabei immer die durch die Partikel modifizierte Strahlung am Detektor gemessen. Für die Materialerkennung wird üblicherweise der nahinfrarote Lichtbereich betrachtet. Für spezielle Anwendungen ist dieser Wellenlängenbereich für die Detektion allerdings nicht geeignet: Stark glänzende Oberflächen reflektieren die Strahlung direkt, wodurch keine Änderungen im Wellenspektrum entstehen und diese folglich auch nicht messbar sind. Im Gegensatz dazu wird bei schwarzen Kunststoffen durch die starke Absorption zu wenig Strahlung von dem Partikel zurückgeworfen, was die Erkennung ebenfalls verhindert (Bendel et al. 2016, Küppers et al. 2019).

Schwarze Kunststoffe waren dadurch in der Praxis bisher nicht trennbar. Die Fraunhofer Institute FHR, IOSB und IAIS haben ein neuartiges System entwickelt, welches die Erkennung und Trennung von schwarzen Kunststoffen ermöglicht. Dabei wird eine *Terahertz-Strahlung* emittiert (z.B. 90 GHz), welche zwischen infrarotem Licht und Mikrowellen liegt (Vgl. Abbildung 31). Auch bei dieser Technologie wird die, durch die Reaktion mit dem Partikel modifizierte Strahlung detektiert und mit den hinterlegten Materialinformationen abgeglichen. Je höher die Frequenz, desto präziser ist die Erkennung dieses Systems. Allerdings steigen mit der Frequenz auch die Kosten. Der Austrag erfolgt auch hier über Luftdüsen. Zusätzlich wird eine Farbkamera eingesetzt, um zusätzliche Informationen z.B. über die Objektform zu erhalten und durch die eingesetzte Machine-Learning-Technologie werden die Ergebnisse im Verlauf der Nutzungszeit besser. Dieses System ist aktuell noch nicht flächendeckend im Einsatz, hat aber großes Potential im Bereich des Recyclings von schwarzen Kunststoffen (Bendel et al. 2016).

Die am häufigsten eingesetzten SGS arbeiten mit *NIR-Sensoren*, also im nahinfraroten Bereich (ca. 800 – 3000 nm). In modernen Sortieranlagen ist es üblich 15 – 20 NIR-Sortierer einzusetzen, deshalb sollen diese im folgenden Abschnitt etwas genauer beschrieben werden. Mit NIR-Sensoren ist eine Unterscheidung der verschiedenen Kunststoffarten auf Basis der unterschiedlichen molekularen Zusammensetzung möglich. Die durch Halogen-Lampen emittierte Strahlung regt dabei die Moleküle des Partikels zu Schwingungen an, wodurch Energie im materialspezifischen Wellenlängenbereich absorbiert wird. Ein Teil der übrigen Strahlung geht durch Transmission für eine Messung verloren. Der Rest wird diffus gestreut und vom Detektor erfasst (Uepping 2013, Balthasar und Rehrmann 2017, Mehta et al. 2018).

Das zurückgeworfene Spektrum des Partikels wird mit den zuvor gespeicherten Spektren („Teach In“, „Sortierrezept“, „Sortiermodell“) in definierten Wellenlängen-Bereichen automatisch abgeglichen und einer hinterlegten Materialklasse zugeordnet. Dieser Schritt wird als „Klassifizierung“ bezeichnet (Vgl. Abbildung 32). Zur Visualisierung werden dabei sogenannte „Falschfarben“ genutzt. In Abbildung 32 wurde Material A die Falschfarbe Rot und Material B die Falschfarbe Blau zugeordnet. Diese Farben entsprechen allerdings nicht den realen Materialfarben im VIS-Bereich, sondern sind eine visuelle Hilfestellung für den Benutzer. Für die Datenverarbeitung werden komplexe Algorithmen eingesetzt, welche sich bei verschiedenen Maschinenherstellern unterscheiden. Entspricht das zurückgeworfene Spektrum den Sortierkriterien, werden die entsprechenden Düsenleisten angesteuert, um das Objekt auszutragen (Uepping 2013, Balthasar und Rehrmann 2017).

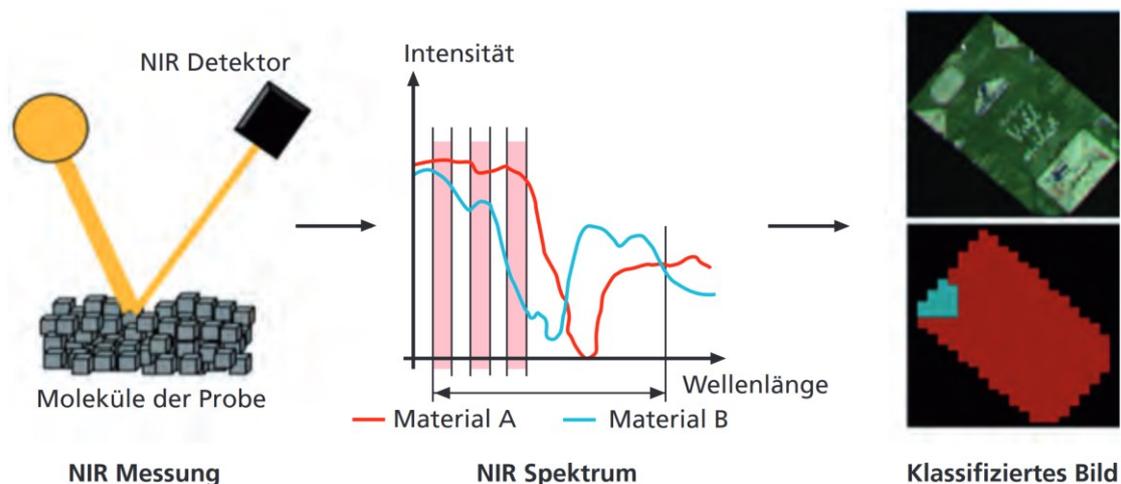


Abbildung 32: Funktionsprinzip der sensorgestützten Sortierung (SGS) am Beispiel der NIR-Messung (Uepping 2013:373).

Für eine qualitative Sortierung bei gleichzeitig hohem Durchsatz sind zwei wichtige Kriterien die räumliche und spektrale Auflösung. Die räumliche Auflösung bezieht sich dabei auf die projizierte Fläche des Objektes. Wie in Abbildung 33 dargestellt, werden bei einer hohen Auflösung die Strahlungsinformationen von deutlich mehr Punkten („Scanpoints“) für die Identifikation herangezogen als bei einer geringen räumlichen Auflösung. (Balthasar und Rehrmann 2017, Marthinussen 2006)

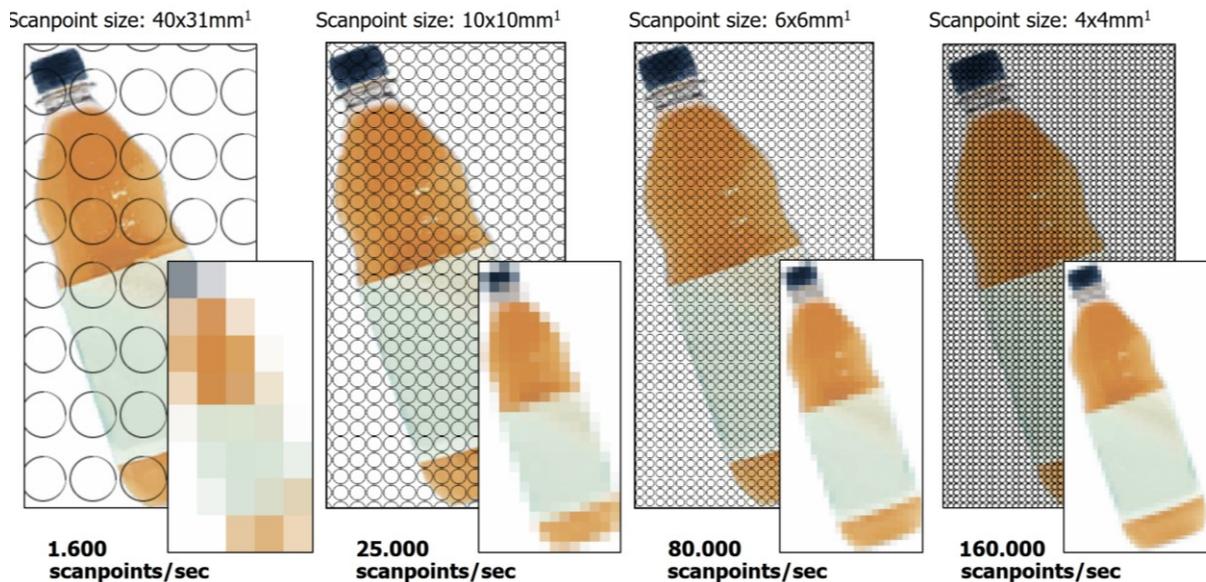


Abbildung 33: Visualisierung der räumlichen Auflösung. Links: Geringe Auflösung, Rechts: Hohe Auflösung (Marthinussen 2006:55).

Die spektrale Auflösung bezieht sich darauf, wie viele Wellenlängenbänder für die Identifikation des Materials herangezogen werden. In Abbildung 34a) ist zu sehen, dass bei einer monochromen Aufnahme nur eine einzige Wellenlänge betrachtet wird, während bei einem RGB-Bild drei ausgewählte Wellenlängen im VIS-Bereich (Blau: 435 nm, Grün: 545, Rot: 630 nm) relevant sind. Multispektrale Kameras betrachten 5 – 10 Wellenbänder (im Beispiel ebenfalls im VIS-Bereich) mit einer relativ großen Bandbreite von 70 – 400 nm. Hyperspektrale Kameras nutzen hingegen 100 – 200 Bänder mit bloß 5 – 10 nm Breite und sind somit hochauflösend im spektralen Bereich. Multispektrale und Hyperspektrale Kameras gibt es für die verschiedenen Wellenlängenbereiche (VIS, NIR, etc.). Da multispektrale Kameras deutlich günstiger sind, werden sie für Anwendungen mit geringeren Anforderungen eingesetzt (Liang 2003, Mehta et al. 2018).

Jedem Punkt des Objektes („Scanpoint“) wird im Zuge der Detektion ein Spektrum zugeordnet. Dabei können wenige Punkte mit hoher spektraler Auflösung oder viele Punkte mit einer geringen spektralen Auflösung genutzt werden. Für besonders anspruchsvolle Trennvorgänge ist sowohl eine hohe räumliche als auch eine hohe spektrale Auflösung nötig. Bei der Nutzung von Hyperspektralen Kameras entsteht dabei das sogenannte „Hyperspectral Image“, welches eine 3D-Matrix mit zwei Ortskoordinaten und einer Kanalkoordinate (Spektrale Information) ist (Handschick et al. 2012, Mehta et al. 2018).

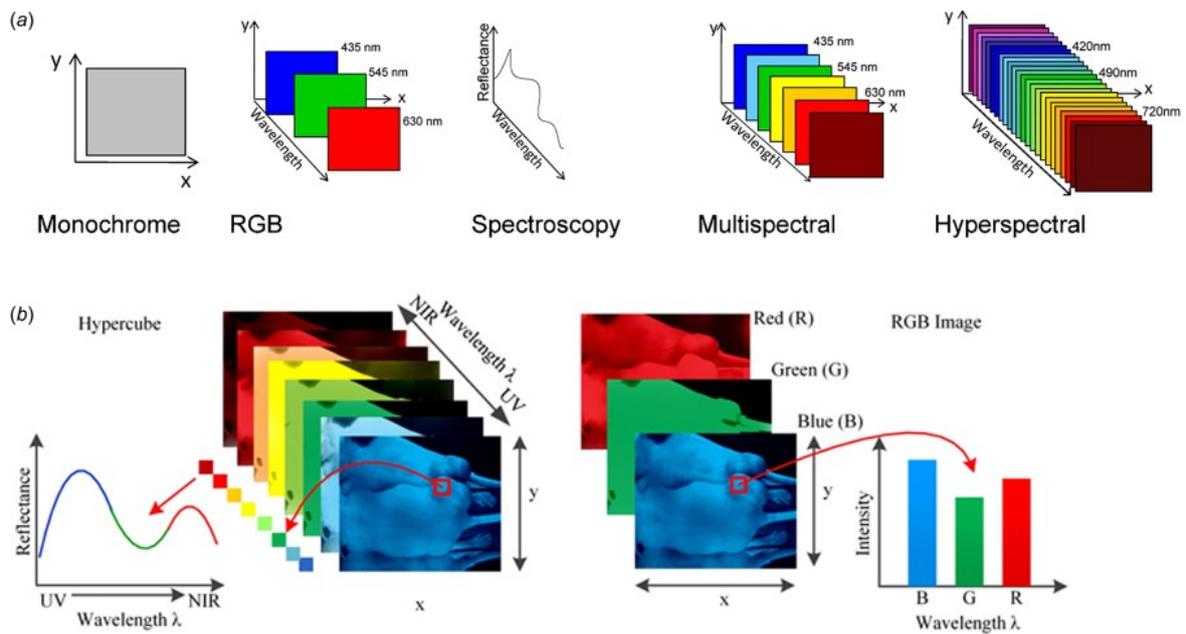


Abbildung 34: Veranschaulichung von Hyperspectral-Imaging (Mehta et al. 2018:2).

Neben dieser grundsätzlichen Unterscheidung von Sensortypen (induktiv, spektral, etc.) und der weiteren Unterteilung der spektralen Sensoren je nach Anzahl der berücksichtigten Wellenbändern, können diese auch noch nach der Art des Scan-Vorgangs eingeteilt werden.

Für den Einsatz von Hyperspektral-Imaging auf einem Förderband mit schnell bewegten Teilen ist das sogenannte „Pushbroom-Scanning“ empfohlen. Im Gegensatz zum Whiskbroom-Scanning, bei dem der einfallende Lichtstrahl über rotierende Spiegel gesteuert wird, wird dabei das komplette Spektrum einer Ortslinie mittels NIR-Sensorrays genutzt. Das Hyperspektral-Image entsteht durch Zusammenfügen mehrerer Ortslinien (Handschiek et al. 2012).

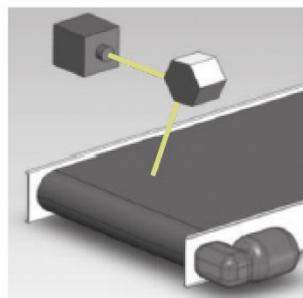


Abb. 1: Whiskbroom-Scanning

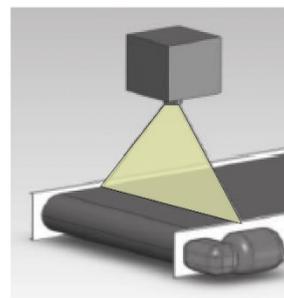


Abb. 2: Pushbroom-Scanning

Abbildung 35: Gegenüberstellung von Whiskbroom- und Pushbroom-Scanning (Erstellt auf Basis von Handschiek et al. 2012:3).

Neben Whiskbroom- und Pushbroom-Scanning gibt es außerdem „Staring“ und „Snapshot“. Snapshot-Scanning ist bloß multispektral, während die anderen Methoden für hyperspektrale Messungen geeignet sind. In Abbildung 36 sind die vier Scanning-Methoden und ihre Funktionsweisen grafisch dargestellt. Details zu deren Funktionsweise wurden von Mehta et al. (2018) aufbereitet.

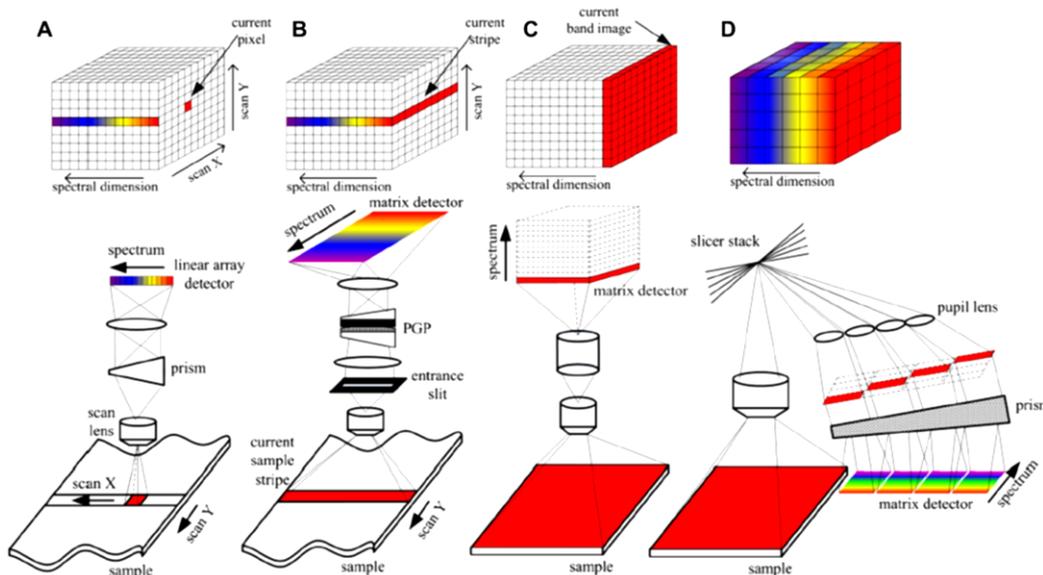


Abbildung 36: Übersicht über die verschiedenen Scanning Methoden (A) Whiskbroom (B) Pushbroom (C) Staring (D) Snapshot (Mehta et al. 2018:4).

Üblich sind heute in der Praxis „Multi-Sensoren-systeme“, mit denen verschiedene Materialeigenschaften (Form, Farbe, molekulare Zusammensetzung, etc.) zeitgleich erfasst und kombiniert für die Trennungentscheidung genutzt werden können. Kombinationen von VIS- und NIR-Sensoren sind dabei am häufigsten verbreitet. In diesen kombinierten Sensoren ist es nicht mehr nötig die VIS- und NIR-Informationen, welche häufig unterschiedliche räumliche Auflösungen haben, aufwändig zu verknüpfen. Das von dem Messpunkt („Scanpoint“) am Objekt zurückgeworfene Licht wird mittels Strahlenteiler aufgeteilt und zeitgleich auf einem VIS- und einem NIR-Detektor übermittelt. Dabei gehen etwa 15 % des einfallenden Lichtes verloren, die verbleibende Strahlung reicht aber für eine Erkennung aus (Feil et al. 2019, Balthasar und Rehrmann 2017).

SGS können in einer Anlage mit verschiedenen Funktionen eingesetzt werden. Man unterscheidet folgende drei Typen:

- a) Rougher
- b) Cleaner
- c) Scavenger

In Abbildung 37 ist beispielhaft eine Kombination dieser drei SGS-Typen in einem Fließbild dargestellt. Der „Rougher“ wird eingesetzt, um das Ausbringen im Eject zu maximieren. Er schießt also auf möglichst viele Wertstoffe (grün, eckig), wobei bewusst akzeptiert wird, dass auch Störstoffe (rot, rund) mitausgetragen werden. Um die nötige Produktqualität zu erreichen wird das Eject aus dem Rougher mit einem weiteren SGS, dem „Cleaner“ nachgereinigt. Die Reinheit im Eject des Cleaners wird dadurch deutlich erhöht. Im Reject des Cleaners sammeln sich größere Mengen an Störstoffen (Eriez 2020).

Der „Scavenger“ kann beispielsweise nach dem Rougher angeordnet sein. Seine Funktion ist es Wertstoffe, welche im Reject verloren gehen würden, in den Anlagenprozess rückzuführen. Im gezeichneten Beispiel wird das Material zum Rougher-Input zurückgeführt. Dies erhöht das Ausbringen des Gesamtprozesses, da der Sortierrest (Hier: „Rest 1“ und „Rest 2“) der Anlage reduziert wird. Gleichzeitig erhöht sich auch das Wertstoffausbringen, da Wertstoffe durch den wiederholten Sortierprozess eine erhöhte Wahrscheinlichkeit haben, in das Wertstoffprodukt sortiert zu werden (Eriez 2020).

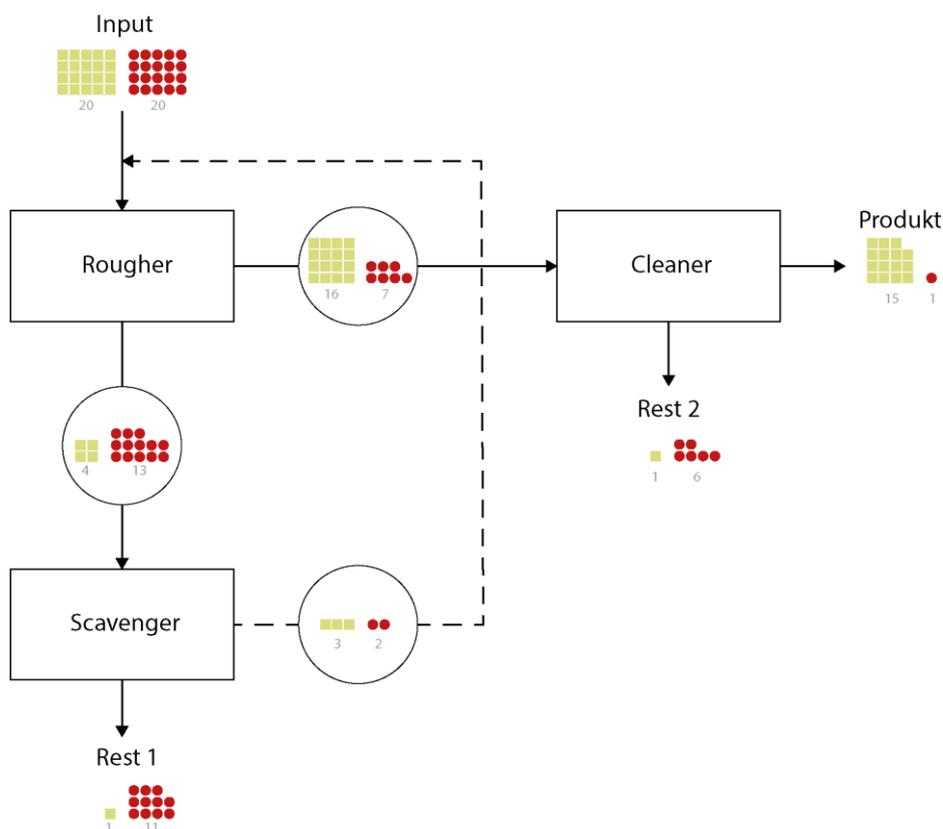


Abbildung 37: Fließbild einer SGS-Kombination mit Rougher, Scavenger und Cleaner.

In einer modernen Sortieranlage sind mehrere Rougher, Cleaner und Scavenger installiert. Die Output-Ströme dieser Maschinen können in komplexen Anordnungen kombiniert sein. Eine Möglichkeit wäre es, das Scavenger-Produkt (Eject) nicht in den Rougher-Input, sondern in ein Sortieraggregat noch früher in der Anlagenlinie zurückzuführen. Beispielsweise wäre eine Rückführung bis zum Trommelsieb für eine bessere Konditionierung des Materials möglich. Auch andere Output-Ströme werden häufig zusammengeführt. So könnte der Cleaner-Rest (Reject) zum Scavenger-Input geleitet werden, um die darin enthaltenen Wertstoffe zurückzugewinnen (Küppers 2021).

Unabhängig davon, ob es sich um einen Rougher, Cleaner oder Scavenger handelt, und davon, welche Sensortechnologie und Auswerteeinheit genutzt wird, gibt es allgemeingültige Material- und Stoffstromeigenschaften, die für eine sensorische Sortierung besonders relevant sind. Diese sind nach Kranert (2018) und Feil et al. (2019):

- Ausprägung des primäres Trennmerkmals (z.B. Farbe, elektrische Leitfähigkeit, etc.)
- Form (Flugfähige und rollfähige Partikel)
- Korngrößenverteilung
- Anteil an Material kleiner als die Mindestkorngröße (auch: Staub)
- Verunreinigung
- Aufschluss und Vereinzelung (Monoschicht)

Für ein gutes Sortierergebnis ist die vorherige Konditionierung des Stoffstromes sehr wichtig. Das Verhältnis von Größtkorn zu Kleinstkorn sollte für SBS mit pneumatischem Austrag etwa 1:3 betragen. Außerdem ist das Sortierergebnis besser, wenn besonders flugfähige Materialien, wie beispielsweise Folien < A4, vorab abgetrennt wurden. Diese können sonst beim pneumatischen Austrag der Zielfraktion mit dem Luftstrom mitgerissen werden und somit die Reinheit des Ejects verschlechtern. Besonders rollfähige Partikel führen ebenfalls zu Problemen, da sie sich auf dem Band hin und her bewegen. Folglich wird häufig die falsche Düsenleiste angesprochen und der rollfähige Wertstoff kann nicht ausgetragen werden. Außerdem kann es passieren, dass rollfähige Reststoffe zu einer Düsenleiste gelangen, welche einen Wertstoff austragen soll. Dabei wird entweder der Wertstoffaustrag gestört, was eine Reduktion des (Wertstoff-)Ausbringens bedeutet, oder die rollfähigen Reststoffe mitgerissen, was die Reinheit des Ejects verschlechtert (Kranert 2018, Feil et al. 2019).

Küppers et al. (2019) haben gezeigt, dass neben bekannten Problemen mit schwarzen und stark glänzenden Materialien auch die Oberflächenrauheit und die Feuchte des Materials die Erkennung und Sortierbarkeit beeinflusst. Beide Parameter werden, so wie auch das Korngrößenverhältnis des SGS-Inputs, durch die Gestaltung des Anlagenprozesses beeinflusst. So erhöht sich die Feuchtigkeit des Materials durch eine Lagerung im Freien und die Oberflächenrauheit wird durch die mechanische Beanspruchung in Zerkleinerungs- und Sortieraggregaten beeinflusst.

Handsortierung

Die Handsortierung (auch: „Handklaubung“) ist ebenfalls eine Einzelkornsortierung. Bei dieser ist allerdings die manuelle Tätigkeit von Sortierpersonal erforderlich. In Handsortierkabinen, also aus Sicherheitsgründen baulich abgetrennten Bereichen einer Sortieranlage, werden ausgewählte Partikel händisch abgetrennt. Der Stoffstrom bewegt sich hier deutlich langsamer als in den automatisierten Teilen der Anlage. Üblich sind etwa 0,1 – 0,2 m/s (Vgl. SGS mit 2,5 m/s), da ein schnelleres Band zu großen Verlusten an Zielfractionen der Sortierung bedeuten würde. In den Handsortierkabinen befinden sich mehrere Abwurfschächte, über die die abgetrennten Partikel in sich darunter befindlichen Sammelcontainern oder Bunkern gesammelt werden (Kranert 2018, Balthasar und Rehrmann 2017, DSD 2004).

Die Qualität der Trennung basiert auf der Kompetenz des Sortierpersonals, da dieses ausschließlich über optische Merkmale und die Kenntnis spezifischer Artikeleigenschaften zu einer Sortierentscheidung kommt. Das Ausbringen der Handsortierung ist deutlich geringer als bei der automatischen Sortierung, da eine Person im Mittel nur 1500 – 1800 Griffe pro Stunde schafft. Dies entspricht lediglich 7,5 – 300 kg/h, abhängig vom Verpackungsgewicht. Deshalb sollte das Material vor der Handsortierung nicht zerkleinert werden, da dies das Ausbringen durch die erhöhte Stückanzahl zusätzlich massiv reduziert. Bei gut geschultem Personal in ausreichender Anzahl kann allerdings eine hohe Reinheit der Produktfraktionen erzielt werden. (Kranert 2018, DSD 2004).

Materialverdichtung mittels Presse und/oder Perforator

Am Schluss der Anlagenlinie einer Sortieranlage werden Pressaggregate eingesetzt, um das Material zu komprimieren und transportfähig zu machen. Dafür wird das Material in Bunkern zwischengelagert und über Bunkerbändern materialweise der Presse zugeführt. Dabei werden nach Neubauer et al. (2020) verschiedene Designs eingesetzt:

- a) Horizontale Ballenpressen
- b) Vertikale Ballenpressen
- c) Kompaktoren

Am häufigsten werden hydraulisch angetriebene Horizontal-Ballenpressen eingesetzt. Der Pressdruck beträgt dabei bis zu 95 N/cm². Die Beschickung der Pressen erfolgt häufig mittels Kettengurtt Förderer, anschließend gelangt das Material in eine Kammer, wo es entweder durch eine Vorpresse vorkomprimiert wird oder direkt in die Hauptpresse gelangt, wo die Materialverdichtung mittels Pressstempel erfolgt (Vgl. Abbildung 38). Die Ballen werden, je nach Ausführung manuell oder vollautomatisch, mit Draht umwickelt, damit sie ihre Form während des Weitertransportes mittels LKW behalten (Neubauer et al. 2020, Strautmann-Umwelttechnik 2021, Presona 2021).

Die Größe der resultierenden Ballen sind von den Abmessungen des Presskanals abhängig. Höhe und Breite sind dadurch determiniert, die Länge kann angepasst werden. Das resultierende Ballengewicht ist von den Abmessungen und der Materialdichte abhängig und

hat daher eine hohe Schwankungsbreite (450 – 600 kg je m³ Ballen). Je nach Materialart ist durch die Nutzung von Kanalballenpressen eine Verdichtung von bis zu 90 % möglich. Dadurch ist eine maximale Auslastung der LKWs durch effiziente Beladung möglich, weshalb der Weitertransport der Outputfraktionen in weiterer Folge nicht nur komfortabler, sondern auch wirtschaftlicher ist (Strautmann-Umwelttechnik 2021, Presona 2021).

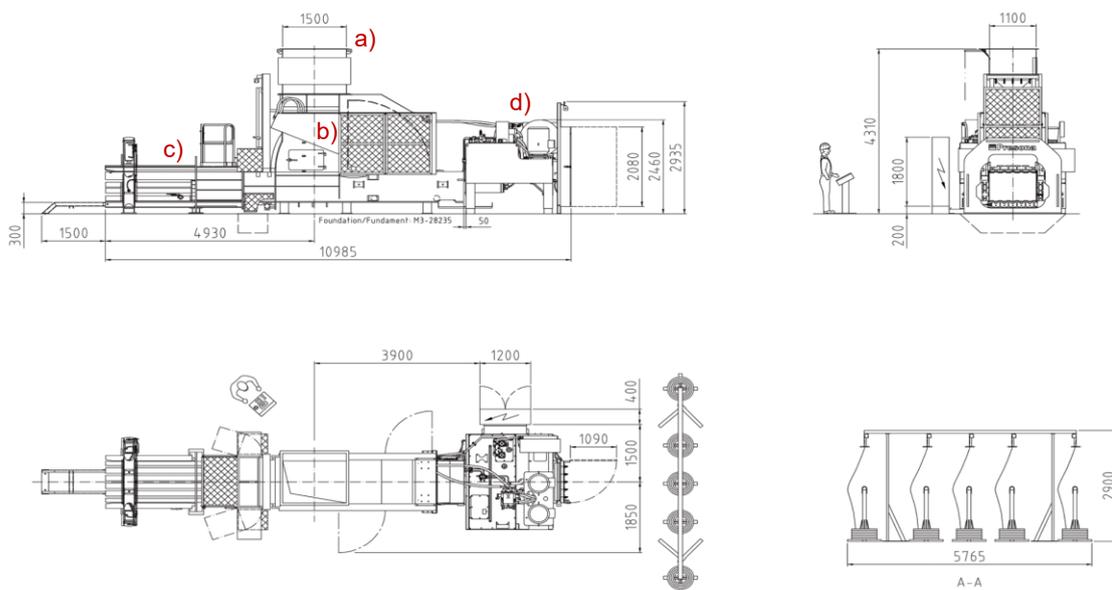


Abbildung 38: Schnittzeichnung einer Kanalballenpresse mit a) Materialaufgabe, b) Vorpressekammer c) Presskanal mit Pressstempel d) Abbindevorrichtung (Presona 2021).

Eine besondere Verdichtungseinheit sind Perforatoren. Dabei wird das Material nicht nur unter hohem Druck zusammengepresst, sondern das Material wird bewusst beschädigt, um eine Verformung zu ermöglichen. Konkret werden Kunststoffflaschen geschlitzt und gleichzeitig zusammengedrückt. Dabei wird die Restflüssigkeit aus den Flaschen größtenteils entfernt und das Material wird weniger rollfähig. Nicht alle Anlagen sind mit einem Perforator ausgestattet und wenn, ist die Positionierung unterschiedlich: Einerseits können sie vor den SGS eingesetzt werden, damit sich die Flaschen am Förderband weniger bewegen, andererseits kann er vor der Ballenpresse dazu beitragen, die Verdichtungsleistung zu erhöhen. Nach Neubauer et al. (2020) sind die beiden Bauformen:

- a) Transportwalze mit Mitnehmern und Gegenkamm mit Messerleiste
- b) Zwei gegenläufig drehende Stachelwalzen

3.2.2 Anlagenperformance

Die Optimierung der Anlagenperformance, also die Steigerung der Menge und Qualität der Wertstofffraktionen, ist das Ziel jedes Anlagenbetreibers. Sie ergibt sich als Resultat der Performance aller Verfahrensschritte einer Kunststoffsortieranlage. Moderne SGS-Maschinen erreichen ein theoretisches Ausbringen von 85 – 90 Gew.-%, dieses kann in der Praxis aber oft nicht erreicht werden. Mögliche Ursachen dafür liegen neben einem ungeeigneten Anlagenaufbau auch an einer schlechten Nutzung der Anlage. Das resultiert in einer einem zu geringen (Wertstoff-)Ausbringen und/oder zu schlechter Reinheit der Outputfraktionen (Feil et al. 2019).

Die beiden Hauptaspekte, welche die Trennleistung einer Sortierstufe (temporär) negativ beeinflussen sind Schwankungen der Inputzusammensetzung sowie des Durchsatzes (Abfallmenge je Zeiteinheit). Daher ist die Stoffstromüberwachung in Bezug auf diese beiden Faktoren besonders relevant (Küppers et al. 2020b). Ursachen und Auswirkungen von Schwankungen in den beiden Bereichen sollen im folgenden Abschnitt dargestellt werden.

Inputzusammensetzung

Die Inputzusammensetzung von Kunststoffsortieranlagen ist, auch im Vergleich zu anderen Abfallarten, sehr heterogen (Vgl. Abbildung 39). Das Material besteht aus einem Gemisch von 2D- und 3D-Material, dessen Schüttdichte (Anm.: ungleich Materialdichte) niedrig ist. Auch die durchschnittliche Stückmasse ist sehr gering und die Stückgröße ist üblicherweise < 300 mm (Kranert 2018).

Stoffsystem/ Maschinentyp	Hausmüll Gewerbe- abfall	Mineral. Abfälle	Metall- abfälle Elektro- abfälle	Alt- kabel	Kunst- stoffe, Verpa- ckungen	Holz, Grün- und Bioabfall	Papier, Papier- verbunde
Heterogenität	<i>h</i>	<i>n</i>	<i>h</i>	<i>n</i>	<i>h</i>	<i>n</i>	<i>n</i>
Schüttdichte	<i>m</i>	<i>h</i>	<i>m/h</i>	<i>h</i>	<i>n</i>	<i>m/h</i>	<i>m</i>
Stückgrößen	<i>g</i>	<i>g</i>	<i>g</i>	<i>g</i>	<i>m</i>	<i>g</i>	<i>g</i>
Stückmassen	<i>h</i>	<i>h</i>	<i>h</i>	<i>h/n</i>	<i>n</i>	<i>h</i>	<i>n</i>
Form	<i>3-,2-D</i>	<i>3-D</i>	<i>3-D</i>	<i>1-D</i>	<i>3-,2-D</i>	<i>3-D</i>	<i>2-D</i>
Festigkeit	<i>n/h</i>	<i>h</i>	<i>h</i>	<i>h</i>	<i>n</i>	<i>n/h</i>	<i>n</i>
Elastizität	<i>h</i>	<i>n</i>	<i>n</i>	<i>n</i>	<i>h</i>	<i>h</i>	<i>h</i>

Abbildung 39: Eigenschaften verschiedener Abfallarten (n: niedrig, m: mittel, h: hoch, g: groß) (Kranert 2018:191)

Forschungsergebnisse von Küppers et al. (2020c) implizieren, dass die Inputzusammensetzung eine direkte Auswirkung auf Ausbringen und Reinheit einer Sortierstufe und damit in weiterer Folge auf die Anlagenperformance hat. In Abbildung 40 ist dieser Zusammenhang dargestellt, welcher in Versuchen mit idealen Kunststoffchips (rot und weiß) systematisch ermittelt wurde. Wertstoffausbringen und Reinheit sind partikelspezifisch dargestellt, um die Ergebnisse unabhängig vom Schüttgewicht zu machen.

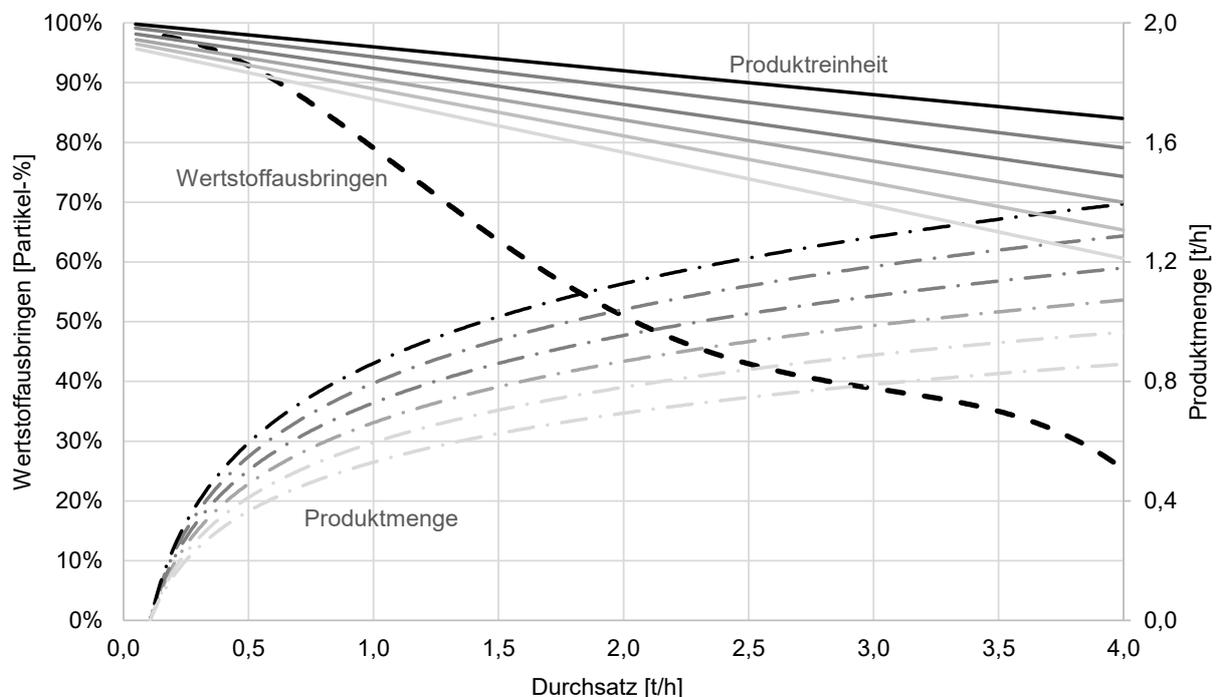


Abbildung 40: Darstellung des Zusammenhanges zwischen Inputzusammensetzung, partikelbezogenem Wertstoffausbringen und Produktreinheit, sowie Produktmenge je Zeiteinheit eines Mustergemisches in Abhängigkeit vom Durchsatz (Je dunkler die Linie, desto höher der Ejectanteil im Input) (Küppers et al. 2020c)

Die Versuche zeigten, dass die Produktmenge (Ausbringen je Zeiteinheit) mit steigendem Durchsatz die Form einer Sättigungskurve annimmt. Das Wertstoffausbringen sinkt im Gegensatz dazu mit steigendem Durchsatz, da die Trennung durch die schlechtere Vereinzelung negativ beeinflusst wird. Auch die Reinheit sinkt mit steigendem Durchsatz, da mehr Störstoffe (Reject) fälschlicherweise ins Eject ausgetragen werden. Gründe dafür sind die Überlagerung von Partikeln und der ungewollte gemeinsame Austrag von Wertstoffen und Störstoffen („Mitreißen“ durch den Luftstrom) (Küppers et al. 2020a, b, c).

Zur Validierung der Gültigkeit wurden die Versuche mit dünnwandigerem Material von geringerer Korngröße wiederholt. Dabei waren die resultierenden Kurven für Wertstoffausbringen, Reinheit und Produktmenge zwar nicht ident, die zuvor beschriebenen systematischen Effekte konnten aber erneut festgestellt werden (Küppers et al. 2020a)

Der negative Einfluss durch eine Überlastung von Sortieraggregaten (zu hoher Durchsatz) ist in der Branche grundsätzlich bekannt, wurde aber bisher nicht systematisch quantifiziert. Der

neuartige Aspekt dieser Forschungsergebnisse bezieht sich auf die Auswirkungen der Inputzusammensetzung auf die Menge und Qualität der Produktfraktion. Küppers et al. (2020a, b) zeigt unter idealen Laborbedingungen, welche um diverse Störfaktoren vermindert sind, folgende Auswirkungen von einem steigendem Wertstoffanteil im Input bei jeweils gleichem Durchsatz:

- Steigerung der resultierenden Produktmenge (Ejectmenge) und somit des Ausbringens.
- Steigerung der Produktreinheit.

In Abbildung 40 sind diese systematischen Effekte erkennbar, wenn die Linien der Produktmengen (strichliert) bzw. jene für die Produktreinheit (durchgezogen) betrachtet werden. Dabei gilt, je dunkler die Linie ist, desto höher ist der Wertstoffanteil im Input.

Bei 100 % Wertstoffanteil im Input kann es keinen Störstoffanteil im Produkt geben, was einer Reinheit von 100% entspricht. Bei 0 % Wertstoffanteil im Input ist die Reinheit zwangsläufig 0 %. Das Trennverhalten für die Inputzusammensetzungen zwischen diesen beiden Extremen galt es zu ermitteln. Der in den Versuchen mit dünnwandigem Kunststoffmaterial ermittelte Zusammenhang zwischen Wertstoffanteil (PET-Anteil in Partikel-%) im Input und der Menge an fälschlicherweise in das Eject ausgetragener Störstoffe (PO¹-Produktmenge in kg/h) ist in Abbildung 41 dargestellt.

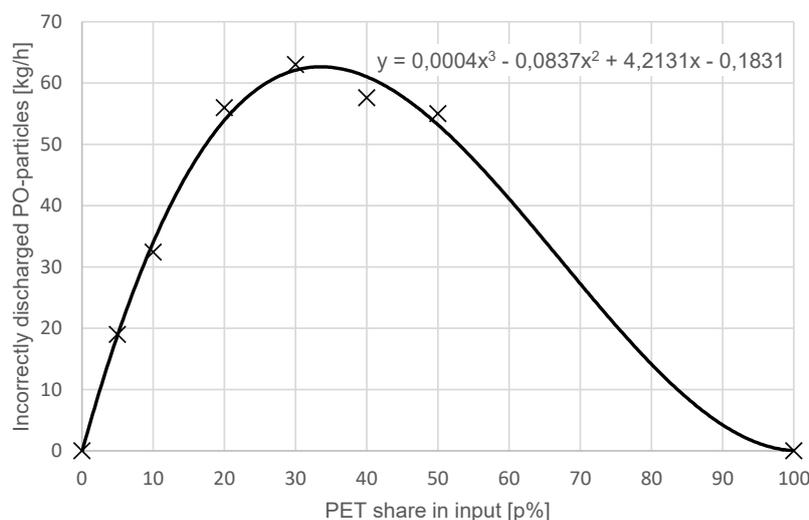


Abbildung 41: Einfluss der Inputzusammensetzung auf die Eject-Qualität dargestellt als Kurve des PO-Fehlastrages (kg/h) in Abhängigkeit vom PET-Anteil im Input (Partikel-%) (Küppers et al. 2020a).

Mit steigendem Wertstoffanteil (Hier: PET) werden bei Positivsortierung („Schießen“ auf PET) die Luftdüsen öfter angesteuert. Das bedeutet, dass die Wahrscheinlichkeit, dass ein

¹ PO ist die Abkürzung für Polyolefine und ist im Wesentlichen der Sammelbegriff für PE und PP

Störstoffpartikel (Hier: PO) mit dem Luftstrom mitgerissen wird, steigt. Sobald sich eine signifikante Menge an Wertstoff im Input befindet (Hier: ca. 33 %) wird dieser Effekt von einem anderen abgelöst: Durch den steigenden Wertstoffanteil wird die Wahrscheinlichkeit, dass ein Wertstoffpartikel von Störstoffen umgeben ist, geringer. Dadurch reduziert sich der Effekt des „mitgerissen Werdens“ stetig mit steigendem Wertstoffanteil über dem Schwellenwert (Küppers et al. 2020a).

Neben den Auswirkungen des Wertstoffanteils im Input konnte in dieser Versuchsreihe außerdem die Bedeutung des Anteils an 2D-Material für die SGS gezeigt werden. Bei einem 2D-Gehalt von 5 Partikel-% im Input ergab sich bei hohen Durchsätzen eine Reduktion des Wertstoffausbringens um bis zu 20 Partikel-% im Vergleich zu den Versuchen ohne 2D-Material. Auch die Produktreinheit ist messbar gesunken. Diese Effekte zeigen im Labormaßstab die negativen Auswirkungen auf die SGS durch eine schlechte Konditionierung des Materials. Diese kann die Folge einer schlechten Anlagenplanung (Kein oder ein schlecht dimensionierter Windsichter) oder auch von einem Aggregatausfall (z.B. defekter Windsichter) sein (Küppers et al. 2020a, b).

Die Einflussfaktoren auf die Inputzusammensetzung bei den SGS sind vielfältig. Sie ergeben sich aus dem Anlageninput (Menge je Zeiteinheit, Zusammensetzung) und der weiteren Beeinflussung im Verlauf der Sortier- bzw. Konditionierungsprozesse. Einige beispielhafte Einflussfaktoren, bezogen auf die Inputzusammensetzung, welche teilweise bereits ausführlicher in Kapitel 0 beschrieben wurden, sind:

- 1) Schwankungen des Anlageninputs (Zusammensetzung)
(Feil et al. 2019, Martens und Goldmann 2016, Küppers et al. 2020b)
 - Heterogenität des Abfalls
 - Saisonale Schwankungen
 - Unterschiedliche Sammelsysteme
 - Demografische Einflussfaktoren
- 2) Schwankungen der Siebeffizienz (Zusammensetzung Siebüberlauf bzw. -unterlauf)
(Feil et al. 2019)
 - Schwankende Korngrößenverteilung
 - Schwankende Schüttdichte von Kunststoffverpackungen
- 3) Negative Effekte auf die Funktionsweise des Windsichters
(Küppers et al. 2020a, Feil et. al 2017, Jansen et al. 2015)
 - Zu hoher 2D-Anteil
 - Ungeeignete Einstellung der Luftgeschwindigkeit

Diese Erkenntnisse zeigen die Bedeutung der Zusammensetzung des Anlageninputs als Folge des Sammelsystem, der Sammelqualitäten, etc. Insbesondere betonen sie aber auch die Wichtigkeit einer guten Funktionsweise der Konditionierungs-Aggregate (Siebe, Windsichter, Störstoffabscheider, etc.).

Durchsatz

Änderungen des Durchsatzes haben nicht nur den beschriebenen Effekt auf SGS, sondern betreffen auch die Trennleistung anderer Aggregate. Dabei ist sowohl „Underfilling“, also zu wenig Material in einem Trennaggregat, als auch „Overfilling“ (zu viel Material) ein Problem. Siebe benötigen beispielsweise eine Mindestbeladung, damit die nötige Trennleistung erreicht wird. Gleichzeitig sinkt die Trennleistung auch beim Überschreiten der idealen Füllmenge, da die Partikel nicht mehr in ausreichendem Kontakt mit der Siebfläche kommen, um diese zu passieren. Bei Trommelsieben ist die ideale Füllmenge etwa 15 % (Feil et al. 2019, Pretz und Feil 2015).

Die Ursachen für Durchsatzschwankungen (Peaks, Stillstände, etc.) sind vielfältig. Einerseits gibt es Schwankungen in der Aufgabe und andererseits können Durchsatzschwankungen auch innerhalb der Anlagenlinie durch verschiedene Aggregate entstehen (Feil et al. 2019). Einige Beispiele für Einflussfaktoren auf den Durchsatz bei einem SGS sind:

- 1) Schwankungen des Anlageninputs (Inputmenge)
(Feil et al. 2019, Martens und Goldmann 2016, Küppers et al. 2020b)
 - Saisonale Schwankungen
 - Unterschiedliche Sammelsysteme
 - Demografische Einflussfaktoren
 - Batch-weise Beschickung der Anlage mit Radladern oder Krangreifern
 - Schwankungen im Anlagenbetrieb (z.B. Pausenzeiten)
- 2) Schwankungen der Siebeffizienz (Menge Siebüberlauf bzw. -unterlauf)
(Feil et al. 2019)
 - Maschineneinstellungen des Siebes (z.B. Rotationsgeschwindigkeit)
 - Schwankende Korngrößenverteilung
 - Schwankende Schüttdichte von Kunststoffverpackungen
- 3) Negative Effekte auf die Funktionsweise des Windsichters
(Küppers et al. 2020a, Feil et. al 2017, Jansen et al. 2015)
 - Zu hoher 2D-Anteil
 - Ungeeignete Einstellung der Luftgeschwindigkeit
- 4) Negative Effekte auf die Funktionsweise eines Aufgabetrichters
(Feil et al. 2016b)
 - Überfüllung: Deformation und Verdichtung des Materials
(Änderung der Schüttdichte führt zu Änderung des Durchsatzes)

Feil et al. (2019) stellen die Hypothese auf, dass das erste Sieb einer Sortieranlage die Sortiereffizienz aller nachfolgenden Sortieraggregate determiniert. Versuche mit einem Trommelsieb, dessen Input und Siebüberlauf mittels Lasertriangulation (3D-LT) überwacht wurden, sollten diese Hypothese bekräftigen. In Abbildung 42 sind die Versuchsergebnisse eines Nachmittags dargestellt. Die Beschickung der Anlage erfolgte mittels Radlader, wobei der Radladerfahrer angewiesen wurde „Business as usual“ zu machen und nicht zu versuchen die Materialaufgabe möglichst ideal (ohne Pausen, immer gleiche Mengen) durchzuführen.

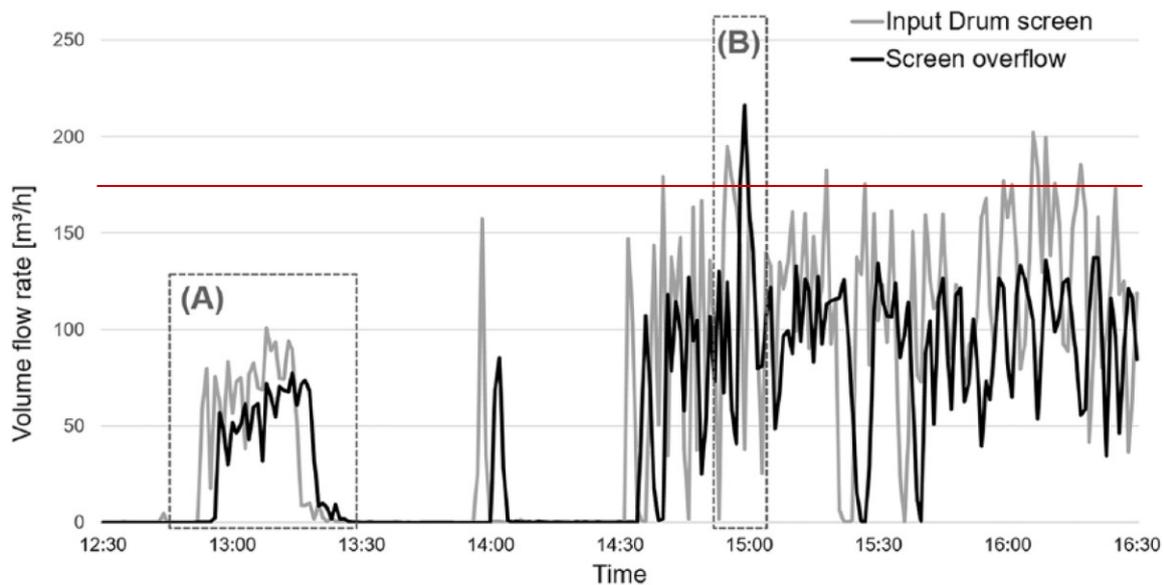


Abbildung 42: Gegenüberstellung der Volumenströme von Siebinput (grau) und Siebüberlauf (schwarz) im zeitlichen Verlauf (Feil et al. 2019).

Aus diesen Versuchen resultieren viele relevante Informationen über den realen Anlagenbetrieb. Unterbrechungen in der Materialaufgabe, beispielweise verursacht durch Pausenzeiten der Mitarbeiter_innen oder Anlagenstillstände wegen Verstopfungen, kommen regelmäßig vor. Im betrachteten Zeitraum wurde die Materialaufgabe tatsächlich nur in etwa 63 % der Zeit durchgeführt (rund 2,5 von 4 Stunden). Weiters wurde die Maximalbelastung des Trommelsiebes von 175 m³/h (Abbildung 42: Rote Linie) mehrfach überschritten. Allein im Zeitraum von 14:45 – 16:15 kam es zu fünf Überschreitungen. Daraus resultiert, dass die kontinuierliche Beschickung des Trommelsiebes in geeigneter Menge in der Praxis ein großes Optimierungspotential aufweist (Feil et al. 2019).

Darüber hinaus zeigen die Versuchsdaten, dass sich der Volumenstrom durch die Beanspruchung im Trommelsieb vergrößern kann. Punkt (A) in Abbildung 42 zeigt den Normalfall: Der Input (grau) wird um den Siebunterlauf reduziert, wodurch der Siebüberlauf mit (schwarz) mit einem verringerten Volumenstrom, zeitlich versetzt um die Verweildauer des Materials, in der Siebtrommel austritt und messbar ist. In Punkt (B) hingegen ist eine deutliche Zunahme des Materials sichtbar. Es wird angenommen, dass dies das Resultat der Vereinzelung von Agglomeraten ist, wodurch sich die Schüttdichte erhöht. Dadurch kann trotz einer idealen Aufgabemenge ein „Overfilling“ im Trommelsieb entstehen (Pretz und Feil 2015, Feil et al. 2019).

Außerdem wird aus den Versuchsdaten deutlich, dass das Trommelsieb keine ausreichende Vergleichmäßigung des Stoffstromes bewirkt. Durch den sogenannten „Push-Through“-Effekt kommt das Material annähernd gleichermaßen schubweise aus dem Aggregat, wie es aufgegeben wurde. Bei jeder Drehung gelangt, wegen des spiralförmigen Mitnehmers, ein Materialschwall aus dem Trommelsieb auf das nachfolgende Förderband (Feil et al. 2019, Curtis et al. 2020).

Folgende Kontrollvariablen werden von Feil et al. (2019) genannt, um die Trennleistung eines Trommelsiebes zu überwachen und folglich potenziell zu optimieren:

- Bandgeschwindigkeit des Förderbandes zwischen Sacköffner und Trommelsieb.
- Anpassung des Zerkleinerungsverhaltens des Sacköffners je nach Durchsatz.
- Einführung eines Ampel-Warn-Systems bei Überlastung des Trommelsiebes.

Durchsatzschwankungen wurden auch von Khodier et al. (2019) und Curtis et al. (2020) näher untersucht. Die Messungen erfolgten dabei nicht wie bei Feil et al. (2019) mittels 3D-LT, sondern mit NIR-Sensoren. Der Fokus lag vor allem auch auf der Betrachtung der Schwankungen in verschiedenen Zeitintervallen. Die Versuchsergebnisse von Curtis et al. (2020) zeigen beispielsweise, wie stark die temporären Durchsatzschwankungen vom Tagesmittelwert („Overall mean“, grün in Abbildung 43) abweichen. Dabei wird zwischen kurzfristigen, mittelfristigen und langfristigen Schwankungen unterschieden.

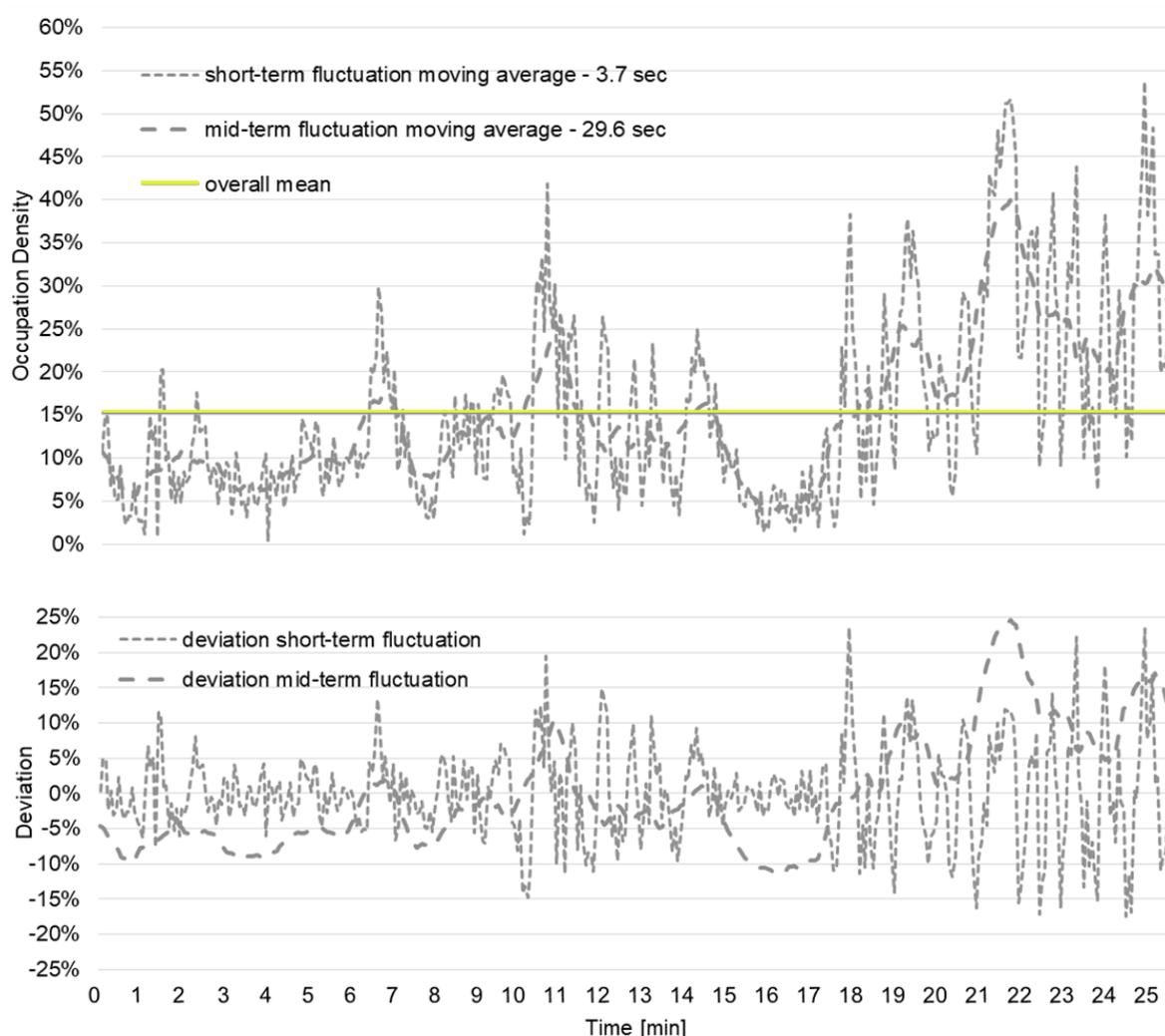


Abbildung 43: Durchsatz eines Trommelsiebes gemessen über 25 min angegeben als sensorisch erfasste Bandbelegung (oben) und der rechnerisch bestimmten Schwankungsbreite (unten) jeweils als kurzfristige und langfristige Schwankungen (Curtis et al. 2020).

Für verschiedene Aggregate der Anlage kann die Beurteilung der kurz-, mittel- und langfristigen Schwankungen sinnvoll sein. Die Überwachung der kurzfristigen Schwankungen ist beispielsweise für die Kontrolle der Funktionsweise eines Vibrationsförderers sinnvoll. Die Beurteilung wird von Curtis et al. (2020) jeweils auf Basis der Abweichung zum nächsthöheren betrachteten Zeitintervall durchgeführt.

Die Versuchsergebnisse von Curtis et al. (2020) zeigen, dass es nicht sinnvoll ist nur den mittleren Durchsatz (z.B. über eine Schicht oder einen Tag hinweg) zu betrachten. Es ist notwendig, kurzfristige Spitzen im Durchsatz („Peaks“) zu erkennen, da die Trennleistung vieler Aggregate einer Sortieranlage stark vom Durchsatz in der jeweiligen Sortierstufe abhängig ist. Durch die Kenntnis der Inputanforderungen und des generierten Outputs bezogen auf den Durchsatz in jeder Sortierstufe, können Anlagen optimiert werden. Dazu zählt die Änderung der Reihenfolge von Aggregaten, die Adaptierung von Übergabestellen von Förderbändern, oder auch die Änderung von Maschinenparametern. Das Ziel dieser Maßnahmen ist immer die Reduktion von Durchsatzschwankungen und das Sicherstellen der ausreichenden Vereinzelnung der Partikel am Förderband. Die Anlagenperformance erhöht sich in der Folge, da es zu weniger Stillständen durch Überfüllung, sowie weniger Verlusten in jeder Sortierstufe kommt (Küppers et al. 2020b).

4 Beurteilung der Implementierungsmöglichkeiten der Anlagenüberwachung

Die Möglichkeiten eine Anlagenüberwachung zu installieren sind vielfältig. Auf Basis der Literaturrecherche und von Erkenntnissen aus Anlagenbesichtigungen und der Erfahrung im Bereich sensorgestützter Sortierung, werden im folgenden Abschnitt einige Varianten dargestellt. Dafür wird zuerst auf geeignete Sensortechnologien eingegangen, um danach anhand einiger konkreter Positionen in einer Kunststoffsortieranlage abzuleiten, welche Informationen jeweils gewonnen werden können und welchen Nutzen diese durch geeignete Datenauswertung bringen können. Dabei ist stets zu berücksichtigen, welchen Einfluss die Sammelsysteme im Einzugsgebiet und der Anlagenaufbau auf die Implementierung in einer spezifischen Kunststoffsortieranlage haben.

4.1 Geeignete Sensorsysteme

Zur sensorischen Stoffstromüberwachung in Kunststoffsortieranlagen eignen sich ausschließlich jene Sensortechnologien, welche zur in-line Überwachung eingesetzt werden können. Für eine off-line Untersuchung einer entnommenen Probe ist der Stoffstrom zu inhomogen und die Materialverarbeitung und dessen Transport in der Anlage zu schnell. Für eine in-line Überwachung ist eine kontaktlose Bestimmung der relevanten Materialparameter erforderlich, welche den Stoffstrom nicht manipulieren. In Tabelle 7 sind Sensortechnologien angeführt, welche für eine Stoffstromüberwachung im Kunststoffsortieranlagen geeignet sind. Dabei ist anzumerken, dass auch andere Technologien genutzt werden können, wenn die Datenerhebung und -verarbeitung ausreichend schnell erfolgt und der Informationsgewinn wirtschaftlich interessant ist.

Tabelle 7: Mögliche Messgrößen verschiedener in-line Stoffstromüberwachungstechnologien in Kunststoffsortieranlagen ✓: geeignet, (✓): bedingt geeignet, (x): unter Laborbedingungen bedingt geeignet, x: nicht geeignet.

Technologie	Materialart	Farbe	Metalle	Durchsatz bzw. Bandbelegung	Korngröße
NIR	✓	(x)	(x)	(✓)	(✓)
VIS	x	✓	(x)	(✓)	(✓)
Tracer/Marker	✓	✓	✓	(x/✓)	x
3D-LT	x	x	x	✓	✓
Induktion	x	x	✓	(x)	x

In Tabelle 7 ist zu sehen, dass manche Sensortechnologien ein breites Einsatzgebiet haben, während andere für spezifische Problemstellungen nutzbar sind. Nachfolgend werden die Vor- und Nachteile der Nutzung der Sensorvarianten zur Bestimmung verschiedener Parameter dargestellt.

4.1.1 NIR- und VIS-Sensoren

NIR-Sensoren werden zwar primär zur Detektion der Materialart (z.B. PET, PE, Karton, etc.) eingesetzt, bei geeigneter Konfigurierung können aber auch andere Informationen gemessen werden. So können unter idealen Bedingungen verschiedene Farben anhand ihrer Additive unterschieden werden oder schwarze Materialien an der geringen zurückgestreuten Intensität erkannt werden. Metalle hingegen reflektieren oft durch die glänzende Oberfläche sehr viel Strahlung, wodurch sich das detektierte Spektrum in Form und Intensität von Kunststoffen unterscheidet. Bei einer starken Verschmutzung des Materials oder staubbelasteter Luft ist die Messung dieser Parameter aber sehr ungenau oder nicht möglich.

Auch bei VIS-Sensoren ist eine indirekte Metallerkennung theoretisch möglich, da Metalle besonders stark glänzen und sich farblich von Kunststoffen meist unterscheiden. Da aber einerseits Metalle von Banderolen umhüllt sein können (Vgl. Lebensmittelkonserven) oder allgemein verschmutzt vorliegen, ist auch diese Messung in der Praxis ungenau oder nicht möglich.

Weiters können NIR- und VIS-Sensoren genutzt werden, um Aussagen über die Menge und Korngrößenverteilung des Stoffstromes zu machen. Dafür wird nicht die Material- bzw. Farberkennung ausgewertet, sondern die detektierten Pixel Material je Zeiteinheit. Bei einer geringen Bandbelegung (Vgl. Abbildung 44 – linkes Bild) kann die Korngrößenverteilung im Stoffstrom abgeschätzt werden, indem die Pixel je zusammenhängenden Pixelcluster, also die Pixel je Objekt im Falschfarbenbild, gezählt werden. Diese ergeben über die Umrechnung zwischen Pixelgröße im Falschfarbenbild und realer Größe am Band die projizierte Fläche je Objekt. Kleine Objekte haben im Durchschnitt eine kleinere projizierte Fläche als große Objekte, wodurch beispielsweise der Feinanteil im Stoffstrom gemessen werden kann.

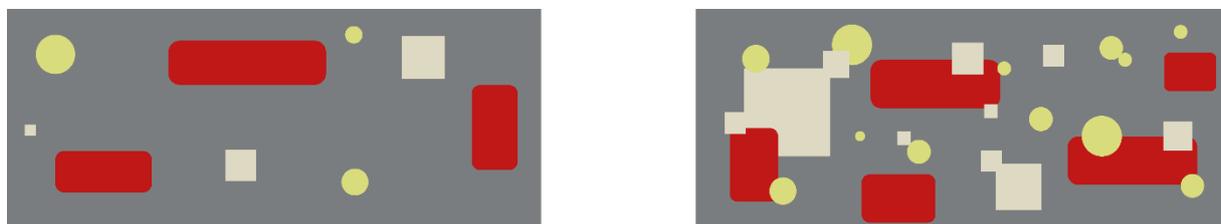


Abbildung 44: Falschfarbenbild mit geringer Bandbelegung (links) und höherer Bandbelegung (rechts); Förderband: schwarz, Objekte: beige, grün, rot.

Ähnlich funktioniert die Messung der Bandbelegung bzw. des Durchsatzes mittels NIR- oder VIS-Sensoren. Dabei werden nicht die Pixel je Pixelcluster (Objekt) gezählt, sondern die Objektpixel ins Verhältnis zu den Hintergrundpixeln (Förderband) gesetzt. Bei einem hohen

Durchsatz ist ein größerer Anteil des Bandes belegt als bei einem sehr geringen Durchsatz. Dabei wird allerdings nur die projizierte Fläche der Objekte betrachtet und nicht wie bei 3D-LT das eingenommene Raumvolumen. Für viele Anwendungen reicht diese ungenauere Abschätzung des Durchsatzes bzw. der Bandbelegung aber aus. Der Vorteil dabei ist, dass diese Informationen zusätzlich zu den NIR- bzw. VIS-Daten aufgenommen werden und kein zusätzlicher Sensor erforderlich ist.

4.1.2 Tracer-/ Marker-Erkennung

Der Vorteil der Stoffstromüberwachung mittels Tracer/ Marker ist die Möglichkeit Informationen über das Produkt, welche über die mit herkömmlichen Sensoren messbaren Daten hinausgehen, zu detektieren. Beispielsweise können Materialien, die für ein Recycling im Lebensmittelsektor geeignet sind, mit einem Marker versehen werden und so trotz gleichem NIR-Signal von einem (annähernd) stoffgleichen „non food“-Kunststoffobjekt unterschieden werden. Außerdem können Tracer/ Marker auch bei allen Objekten eingesetzt werden, die für VIS- oder NIR-Sensoren problematisch sind. Beispiele dafür sind schwarze Kunststoffe, stark glänzende Objekte, oder Materialien, welche im NIR-Bereich kein verwertbares Spektrum haben.

Der Nachteil ist, dass nicht mit einem Tracer/Marker versehene Objekte nicht detektiert werden. Eine vollständige Erfassung des Stoffstromes ist daher nicht möglich, da es unrealistisch ist, dass in Zukunft alle Kunststoffprodukte (Verpackungen und nicht-Verpackungen) mit Tracern/ Markern versehen sein werden. Außerdem sind Tracer/Marker oft nur in einem Teil des Objektes vorhanden (z.B. Label) wodurch die Messung von Korngrößenverteilung oder Bandbelegung durch reine Tracer/ Marker-Detektoren nicht sinnvoll möglich ist. Der Einsatz dieser Sensoren ist also nur für Spezialanwendungen sinnvoll, beispielweise, um die Menge an lebensmitteltauglichen Kunststoffverpackungen im Stoffstrom an einem Punkt der Anlage zu überwachen.

4.1.3 Spezifische Sensoren: 3D-LT, Induktionssensoren

Sind konkrete Informationen über einen Stoffstrom im Bezug auf Bandbelegung, Durchsatz, oder Korngrößenverteilung relevant, so ist der Einsatz von 3D-LT sinnvoll, da die Ergebnisse, im Gegensatz zu jenen aus VIS- oder NIR-Sensoren, belastbar sind. Gleiches gilt für die Messung von Metallen durch Induktionssensoren, wobei üblicherweise nur eine qualitative und keine quantitative Aussage über die Metallmenge je Zeiteinheit am Messpunkt getroffen werden kann. Das bedeutet, dass nur detektiert wird, ob ein induktives Objekt am Band ist und wie viele Spulen von der Änderung des Magnetfeldes betroffen sind, nicht aber wie groß das Objekt tatsächlich ist. Der Nachteil von diesen spezifischen Sensoren ist, dass Informationen über die Materialzusammensetzung des gesamten Stoffstromes am Messpunkt mittels NIR-Sensor oft dennoch nötig sind, wodurch sich die Frage stellt, ob der Mehrwert der zusätzlich gewonnenen Informationen wirtschaftlich rentabel ist.

4.1.4 Kosten von sensorischen Überwachungssystemen

Die Online-Befragung von Sensorherstellern und Anlagenbauern, welche aus marktwirtschaftlichen Gründen nicht genannt werden wollen, ergaben die in Tabelle 8 angeführten Gesamtkosten für die Implementierung einer sensorischen Überwachung ohne Verrechnung der Montagekosten:

Tabelle 8: Geschätzte Kosten für die sensorische Stoffstromüberwachung in Kunststoffsortieranlagen inklusive Beleuchtung, Recheneinheit, Auswertesoftware und Montagevorrichtung (Anonym 2021)

Technologie	Kostenbereich
NIR	100.000 – 200.000 €
VIS	50.000 – 70.000 €
Tracer/Marker	55.000 – 75.000 €
3D-LT	10.000 – 30.000 €
Induktion	8.000 – 20.000 €

Die tatsächlichen Kosten sind von diversen Faktoren abhängig, wie der Förderbandbreite, der erforderlichen örtlichen und spektralen Auflösung, dem erforderlichen Wellenlängenbereich, der Art der Lampen und der erforderlichen Genauigkeit der Ergebnisse (Anonym 2021). Die tatsächlichen Kosten können daher im Anwendungsfall auch deutlich höher oder geringer als die in dieser Tabelle angegebenen Werte sein. Die Kosten für die Implementierung eines solchen Sensorsystems müssen gegenübergestellt werden mit den wirtschaftlichen Vorteilen der durch die Nutzung entstehenden Daten. Laufende Kosten entstehen lediglich durch den Energieverbrauch, sowie durch Wartungskosten und haben somit eine eher untergeordnete Bedeutung in der Betrachtung der Wirtschaftlichkeit.

Aufgrund der hohen Kosten von Stoffstromüberwachungssystemen wird deutlich, dass nicht beliebig viele sensorische Überwachungseinheiten in einer Kunststoffsortieranlage verbaut werden können. NIR-Sensorsysteme sind dabei im Durchschnitt um den Faktor 2,0 – 2,9 teurer als VIS-Systeme. Tracer/Marker-Detektion ist im Schnitt durch die teureren Lampen im UV-Bereich etwas teurer als klassische Farbsortierung. Am günstigsten sind die spezifischen Sensoren (3D-LT, Induktion), welche im Gegensatz zu NIR eine Kostenreduktion um bis zu Faktor 12,5 bedeuten können bei gleichzeitig eingeschränkterem Nutzungsspektrum der Analysedaten (Vgl. Kapitel 4.1.3).

4.2 Mögliche Positionen und resultierende Erkenntnisse

Die Sensorsysteme können an verschiedenen Positionen in der Anlage genutzt werden. Dabei ist die Auswahl der Position für die Nutzungsmöglichkeiten der Daten ausschlaggebend, weshalb diese in der Planungsphase eines Stoffstromüberwachungssystems ausführlich betrachtet werden sollte. Die folgenden Möglichkeiten zur Positionierung von Sensoren und die Beschreibung der resultierenden Erkenntnisse aus den Sensordaten je Position sind auf Kunststoffsortieranlagen bezogen. Es kann davon ausgegangen werden, dass die zugrundeliegenden Systematiken auch auf andere Stoffströme übertragen werden können.

Alle im folgenden Abschnitt beschriebenen Varianten sind in-line Messungen. Das heißt, dass die Sensoren über oder unter einem Förderband montiert sind, welches zwei Aggregate verbindet. By-Pass-Lösungen sind zwar theoretisch möglich und für spezielle Anwendungen eventuell nötig, Informationen über die Materialzusammensetzung, den Durchsatz oder die Verteilung des Materials am Band des Hauptstromes gehen dabei aber verloren. Da der wirtschaftliche Vorteil durch sensorische Überwachung in der Abfallbehandlung ohnehin nicht an allen Stellen gegeben ist, liegt der Fokus dieser Arbeit auf jenen Varianten, bei welchen das Nutzungspotential am höchsten eingeschätzt wird. By-Pass-Lösungen werden daher nicht näher betrachtet. Die Positionen sind im Anlagenfließbild in Abbildung 45 eingezeichnet.

Position 1

Wie bereits in Kapitel 3.2.2 ausführlich beschrieben, hat der Durchsatz eine Auswirkung auf alle Aggregate einer (Kunststoff-)Sortieranlage. Insbesondere sensorgestützte Sortierer benötigen eine gute Vereinzlung des Materials. Daher ist das Optimierungspotential durch eine Überwachung der Materialaufgabe besonders hoch. Wie in Tabelle 9 dargestellt, eignet sich zu Stoffstromüberwachung an dieser Stelle primär 3D-LT. Für den Einsatz von NIR- bzw. VIS-Sensoren oder zur Tracer/Marker-Detektion benötigt man eine höhere Vereinzlung des Materials. Auch die Daten einer Induktionsleiste werden als zu ungenau eingeschätzt.

Tabelle 9: Nutzungsmöglichkeit der Stoffstromüberwachung an Position 1 (Implementierung vor dem ersten Sieb) mit ✓: gut geeignet, o: mittelmäßig geeignet, x: nicht geeignet.

Technologie	Eignung	Nutzungsmöglichkeiten
NIR	x	
VIS	x	
Tracer/Marker	x	
3D-LT	✓	Messung von Durchsatzspitzen oder Stillständen, Funktionsweise des Sacköffners
Induktion	o	Messung, ob Metall vorhanden ist

Zur Messung des Durchsatzes wird der 3D-LT-Sensoraufbau zwischen Sacköffner und (Trommel-)Sieb installiert. Die gewonnenen Daten können genutzt werden, um eine diskontinuierliche Anlagenbeschickung zeitnah zu bemerken. Dabei werden beispielsweise längere Anlagenstillstände erfasst. Dies kann für die Betrachtung der Wirtschaftlichkeit einer Anlage ein interessanter Parameter sein. Wichtiger für die Möglichkeiten der technischen Optimierung ist es, den Anlageninput konstant in einem geeigneten Durchsatzbereich für das nachfolgende (Trommel-)Sieb zu halten. Wie in Kapitel 3 beschrieben, ist der Durchsatz einer der wichtigsten Einflussparameter auf die Funktionsweise eines Siebes. Sowohl „Overfilling“ als auch „Underfilling“ können dabei zu Problemen führen. Um dies zu verhindern, kann beispielsweise ein Warnsystem (z.B. Ampel-System nach Feil et al. (2019)) eingesetzt werden, um dem Personal am Radlader oder Krangreifer anzuzeigen, ob die Beladungsweise optimal ist. Außerdem werden Störungen in der Funktionsweise des Sacköffners von der 3D-LT an Position 1 detektiert.

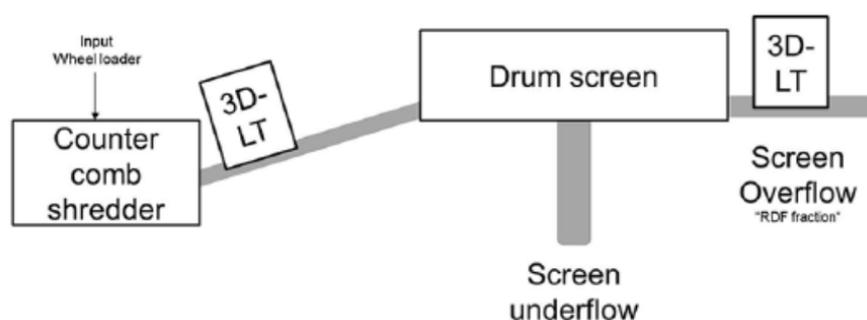


Abbildung 46: Positionierung der 3D-LT-Sensoren zur Überwachung des Volumenstromes im von Input bzw. Siebüberlauf (Feil et al. 2019).

In Abbildung 46 ist die mögliche Implementierung eines solchen Systems vergrößert dargestellt. Dabei entspricht der erste Sensor der Kontrolle an Position 1 und der zweite an Position 2 (Vgl. Abbildung 45). In der Praxis ist die Implementierung in einer Kunststoffsortieranlage von beiden Sensoren vermutlich unrentabel. Da der erste Sensor die falsche Beschickung des Siebes verhindern kann, liegt der Schluss nahe, dass dies die bevorzugte Variante ist.

Position 2

Wird die Stoffstromüberwachung nach einem Sieb positioniert, ist die Materialmenge am Förderband im Vergleich zur Positionierung vor dem Sieb reduziert. Das verbessert die Einsatzmöglichkeit von sensorischen Überwachungssystemen. In Abbildung 45 sind Implementierungsmöglichkeiten an Position 2a, 2b und 2c eingezeichnet. Dabei verbessert sich die Genauigkeit der Überwachung mit steigender Anzahl von Sieben vor dem Überwachungspunkt durch die Reduzierung der Bandbelegung (2c ist besser als 2a). Gleichzeitig nehmen mit steigender Anzahl von Sieben die Rückschlussmöglichkeiten auf den Anlageninput ab. Die Nutzungsmöglichkeiten der Stoffstromüberwachung an Position 2, als Zusammenfassung von 2a, 2b und 2c, sind in Tabelle 10 angeführt.

Tabelle 10: Nutzungsmöglichkeit der Stoffstromüberwachung an Position 2 (Implementierung nach einem Sieb) mit ✓: gut geeignet, o: mittelmäßig geeignet, x: nicht geeignet.

Technologie	Eignung	Nutzungsmöglichkeiten
NIR	✓	Stoffstromzusammensetzung, Durchsatzschwankungen, Funktionsweise der Siebe, Prozesssteuerung
VIS	o	Stoffstromzusammensetzung, Durchsatzschwankungen, Funktionsweise der Siebe
Tracer/Marker	o	Vorhandensein von Zielfraktionen, Durchsatzschwankungen, Funktionsweise der Siebe
3D-LT	✓	Durchsatzschwankungen, Funktionsweise der Siebe
Induktion	✓	Messung der Metalle je Zeiteinheit

Für eine Überwachung der Zusammensetzung des Anlageninputs, dessen Bedeutung in Kapitel 3.2.2 näher betrachtet wurde, wird von den drei Varianten jene Position gewählt werden, welche eine gerade ausreichend geringe Bandbelegung hat, um eine qualitative Stoffstromüberwachung realisieren zu können. Vorzugsweise würde dafür also Position 2a genutzt werden. Die beste Technologie zur Erhebung der Stoffstromzusammensetzung ist NIR. In Kombination mit künstlicher Intelligenz könnten dafür theoretisch auch VIS-Kameras genutzt werden, um anhand der Produktfarben auf die Stoffstromzusammensetzung zu schließen. Außerdem können beide Technologien gleichermaßen zur Ermittlung von Durchsatzschwankungen genutzt werden. Dabei wird die Bandbelegung überwacht und betrachtet, ob diese plötzlich zu- oder abnimmt. Dadurch kann auch die Funktionsweise des Siebes überwacht werden, da sich bei „Over-“, und „Underfilling“ die Trennleistung des Siebes verschlechtert und sich somit die Output-Ströme verändern.

Durch den Einsatz von Tracer/Marker-Detektoren kann nur auf das Vorhandensein jener Materialien geschlossen werden, welche mit einem Tracer bzw. Marker versehen sind. Aussagen über die Zusammensetzung des übrigen Stoffstroms sind nicht möglich. Ist der Anteil an Detektionen je Zeiteinheit üblicherweise annähernd konstant, kann jedoch auch durch die Stoffstromüberwachung mit dieser Technologie auf Durchsatzschwankungen geschlossen werden. Dabei reduzieren sich beispielsweise die Detektionen je Zeiteinheit, wenn Folien nicht erfolgreich durch ein Sieb abgetrennt werden und so einen messbaren Anteil der 3D-Produkte (z.B. Flaschen) überdecken. Diese Überlegungen sind allerdings rein theoretischer Natur, da im Recherche-Prozess keine quantitativen Studien zur Stoffstromüberwachung mit Tracer/Marker-Detektion gefunden wurden.

Auch mit 3D-LT können an diesen Positionen einerseits Durchsatzschwankungen gemessen werden und andererseits die Funktionsweise des Siebes validiert werden. Die Ergebnisse sind dabei genauer, da nicht nur das Falschfarbenbild genutzt wird. Theoretisch wäre auch eine gewisse Überwachung der Stoffstromzusammensetzung möglich, da unterschiedliche Abfälle unterschiedliche Formen haben (z.B. Flaschen, Joghurtbecher, Getränkeverbundkartons etc.). Auch hierzu konnte zum Zeitpunkt der Verfassung der Arbeit keine Publikation gefunden werden, die darlegen wie gut eine solche Identifikation von Artikeln funktioniert.

Der Einsatz eines Induktionssensors an Position 2 ermöglicht im Gegensatz zu Position 1 bessere Ergebnisse, da durch die Vereinzelnung besser auf die Anzahl an Metallobjekten geschlossen werden kann. Auch hier sind die Rückschlussmöglichkeiten auf die Inputzusammensetzung bei 2a besser als bei 2c, wobei die Genauigkeit der Messung bei 2c durch die geringere Bandbelegung besser sein könnte, als jene bei 2a.

Eine weitere Nutzungsmöglichkeit von Sensordaten ist die Prozesssteuerung. Dabei könnte die Anlage auf die Zusammensetzung des Abfalls reagieren. Beispielsweise könnten die Sortierrezepte der SGS an unterschiedliches Input-Material je nach Sammelsystem (Vgl. Kapitel 3.1) angepasst und optimiert sein. Theoretisch wäre auch eine grundsätzlich unterschiedliche Aggregat-Abfolge je nach Inputmaterial, beispielsweise realisiert durch reversierbare Bänder, möglich. Dies wird aber für Österreich nicht in absehbarer Zeit als realistisch eingestuft, da die Wirtschaftlichkeit aufgrund der geringen Inputmengen nicht gegeben ist (Vgl. 3.1.4 und 3.1.5). Da die Daten von NIR-Sensoren als die belastbarsten eingestuft werden, ist der Vorschlag eine Prozesssteuerung auf Basis von NIR-Daten zu machen.

Position 3

Der Einsatz von Stoffstromüberwachungssystemen nach Windsichtern soll sicherstellen, dass die 2D- bzw. Leichtgutabscheidung erfolgreich war. Diese kann durch einen vollständigen Ausfall des Windsichters, dessen Überlastung oder ungeeignete Maschinenparameter, wie beispielsweise die falsche Windgeschwindigkeit, (Vgl. 3.2.1) beeinträchtigt sein.

Leichtgut verschlechtert Sortierergebnisse auf zwei Arten: Einerseits wird es leicht in die Zielfraktion mitgerissen und andererseits kann es durch die Überlagerung anderer Partikel die Erkennung der SGS verschlechtern. Auch die Stoffstromüberwachung wird durch 2D-Material negativ beeinflusst. An Position 3 kann insbesondere mittels NIR-Sensoren festgestellt werden, dass die 3D-Partikel, aus welchen das Schwergut hauptsächlich besteht, durch Folien überdeckt werden. Außerdem kann detektiert werden, ob im Vergleich zum funktionstüchtigen Windsichter weniger Förderband detektiert wird, da eine größere Fläche durch 2D-Material belegt wird. Auch der Einsatz von VIS und Tracer/Marker, sowie 3D-LT ist dafür denkbar. Induktionssensoren sind allerdings ungeeignet, um den Anteil an Leichtgut in der Schwergutfraktion des Windsichters zu detektieren.

Tabelle 11: Nutzungsmöglichkeit der Stoffstromüberwachung an Position 3 (Implementierung nach Windsichern) mit ✓: gut geeignet, o: mittelmäßig geeignet, x: nicht geeignet.

Technologie	Eignung	Nutzungsmöglichkeiten
NIR	✓	Funktionsweise Windsichter, Stoffstromzusammensetzung, Durchsatzschwankungen
VIS	o	Funktionsweise Windsichter
Tracer/Marker	o	Funktionsweise Windsichter
3D-LT	✓	Funktionsweise Windsichter
Induktion	x	

Position 4

An Position 4 ist das vorrangige Ziel einer Stoffstromüberwachung die Kontrolle der Funktionsweise der Metallabscheidung. Sofern Magnetscheider und Wirbelstromscheider ein gutes Wertstoffausbringen erreicht haben, verbleiben kaum Metalle im Stoffstrom vor den sensorgestützten Sortierern. Stellt sich durch die Stoffstromüberwachung heraus, dass hier noch wirtschaftlich relevante Mengen an Metallen verbleiben, so kann über die Implementierung einer weiteren Fe- oder NE-Abscheidung diskutiert, eine mögliche Optimierung der Aggregatparameter untersucht oder eine Rezirkulierung des Materials vor die Metallabscheidung realisiert werden.

Tabelle 12: Nutzungsmöglichkeit der Stoffstromüberwachung an Position 4 (Implementierung nach der Metallabscheidung) mit ✓: gut geeignet, o: mittelmäßig geeignet, x: nicht geeignet.

Technologie	Eignung	Nutzungsmöglichkeiten
NIR	✓	Stoffstromzusammensetzung, Durchsatzschwankungen
VIS	o	Stoffstromzusammensetzung, Durchsatzschwankungen
Tracer/Marker	✓	Vorhandensein von Zielfraktionen, Durchsatzschwankungen
3D-LT	✓	Durchsatzschwankungen
Induktion	✓	Funktionsweise der Metallabscheidung

Die anderen Technologien erfüllen an dieser Stelle die gleichen Funktionen wie an Position 2, diese sind in Tabelle 12 angeführt. Nach der Metallabscheidung sind aufgrund der geringeren Abfallmenge die Förderbänder oft schmaler ausgeführt als zu Beginn der Anlage. Dadurch kann es zu einer Steigerung der Bandbelegung kommen. Das macht deutlich, dass vor einer Implementierung auch alle anlagentechnischen Einflussgrößen, wie eben Bandbreite oder auch Bandgeschwindigkeit, betrachtet werden müssen.

Position 5

Der Einsatz von externer Stoffstromüberwachung zur Überprüfung der Funktionsweise von SGS ist nur bedingt sinnvoll, da in Anlagen mit einem hohen Automatisierungsgrad (Vgl. Kapitel 3.2.1 „Gruppe (2) und (3)“) häufig ohnehin zumindest ein weiterer Sortierer in der Anlagenlinie folgt, welcher eine Veränderung des Stoffstromes misst. Diese kann beispielsweise durch einen Düsenausfall des SGS verursacht werden. Sofern die Daten des SGS nicht zugänglich sind oder kein Warnsystem direkt auf Basis dieser Daten implementiert werden kann, ist der Einsatz insbesondere bei monetär wertvolleren Stoffströmen dennoch möglich. Auch hier ist je nach Stoffstromzusammensetzung die Nutzung von NIR-, VIS- oder Tracer/Marker-Detektion sinnvoll. Für spezielle Fragestellungen (z.B. sind in der PET-Flaschenfraktion nur Flaschen?), kann 3D-LT eingesetzt werden. Induktionssensoren haben an Position 5 keinen besonderen Nutzen, da die Metalle bereits abgeschieden sein sollten und für verbleibende Metalle an dieser Stelle keine sinnvolle Rückführung vorgenommen werden kann.

Tabelle 13: Nutzungsmöglichkeit der Stoffstromüberwachung an Position 5 (Implementierung nach einer SGS) mit ✓: gut geeignet, o: mittelmäßig geeignet, x: nicht geeignet.

Technologie	Eignung	Nutzungsmöglichkeiten
NIR	✓	Funktionsweise SGS, Stoffstromzusammensetzung, Durchsatzschwankungen
VIS	✓	Funktionsweise SGS
Tracer/Marker	✓	Funktionsweise SGS
3D-LT	o	Funktionsweise SGS
Induktion	x	

An dieser Stelle wird Tracer/Marker-Detektion erstmalig als besonders vorteilhaft eingestuft. Sofern Produkte mit unterschiedlichen Inhalten (z.B. Putzmittel, Lebensmittel, etc.) in Zukunft durch Tracer/Marker gekennzeichnet werden, wird auch Tracer-based Sorting (TBS) eine Rolle spielen. Zur Nachkontrolle der Sortierprodukte ist folglich auch die Tracer/Marker-

Erkennung besser geeignet als andere Technologien, welche ausschließlich das Verpackungsmaterial (Stoff, Farbe, Form) beurteilen können.

Der Einsatz von VIS-Sensoren zu Stoffstromüberwachung ist insbesondere nach der SGS zur Farbsortierung sinnvoll. Diese wird insbesondere zur Farbsortierung von PET-Flaschen eingesetzt. Dafür wäre in Abbildung 45 nach dem NIR-SGS, welcher PET ausschießt, statt bzw. vor der Handsortierung eine VIS-SGS-Kaskade. Diese trennt stufenweise transparentes, blaues, grünes und sonstiges farbiges PET. Der Einsatz zur Stoffstromüberwachung von NIR-SGS-Produkten ist wiederum nur mittels Nutzung von künstlicher Intelligenz zur Produkterkennung sinnvoll.

Position 6

Position 6 stellt den Einsatz von Stoffstromüberwachung vor einem Zerkleinerungsaggregat dar. In hochtechnisierten Anlagen (Vgl. Kapitel 3.2.1 „Gruppe (3)“) wird die von Metallteilen befreite Grobfraction teilweise zerkleinert und dem Sortierprozess erneut zugeführt (Beispielsweise an Position 1). Dieser Fall ist nicht eingezeichnet, da er für österreichische Anlagen als nicht in naher Zukunft relevant eingeschätzt wird. Die grundlegende Nutzung der Stoffstromüberwachung an dieser Stelle ist dennoch wichtig und dient dem Einsatz als Maschinenschutz. Metallteile können Zerkleinerungsaggregate beschädigen, und müssen daher vor einem Zerkleinerungsschritt abgetrennt werden. Folglich kann die Detektion dieser Störstoffe essenziell für einen störfallfreien Anlagenbetrieb sein. Besonders geeignet sind dafür in diesem Beispiel Induktionssensoren, da sie sowohl Verpackungsmetalle als auch Nicht-Verpackungsmetalle detektieren. Zur Erkennung von Verpackungsmetallen könnten auch Tracer/Marker-Detektoren genutzt werden, allerdings sind dickwandigere Metalle besonders problematisch für Zerkleinerungsaggregate. Da diese üblicherweise Nicht-Verpackungen sind (z.B. Bratpfanne, massive Metallbox, etc.) ist der Einsatz von Tracer/Marker-Detektion hier nur eingeschränkt sinnvoll.

Tabelle 14: Nutzungsmöglichkeit der Stoffstromüberwachung an Position 6 (Implementierung vor einem Zerkleinerungsaggregat) mit ✓: gut geeignet, o: mittelmäßig geeignet, x: nicht geeignet.

Technologie	Eignung	Nutzungsmöglichkeiten
NIR	x	Maschinenschutz durch Erkennung von Metallteilen
VIS	x	
Tracer/Marker	o	
3D-LT	x	
Induktion	✓	Maschinenschutz durch Erkennung von Metallteilen

Position 7

An Position 7 werden die Output-Fractionen direkt vor der Presse betrachtet. Durch die Implementierung am Bunkerband ist die Überwachung aller in dieser Presse verdichteten Output-Ströme möglich. Durch die Messung der Reinheit bzw. des Störstoffgehaltes kann festgestellt werden, ob die Qualitätsanforderungen eingehalten werden. Gleichzeitig kann die Menge an Verlusten von Wertstoffen in falsche Fraktionen gemessen werden. Beides kann durch punktuelle Ausfälle in der Anlage entstehen (z.B. viel PET in der PE-Fraktion, weil PET-SGS einen Ausfall hatte), einem grundsätzlich zu hohem Durchsatz oder aufgrund schlechter Aggregateinstellungen von einem oder mehreren Geräten.

Technologie	Eignung	Nutzungsmöglichkeiten
NIR	✓	Messung der Output-Reinheit, Detektion von Verlusten
VIS	✓	Messung der Output-Reinheit, Detektion von Verlusten
Tracer/Marker	✓	Detektion von Verlusten, Messung mancher Störstoffe
3D-LT	x	
Induktion	✓	Detektion von metallischen Störstoffen

Je nach Vertragslage mit dem Abnehmer und der wirtschaftlichen Situation kann das Material auch beim Unterschreiten der Qualitätsstandards verpresst werden, um in einer minderwertigeren Kategorie weitergeben zu werden (z.B. Ersatzbrennstoffherstellung statt Recycling). Alternativ wäre durch eine Stoffstromüberwachung auch eine Rezirkulierung der minderwertigen Stoffströme möglich. An welcher Stelle diese Rezirkulierung sinnvoll ist, muss individuell betrachtet werden. Eine Möglichkeit in Abbildung 45 wäre Position 2a, da der Output an Position 7 mit hoher Wahrscheinlichkeit der Korngröße des Siebdurchgangs von Sieb 1 entspricht, weshalb es nicht nötig ist das Material an der Stelle des Anlageninputs einzubringen. Dennoch wird es erneut zweistufig gesiebt (Sieb 2 und Schwingsieb), was vorteilhaft für die Funktionsweise der folgenden Trennaggregate ist (Vgl. erforderliches Korngrößenverhältnis in Kapitel 3.2.1). Ob eine Rezirkulierung auf Basis einer Stoffstromüberwachung implementiert wird, ist wiederum maßgeblich eine wirtschaftliche Frage (Vgl. 3.1.4).

5 Zusammenfassung und Ausblick

Aufgrund der steigenden Mengen an Kunststoffverpackungsabfällen, den strengeren Vorgaben der EU in Bezug auf Recyclingquoten und der neuen Berechnungsmethode dieser Quote muss die Abfallwirtschaft in Europa in den kommenden Jahren Innovationen in vielen Bereichen realisieren. Die Recyclingquote setzt sich zusammen aus der Effektivität von Sammlung, Sortierung und der stofflichen Verwertung des Materials. Zur Erreichung des Recyclingziels für 2025 müssen laut ARA (2019b) in Österreich insbesondere in den Bereichen Sammlung und Sortierung Verbesserungen realisiert werden. Vom Zielwert (80 %) war die Sortierung im Jahr 2019 22 Prozentpunkte entfernt. Folglich ist es unabdingbar die Kunststoffsortieranlagen in Österreich zeitnah zu modernisieren.

Eine große Herausforderung dabei ist die Anlagenstruktur in Österreich. Einerseits sind die Gesamtabfallmengen gering (300.002 t im Jahr 2018), andererseits hat Österreich aufgrund geografischer und historischer Gründe viele kleine Anlagen und nicht wenige große, wie das in anderen europäischen Ländern mit ähnlichen Abfallmengen der Fall ist. Das führt zu einer wirtschaftlichen Herausforderung im Modernisierungsprozess, da SGS teuer sind und sich ein hoher Automatisierungsgrad bei kleinen Durchsätzen kaum amortisieren kann. Außerdem ist der Anlageninput in Österreich je nach Sammelregion aufgrund der hohen Anzahl an verschiedenen Sammelsystemen und demografischen Einflussfaktoren sehr unterschiedlich, was das Optimierungspotential von statischen Anlagen ohne variabler Prozessführung deutlich einschränkt.

Um auf Schwankungen in der Inputzusammensetzung zeitnah zu reagieren oder Optimierungsmöglichkeiten in bestehenden Anlagen aufzuzeigen kann sensorische Stoffstromüberwachung eingesetzt werden. Die Einflussfaktoren auf die Sortierung und damit auf die Potentiale einer sensorischen Überwachung durch das Abfallwirtschaftssystem wurden in Kapitel 3.1 ausführlich dargestellt. Die Auswahl solcher Sensoren zur Stoffstromüberwachung, deren Positionierung in der Anlage, sowie die Möglichkeiten zur Interpretation und Nutzung der aufgenommenen Daten ist dabei maßgeblich vom Anlagenaufbau und den Einflussparametern der einzelnen Aggregate abhängig. In Kapitel 3.2 wurde deshalb ein typischer Anlagenaufbau skizziert und die einzelnen Aggregate, sowie die Einflussfaktoren auf deren Funktionsweise beschrieben. Besonders relevant ist dabei, dass viele Aggregate (z.B. Wirbelstromscheider, SGS) vom Korngrößenverhältnis im Stoffstrom abhängig sind. Feil et al. (2019) stellt daher die Hypothese auf, dass die Funktionsweise der ersten Siebe in der Anlage die Qualität der folgenden Sortierstufen determiniert.

Die Anlagenperformance, also die Fähigkeit einer Anlage ein hohes Ausbringen an Wertstofffraktionen bei gleichzeitig möglichst hoher Reinheit zu erzielen, ist stark von der Materialzusammensetzung und dem Durchsatz abhängig (Vgl. Kapitel 3.2.2). Dies gilt gleichermaßen für die Performance der einzelnen Sortierstufen, weshalb die Stoffstromüberwachung zur Sicherstellung eines geeigneten Inputs in jedes Aggregat genutzt werden kann. Welche Sensorsysteme dafür als besonders geeignet eingeschätzt werden und an welchen Stellen in der Anlage sie jeweils sinnvoll eingesetzt werden können wurde im letzten Abschnitt dieser Arbeit beschrieben.

Die folgenden Potentiale durch den Einsatz von sensorischer Stoffstromüberwachung konnten bei einer Anlage nach Stand der Technik auf Basis der Literaturrecherche und Anlagenbesichtigungen ermittelt werden:

Tabelle 15: Potentiale der sensorischen Überwachung beschrieben durch die allgemeine Nutzungsmöglichkeit und den jeweiligen Anwendungsbeispielen.

Nutzungsmöglichkeit	Anwendungsbeispiel
Erfassung der Inputzusammensetzung	Verbesserte Öffentlichkeitsarbeit
Kontrolle der Funktionsweise von Aggregaten	Messung von Überlastung oder Ausfall von Aggregaten (z.B. Düsenleiste von SGS)
Warnsysteme	Bei Überlastung von Aggregaten oder Vorhandensein problematischer Stoffe automatische Warnung (optisch oder akustisch)
Prozesssteuerung	Die Art und Anzahl der Sortierstufen wird an die Abfallmenge und -zusammensetzung angepasst.
Optimierung von Maschineneinstellungen	Windgeschwindigkeit des Windsichters angepasst an die Menge und Zusammensetzung des Stoffstromes
Maschinenschutz	Metall-Kontrolle vor einem Zerkleinerungsaggregat
Qualitätssicherung der Wertstofffraktionen	Unterschreiten der Grenzwerte bzgl. des Störstoffanteils durch Optimierung der Anlage oder Rezirkulierung
Verringerung der Wertstoffverluste in falsche Fraktionen	Maximieren des Wertstoffausbringens durch Optimierung der Anlage oder Rezirkulierung

Grundsätzlich gilt, dass mit steigender Anzahl an Sensoren auch die Menge an Informationen und damit die Möglichkeiten zur Überwachung und Optimierung steigen. Gleichzeitig verursacht dies aber auch höhere Kosten, was insbesondere im Bereich der Kunststoffabfälle ein wirtschaftliches Limit darstellt. Die Auswahl der Art und Position einer sensorischen Überwachung muss also von einer fachkundigen Person intelligent ausgewählt werden. Gute Lösungen können dabei in jeder Anlage unterschiedlich aussehen, da sich Anlageninput und Durchsatz, sowie die Aggregatart- und Abfolge innerhalb Österreichs und insbesondere europaweit stark unterscheiden.

Ausblick

Die in dieser Arbeit beschriebenen theoretischen Nutzungsmöglichkeiten müssen durch Versuche im Labor-, Technikums- oder Anlagenmaßstab validiert werden, um den Anlagenbetreibern fundierte Empfehlungen für die Auswahl und Positionierung von sensorischen Überwachungssystemen geben zu können. Um die Möglichkeiten und Grenzen der sensorischen Überwachung zu eruieren, wird beispielsweise am AVAW der Montanuniversität Leoben und am ANTS der RWTH Aachen in Kooperation mit Industriepartnern im Projekt „EsKorte“ Forschungsarbeit geleistet.

Unter anderem werden aktuell Versuche zur Nutzung von Daten aus sensorgestützten Sortierern bei einer Kunststoffsortierung mittels NIR am AVAW durchgeführt. Parallel wird die Überwachung des Durchsatzes eines Trommelsiebes mittels 3D-LT am ANTS getestet. Die Erkenntnisse aus beiden Versuchsreihen sollen im Anschluss im Technikumsmaßstab validiert werden. Außerdem soll die Möglichkeit der „Sensorfusion“, also der Kombination der Messdaten mehrerer Sensoren gemeinsam mit den Industriepartnern realisiert werden.

Zur Erreichung der Recyclingziele bis 2025 ist neben der wichtigen Forschungsarbeit die enge Kooperation mit Unternehmen notwendig, um die Erkenntnisse zeitnah in die Praxis übertragen zu können. Das Projekt „EsKorte“ hat daher das Potential zu jenen Projekten zu gehören, die einen realen Impact auf die österreichische Abfallwirtschaft haben.

6 Verzeichnisse

6.1 Literatur

- Abfallwirtschaft Steiermark (2016) *Abfallsammlung - Altstoffe und Verpackungen*. Vom 03.05.2016 [Online] <https://www.abfallwirtschaft.steiermark.at/cms/beitrag/10168548/4373880/> [10.09.2020]
- Anker Anderson (2021) *Bestimmungen zum Einweg-Pfandsystem – Deutschland*. [Online] <http://de.anker-andersen.dk/pfand-bestimmungen/deutschland.aspx> [24.02.2021]
- Anonym (2021) *Übliche Preisbereiche für sensorische Überwachungssysteme*. Online Interviews mit Anlagenbauern und Sensorherstellern, welche nicht namentlich genannt werden wollen. Am 24.02.2021
- ARA (2005) *Die Leistungen des ARA Systems – Nachhaltigkeitsbericht und Report 2005*. Altstoff Recycling Austria AG. Juni 2006 [Online] https://www.ara.at/fileadmin/user_upload/Downloads/Publikationen/Leistungsreport/ARA_SYSREP_05.pdf [09.09.2020]
- ARA (2019a) *Herausforderungen Kreislaufwirtschaftspaket – Beiträge der ARA Partner zu Umsetzung und Zielerreichung*. ARA Partner-Event 2019. [Online] <https://www.wko.at/branchen/information-consulting/entsorgungs-ressourcenmanagement/unterlage-ara-partnerevent-2019.pdf> [23.02.2021]
- ARA (2019b) *Rohstoff Kunststoff – Ressourcen und Kreislaufwirtschaft neu denken und machen*. Altstoff Recycling Austria AG, September 2019. [Online] https://www.ara.at/fileadmin/user_upload/flipbooks/ARA19_Rohstoff-Kunststoff/index.html#p=1 [06.09.2020]
- ARA (2020) *Kunststoffverpackungen im Kreislauf*. [Online] <https://www.ara.at/kreislaufwirtschaft/verpackungsrecycling/kunststoffverpackungen> [13.09.2020]
- AT-Minerals (2013) *OSCILLA – eine neue Dimension in der Siebtechnik*. Interview mit Dr. Marcus Wirtz (Jöst GmbH + Co. KG). [Online] https://www.at-minerals.com/de/artikel/at_OSCILLA_eine_neue_Dimension_in_der_Siebtechnik_1706531.html [19.01.2021]
- AWV Steiermark (2021) *Der GELBE SACK*. Kommunale Abfallwirtschaft – AWV Schladming [Online] <https://www.awv.steiermark.at/cms/beitrag/12566131/43903/> [03.01.2021]

- Balthasar D., Rehrmann V. (2017) *VIS/NIR Spektroskopie zur Wertstoffsartierung und Qualitätsanalyse*. TiTech Visionsort GmbH. [Online] <https://silo.tips/download/vis-nir-spektroskopie-zur-wertstoffsartierung-und-qualitaetsanalyse> [23.01.2021]
- Bauer E. (2017) *Die Qualität der Bioabfallsammlung in Abhängigkeit von der Siedlungsstruktur und dem Sammelsystem im Bezirk Graz-Umgebung*. Masterarbeit der Karl-Franzens-Universität Graz. Institut für Geographie und Raumforschung in Kooperation mit dem Dachverband der steirischen Abfallwirtschaftsverbände. [Online] <http://www.vaboe.at/wp-content/uploads/2018/03/DieQualitaetderBioabfallsammlunginAbhaengigkeitvonderSiedlungsstrukturunddemSammelsystem.pdf> [10.01.2021]
- Bendel H., Casper T., Koch B. (2016) *The fight against plastic waste -Sorting black plastics according to type*. RESEARCH NEWS. 06/2016. [Online] https://www.fraunhofer.de/content/dam/zv/en/press-media/2016/June/researchnews/rn_06_2016_FHR_IOSB_IAIS_Sorting%20black%20plastics%20according%20to%20type.pdf [23.01.2021]
- Bellocq B., Ruiz T., Delaplace G., Duri A., Cuq B. (2016) *Screening efficiency and rolling effects of a rotating screen drum used to process wet soft agglomerates*. Journal of Food Engineering. Volume 195. 235-246. DOI: [10.1016/j.jfoodeng.2016.09.023](https://doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2016.09.023)
- Bilitewski B., Härdtle G. (2013) *Abfallwirtschaft: Handbuch für Praxis und Lehre*. 4. Auflage. Springer Vieweg-Verlag. ISBN 978-3-540-79531-5 (eBook)
- Brantner (2021) *Entsorgung – Leistungen – Sortierung*. Brantner Österreich GmbH. [Online] <https://www.brantner.com/de/entsorgung/leistungen/sortierung.html> [14.01.2021]
- bvse (2020) *Vorurteile Hauptgrund für Trennmüdigkeit*. Vom 11.03.2020. Bundesverband Sekundärrohstoffe und Entsorgung. [Online] <https://www.bvse.de/recycling/recycling-nachrichten/5523-vorurteile-hauptgrund-fuer-trennmuedigkeit.html> [03.01.2021]
- Carbonaro G. (2014) *Plastic packaging waste recycling: a lesson from Eastern EU countries*. Vom 06.11.2019. CGTN. [Online] <https://newseu.cgtn.com/news/2019-11-06/Lithuania-tops-EU-recycling-rate-list-for-plastic-waste-LnvXeNPpwA/index.html> [09.01.2021]
- Curtis A., Küppers B., Möllnitz S., Khodier K., Sarc R. (2020) *Real time material flow monitoring in mechanical waste processing and the relevance of fluctuations*. In: Waste Management. Volume 120, Pages 687-697. DOI: [10.1016/j.wasman.2020.10.037](https://doi.org/10.1016/j.wasman.2020.10.037)
- Die Presse (2019) *Österreich muss beim Kunststoff-Recycling richtig aufholen*. Vom 04.11.2019. [Online] <https://www.diepresse.com/5716346/osterreich-muss-beim-kunststoff-recycling-richtig-aufholen> [06.09.2020]

- Directindustry (2021) *Sacköffner*. BOA Recycling Equipment BV. [Online] <https://www.directindustry.de/prod/boa-recycling-equipment-bv/product-158756-1639009.html> [16.01.2021]
- DPG (2021) *Gesetzliche Anforderungen an die Rücknahme pfandpflichtiger Einweggetränkeverpackungen*. [Online] <https://dpg-pfandsystem.de/index.php/de/die-pfandpflicht-fuer-einweggetraenkeverpackungen/ruecknahmepflicht-und-pfanderstattung.html> [24.02.2021]
- Ecoplast (2021) *Was versteht man unter Granulat/Regranulat*. In: Econews. [Online] <https://www.ecoplast.com/question/was-versteht-man-unter-granulatregranulat/> [22.02.2021]
- Eriez (2020) *RCS Rougher Cleaner Scavenger Nonferrous Processing System*. [Online] <https://www.eriez.jp/JP/EN/Products/Metals-Recycling/Nonferrous-Recovery/Rougher-Cleaner-Scavenger-RCS.htm> [22.01.2021]
- Euractiv (2020) *EU plans harmonised colour code for bin bags*. Autor: Frédéric Simon. Vom 24.09.2020. [Online] <https://www.euractiv.com/section/circular-economy/news/eu-plans-harmonised-colour-code-for-bin-bags/> [10.02.2021]
- Europäisches Parlament (2018) *Plastikmüll und Recycling in der EU: Zahlen und Fakten*. Aktuelles Europäisches Parlament. Vom 19.12.2018 [Online] <https://www.europarl.europa.eu/news/de/headlines/society/20181212STO21610/plastikmull-und-recycling-in-der-eu-zahlen-und-fakten> [08.09.2020]
- Europäisches Parlament und Rat (2018) *Richtlinie (EU) 2018/852 vom 30. Mai 2018 zur Änderung der Richtlinie 94/62/EG über Verpackungen und Verpackungsabfälle*.
- Europäisches Parlament und Rat (2019) *Richtlinie (EU) 2019/904 vom 5. Juni 2019 über die Verringerung der Auswirkungen bestimmter Kunststoffprodukte auf die Umwelt (Text von Bedeutung für den EWR)*.
- Eurostat (2020a) *Packaging waste statistics – Statistics Explained*. [Online] <https://ec.europa.eu/eurostat/statistics-explained/pdfscache/10547.pdf> [01.09.2020]
- Eurostat (2020b) *Packaging waste by waste management operations*. Data results for “Waste generated” in “plastic packaging waste” given in “Tonne” and “Kilogram per capita”. Online data code: ENV_WASPAC. Last Update 01.12.2020. [Online] https://ec.europa.eu/eurostat/databrowser/view/ENV_WASPAC_custom_422259/default/table?lang=en [05.01.2021]

- Eurostat (2020c) *Recycling rates of packaging waste for monitoring compliance with policy targets, by type of packaging*. Data results for “plastic packaging waste” given as “Rate”. Online data code: ENV_WASPACR. Last Update 01.12.2020. [Online] https://ec.europa.eu/eurostat/databrowser/view/ENV_WASPAC_custom_422259/default/table?lang=en [05.01.2021]
- 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*. In: WM&R. DOI: 10.1177/0734242X19826372
- Feil A., Pretz T., Jansen M., Thoden van Velzen E.U. (2016a) *Separate collection of plastic waste, better than technical sorting from municipal solid waste?* In: WM&R. DOI: 10.1177/0734242X16654978
- Feil A, Pretz T, Vitz P, et al. (2017) *A methodical approach for the assessment of waste sorting plants*. In: WM&R. Volume 35, Page 147–154. DOI: 10.1177/0734242X16683270
- Feil A, Thoden van Velzen EU, Jansen M, et al. (2016b) *Technical assessment of processing plants as exemplified by the sorting of beverage cartons from lightweight packaging wastes*. In: Waste Management. 48: 95–105. DOI: 10.1016/j.wasman.2015.10.023
- Ferreira B., Monedero J., Martí J.L., Aliaga C., Hortal M. (2012) *The Economic Aspects of Recycling*. In: Post-consumer waste recycling and optimal production. InTech. Rijeka. ISBN: 978-953-51-0632-6
- Fråne A., Stenmarck A., Gíslason S., Løkke S., zu Castell Rüdénhausen M., Raadal H.L., Wahlström M. (2015) *Guidelines to increased collection of plastic packaging waste from households*. Nordic Council of Ministers 2015. Environmental Sciences. DOI: 10.6027/ANP2015-712
- GPA (2019) *Global Plastics Flow 2018*. Veröffentlicht im Rahmen der K 2019 von den Verbänden der Global Plastics Alliance (GPA) und der Conversio Market & Strategy GmbH. [Online] https://www.k-online.de/cgi-bin/md_k/lib/pub/object/downloadfile.cgi/Global_Plastics_Flow_Summary_Oct14_2019.pdf?oid=133807&lang=1&ticket=g_u_e_s_t [22.02.2021]
- Gringer P.R. (2013) *Image showing the distribution of electromagnetic waves with respect to frequency and wavelength, highlighting visible part of the electromagnetic spectrum. Revised diagram with re-aligned spectrum*. Creative Commons Attribution-Share Alike 3.0 Unported license. Published on 19.02.2013 [Online] https://commons.wikimedia.org/wiki/File:EM_spectrumrevised.png [23.01.2021]

- Gundupalli S.P., Hait S. Thakur A. (2016) *A review on automated sorting of source-separated municipal solidwaste for recycling*. In: Waste Management. 60 (2017) 56-74. DOI: 10.1016/j.wasman.2016.09.015
- Gundupalli S.P., Shukla R., Gupta R., Hait S., Thakur A. (2020) *Optimal Sequence Planning for Robotic Sorting of Recyclables from Source-Segregated Municipal Solid Waste*. In: Journal of Computing and Information Science in Engineering. DOI: 10.1115/1.4047485
- Handscheck B., Wohllebe M., Hollstein F. (2012) *Möglichkeiten und Grenzen der Sortierung von Biokunststoffen mit neuer NIR Sortiertechnik*. In: Tagungsbandbeitrag Konferenz „Biokunststoffe in Verwertung und Recycling“. Dresden.
- Hauer W., Merstallinger M., Allesch A., Beigl P., Happendorfer A., Huber-Humer M., Obrestainer G., Wellacher M. (2020) *Möglichkeiten zur Umsetzung der EU-Vorgaben betreffend Getränkegebinde, Pfandsysteme und Mehrweg. Endbericht. Im Auftrag des Bundesministerium für Klimaschutz, Umwelt, Energie, Mobilität, Innovation und Technologie*. TBHAUER Technisches Büro HAUER Umweltwirtschaft GmbH in Kooperation mit BOKU (Universität für Bodenkultur, Institut für Abfallwirtschaft) und MUL (Montanuniversität Leoben, Lehrstuhl für Abfallverwertungstechnik und Abfallwirtschaft). Wien.
- Hellerich W., Harsch G., Baur E. (2010) *Werkstoff-Führer Kunststoffe: Eigenschaften, Prüfungen, Kennwerte*. 10. Auflage. Carl Hanser Verlag. e-ISBN: 978-3-446-42572-9
- Kaiser K., Schmid M., Schlummer M. (2018) *Recycling of Polymer-Based Multilayer Packaging: A Review*. Recycling 2018. Volume 3, 1. DOI: 10.3390/recycling3010001
- Khodier K., Viczek S.A., Curtis A., Aldrian A., O’Leary P., Lehner M., Sarc R. (2019) *Sampling and analysis of coarsely shredded mixed commercial waste. Part I: procedure, particle size and sorting analysis*. International Journal of Environmental Science and Technology. DOI: 10.1007/s13762-019-02526-w
- Kranert M. (2018) *Einführung in die Kreislaufwirtschaft. Planung – Recht – Verfahren*. 5. Auflage. Springer Vieweg-Verlag. ISBN 978-3-8348-2257-4 (eBook)
- Kranert M. und Cord-Landwehr K. (2010) *Aufbereitung fester Abfallstoffe*. In: Kranert M., Cord-Landwehr K. (eds) *Einführung in die Abfallwirtschaft*. Vieweg+Teubner Verlag. DOI: 10.1007/978-3-8348-9681-0_5
- Küppers B. (2021) *Nutzungsmöglichkeiten von Rougher, Scavenger und Cleaner in der Praxis*. Online-Interview am 21.01.2021

- Küppers B., Schlögl S., Oreski G., Vollprecht D., Pomberger R. (2019) *Influence of surface roughness and surface moisture of plastics on sensor-based sorting in the near infrared range*. Waste management & Research, 2019, Vol 37/Issue 8. DOI: 10.1177/0734242X19855433
- Küppers B., Schlögl S., Friedrich K., Pichler C., Lederle L., Freil J., Vollprecht D., Pomberger R. (2020a) *Influence of material alterations and machine impairment on throughput related sensor-based sorting performance*. Waste management & Research, OnlineFirst. DOI: 10.1177/0734242X20936745
- Küppers B., Schlögl S., Vollprecht D. (2020b) *Einfluss von Durchsatz und Inputzusammensetzung auf die sensorgestützte Sortierung*. In: Tagungsbandbeitrag Recy- und Depotech 2020.
- Küppers B., Seidler I., Koinig G., Pomberger R., Vollprecht D. (2020c) *Influence of throughput rate and input composition on sensor-based sorting efficiency*. In: Detritus 9, 59-67. DOI: 10.31025/2611-4135/2020.13906
- Liang S. (2003) Quantitative Remote Sensing of Land Surfaces. John Wiley & Sons, Inc, Hoboken, NJ, USA. ISBN 0-471-28166-2
- Marques R.C. Ferreira d.C.N., Simões P., Faria Ferreira S., Pereira M.C., De Jaeger S. (2014) *Economic viability of packaging waste recycling systems: a comparison between Belgium and Portugal*. LSE Research Online. DOI: 10.1016/j.resconrec.2013.12.015
- Martens H and Goldmann D (2016) *Recyclingtechnik – Fachbuch für Lehre und Praxis*. Springer Verlag, 27–28. ISBN: 978-3-658-02786-5
- Marthinussen R. (2006) *Improving existing processes - The TiTech story. Introduction to TiTech and optical sorting*. In: TOMRA Capital Markets Day 2006. [Online] <http://mb.cision.com/Main/4659/9326794/60619.pdf> [21.01.2021]
- Matthiessen (2021) *Bagsplitter: Light packaging material*. Matthiessen Lagertechnik GmbH. [Online] <https://www.bagsplitter.com/en/light-packaging/> [19.01.2021]
- Mehta N., Shaik S., Devireddy R., Gartia M.R. (2018) *Single-Cell Analysis Using Hyperspectral Imaging Modalities*. Journal of biomechanical engineering 140. DOI:10.1115/1.4038638
- Nachhaltig in Graz (2018) *Kunststoffsartieranlage Saubermacher Graz*. Vom 19.06.2018 [Online] <https://nachhaltig-in-graz.at/kunststoffsartieranlage-saubermacher-graz/> [17.02.2021]

- Neubauer C., Stoifl B., Tesar M., Thaler P. (2020) *Sortierung und Recycling von Kunststoffabfällen in Österreich: Status 2019*. Report REP-0744. Bundesministerium für Klimaschutz, Umwelt, Energie, Mobilität und Technologie. Wien. [Online] https://www.umweltbundesamt.at/fileadmin/site/publikationen/rep0744_hauptteil.pdf [16.01.2021]
- NÖ Umweltverbände (2019) *Niederösterreichische Restmüllanalyse 2018/2019*. [Online] http://www.noel.gv.at/noel/Abfall/NOE_Restmuellanalyse_2018_2019.pdf [11.09.2020]
- PET to PET (2020) *Jahresbilanz 2019: Neuer Recycling-Record. Über 26.000 Tonnen PET-Material recycelt*. Vom 29.01.2020. PET to PET Recycling Österreich GmbH. [Online] <http://www.pet2pet.at/de/news/jahresbilanz-2019-neuer-recycling-rekord-ueber-26000-tonnen-pet-material-recycelt> [07.09.2020]
- Pomberger R. (2020) *Über theoretische und reale Recyclingfähigkeit*. In: ÖWAV. DOI: 10.1007/s00506-020-00721-5
- Pöttschacher S. (2016) *Die Wertstofftonne im Vergleich zur getrennten Sammlung*. Masterarbeit der Universität für Bodenkultur. Department für Wasser, Atmosphäre und Umwelt - Institut für Abfallwirtschaft. Wien.
- Presona (2021) *LP 80 VH2 Kanalballenpresse mit Vorpresstechnik*. [Online] https://www.perpress-gmbh.at/uploads/1682/LP_80_VH2.pdf [25.01.2021]
- Pretz T. und Feil A. (2015) *Klassieren von Abfallgemischen*. In: Recycling und Rohstoffe – Band 8. 577–585. TK Verlag, Neuruppin. ISBN: 978-3-944310-20-6
- Recycling-Portal (2018) *ARK- Neuer rotierender Aufreisskamm für Sackaufreißer – Erhebliche Durchsatzsteigerung bei gleicher Öffnungs- und Entleerungsquote*. Vom 17.12.2018. [Online] <https://www.recycling-portal.com/produktnews/1383/ark--neuer-rotierender-aufreisskamm-fuer-sackaufreisser.html> [19.01.2021]
- Reh K., Franke M., Baum H.G., Faulstuch M. (2013) *Abschlussbericht – Vergleichende Analyse der Entsorgung von Verpackungsabfällen aus haushaltsnahen Anfallstellen auf Basis der Verpackungsverordnungen in Deutschland und Österreich*. Im Auftrag der Altstoff Recycling Austria AG. Schriftenreihe des Österreichischen Wasser- und Abfallwirtschaftsverbandes (ÖWAV). Heft 169. Wien.
- Robben C. und Wotruba H. (2019) *Sensor-Based Ore Sorting Technology in Mining—Past, Present and Future*. MDPI. Minerals 2019, 9, 523. DOI:10.3390/min9090523

- Schweiger P. (2020) *Einwegpfand im Europäischen Raum und Integrationsmöglichkeit im österreichischen Abfallwirtschaftssystem*. Masterarbeit der Karl-Franzens-Universität Graz. Institut für Systemwissenschaften, Innovations- und Nachhaltigkeitsforschung [Online] <https://unipub.uni-graz.at/obvugrhs/content/titleinfo/5581224/full.pdf> [13.01.2020]
- Schwister K. (2010) *Taschenbuch der Verfahrenstechnik*. 4. Auflage. Carl Hanser Verlag. Kösel (D). ISBN: 978-3-446-42435-7
- Sörme L., Voxberg E., Rosenlund J., Jensen S. Augustsson A. (2019) *Coloured Plastic Bags for Kerbside Collection of Waste from Households—To Improve Waste Recycling*. MDPI. Recycling. DOI: 10.3390/recycling4020020
- Statista (2020) *RECYCLING - Pfandsysteme in Europa*. Autor: René Bocksch. Vom 02.06.2020 [Online] <https://de.statista.com/infografik/21881/aktive-und-geplante-einweg-pfandsysteme-in-europa/> [13.01.2020]
- Strautmann-Umwelttechnik (2021) *Kanalballenpresse*. [Online] <https://www.strautmann-umwelt.de/glossar/kanalballenpresse/> [25.01.2021]
- Thomé-Kozmiensky K.J., Goldmann D. (2010) *Recycling und Rohstoffe – Band 3*. TK Verlag, Neuruppin. ISBN: 978-3-935317-50-4
- Thomé-Kozmiensky K.J., Goldmann D. (2011) *Recycling und Rohstoffe – Band 4*. TK Verlag, Neuruppin. ISBN: 978-3-935317-67-2
- TOMRA (2021) *Leergutrücknahme – Produkte*. [Online] <https://www.tomra.com/de-de/collection/reverse-vending/produkte> [24.02.2021]
- Uepping R. (2013) *Sensorgestützte Sortiertechnik*. In: *Recycling und Rohstoffe – Band 6*. TK Verlag, Neuruppin. ISBN 978-3-935317-97-9
- Udwarý S. (2013) *Entwicklung von Figurationen unter dem Aspekt der modernen Abfallwirtschaft - Motive für Haushaltsmülltrennung in Wien*. Masterarbeit der Universität Wien. Studienfach Soziologie. Wien. [Online] http://othes.univie.ac.at/27042/1/2013-01-30_9509690.pdf [05.01.2021]
- Umweltbundesamt (2017) *Kunststoffabfälle in Österreich – Aufkommen und Behandlung. Materialien zum Bundes-Abfallwirtschaftsplan 2017*. Wien. [Online] <https://www.umweltbundesamt.at/fileadmin/site/publikationen/REP0650.pdf> [08.09.2020]

Umwelt.nrw (2018) *Weltverbrauchertag 2018: Weniger Plastik, mehr Recycling.*

Vom 15.03.2018. Ministerium für Umwelt, Landwirtschaft, Natur- und Verbraucherschutz des Landes Nordrhein-Westfalen. [Online] <https://www.umwelt.nrw.de/presse/pressemitteilung/weltverbrauchertag-2018-weniger-plastik-mehr-recycling-1521103116> [14.01.2021]

Umwelt- und Energiewirtschaft NÖ (2015) *Niederösterreichische Gesamtkunststofftonne – Wertstoffliche, ökologische und ökonomische Bewertung – Bericht 2015.* Amt der NÖ Landesregierung: Abteilung Umwelt- und Energiewirtschaft. St. Pölten. [Online] https://www.noel.gv.at/noel/Abfall/Bericht_2015_-_NOel_Gesamtkunststofftonne.pdf [02.01.2021]

Wertstoffwende.eu (2013) *Leichtstoffrecycling in einem Doppeltrommel-Unterdruck-Trenner.* Fachartikel der Fachzeitschrift Ke Next vom 11.05.2013. Kapitel Recycling 2.0 – Die Wertstoffwende. Hochschule Nordhausen – University of Applied Sciences. [Online] <https://wertstoffwende.eu/onewebmedia/Leichtstoffrecycling%20-%20Konstruktion%20-%20FH.pdf> [16.01.2021]

Woidasky J., Moesslein J., Wendler P., Kirchenbauer D., Wacker D., Gao G., Lang-Koetz C. (2020) *Kunststoffidentifikation und -sortierung in der Circular Economy durch Fluoreszenzmarker.* In: Chemie Ingenieur Technik. DOI: 10.1002/cite.201900126

6.2 Abkürzungsverzeichnis

Kunststoffarten

LVP	Leichtverpackungen
PE	Polyethylen
PE-HD (HDPE)	High-Density Polyethylen
PE-LD (LDPE)	Low-Density Polyethylen
PO	Polyolefine (Sammelbegriff für PE und PP)
PP	Polypropylen
PET	Polyethylenterephthalat

Materialströme

Fe-Metalle	Eisenmetalle
FG	Feingut (Siebung)
GG	Grobgut (Siebung)
GVK	Getränkeverbundkarton
LG	Leichtgut (Windsichtung)
LVP	Leichtverpackungen
MKF	Mischkunststofffraktion
NE-Metalle	Nicht-Eisen-Metalle
PMD	Plastic bottles and flasks, Metal packaging and Drink cartons (Dt.: Plastikflaschen, Metallverpackungen und GVK)
SG	Schwergut (Windsichtung)
SKF	Sorteinreine Kunststofffraktion

Sonstige Abkürzungen

ARA	Altstoff Recycling Austria
BS	Bringsystem
EU	Europäische Union
HS	Holsystem
SGS (Engl.: SBS)	Sensorgestützte Sortierung (Engl.: Sensor based sorting)
TBS	Tracer Based Sorting (Dt.: Marker-Sortierung)

6.3 Tabellen

Tabelle 1: Maßnahmen zur Steigerung der Sammel- und Recyclingquoten in Österreich (ARA 2019a).	5
Tabelle 2: Typische Outputfraktionen einer Kunststoffsortieranlage und beispielhafte Verwertungswege (PET to PET 2020, Neubauer et al. 2020).	7
Tabelle 3: Übersicht über Art und Anzahl der genutzten Quellen	10
Tabelle 4: Beispiele für Sammelsysteme in Niederösterreich. ✓ - wird gesammelt, (✓) - wird ggf. planmäßig miterfasst, X - wird nicht erfasst (Datenquelle: NÖ Umweltverbände 2019:22).	14
Tabelle 5: Anlageninput und Anteil an abgetrennten Zielfractionen bezogen auf den Gesamt-Output im Jahr 2018 (Neubauer et al. 2020).	34
Tabelle 6: Überblick über relevante Sensortechnologien in der Kunststoffabfallsortierung, sowie die jeweils relevanten Materialeigenschaften und Anwendungsbeispiele. Grau: Noch nicht flächendeckend eingesetzte Technologien (Marthinussen 2006, Uepping 2013, Feil et al. 2019).	48
Tabelle 7: Mögliche Messgrößen verschiedener in-line Stoffstromüberwachungstechnologien in Kunststoffsortieranlagen ✓: geeignet, (✓): bedingt geeignet, (x): unter Laborbedingungen bedingt geeignet, x: nicht geeignet.	67
Tabelle 8: Geschätzte Kosten für die sensorische Stoffstromüberwachung in Kunststoffsortieranlagen inklusive Beleuchtung, Recheneinheit, Auswertesoftware und Montagevorrichtung (Anonym 2021).....	70
Tabelle 9: Nutzungsmöglichkeit der Stoffstromüberwachung an Position 1 (Implementierung vor dem ersten Sieb) mit ✓: gut geeignet, o: mittelmäßig geeignet, x: nicht geeignet. ...	71
Tabelle 10: Nutzungsmöglichkeit der Stoffstromüberwachung an Position 2 (Implementierung nach einem Sieb) mit ✓: gut geeignet, o: mittelmäßig geeignet, x: nicht geeignet.	74
Tabelle 11: Nutzungsmöglichkeit der Stoffstromüberwachung an Position 3 (Implementierung nach Windsichern) mit ✓: gut geeignet, o: mittelmäßig geeignet, x: nicht geeignet.	76
Tabelle 12: Nutzungsmöglichkeit der Stoffstromüberwachung an Position 4 (Implementierung nach der Metallabscheidung) mit ✓: gut geeignet, o: mittelmäßig geeignet, x: nicht geeignet.	76
Tabelle 13: Nutzungsmöglichkeit der Stoffstromüberwachung an Position 5 (Implementierung nach einer SGS) mit ✓: gut geeignet, o: mittelmäßig geeignet, x: nicht geeignet.....	77
Tabelle 14: Nutzungsmöglichkeit der Stoffstromüberwachung an Position 6 (Implementierung vor einem Zerkleinerungsaggregat) mit ✓: gut geeignet, o: mittelmäßig geeignet, x: nicht geeignet.	78

Tabelle 15: Potentiale der sensorischen Überwachung beschrieben durch die allgemeine Nutzungsmöglichkeit und den jeweiligen Anwendungsbeispielen. 81

6.4 Abbildungen

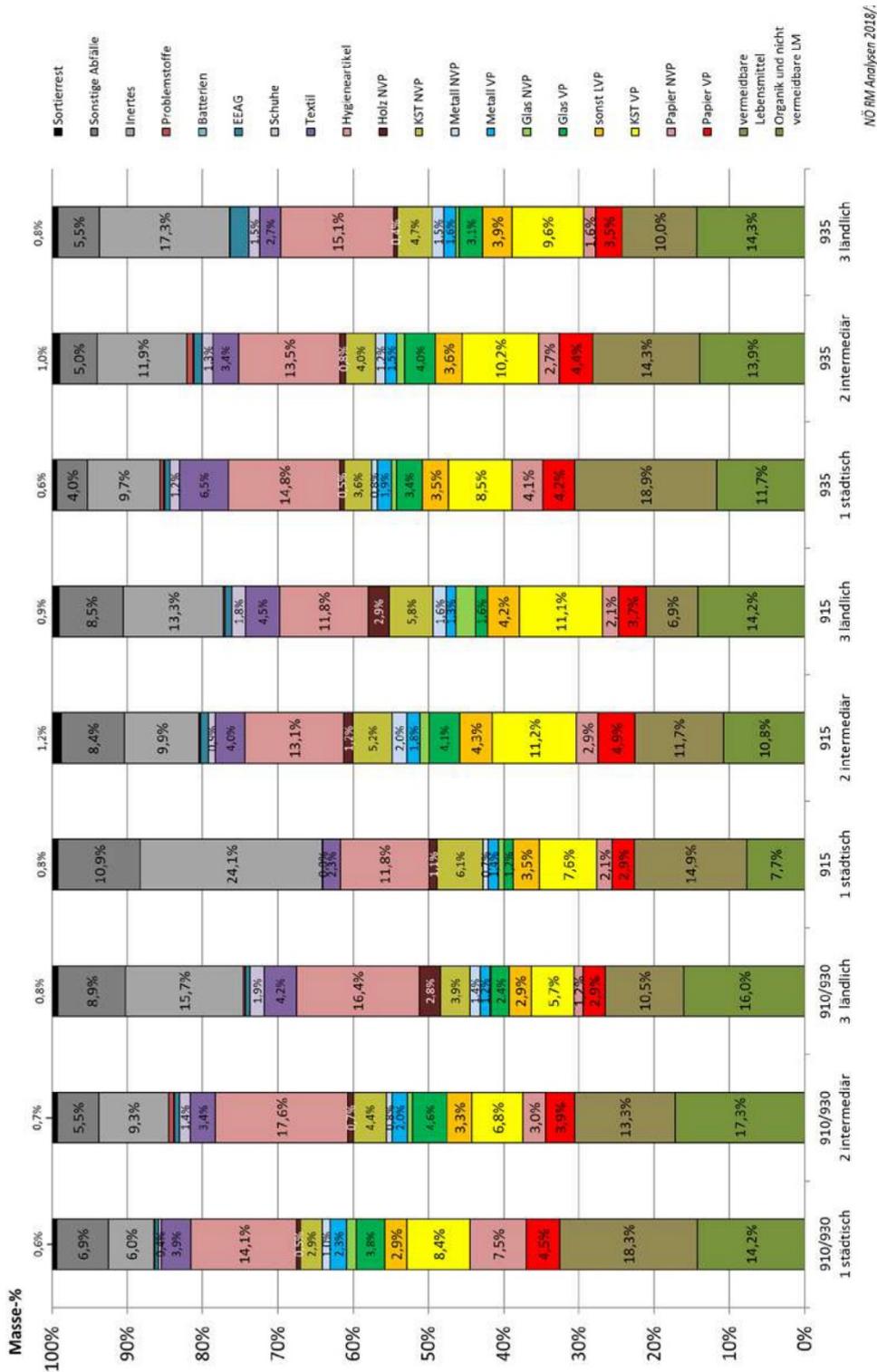
Abbildung 1: Kunststoffkreislauf (grün) mit verschiedenen Verlustebenen (rot) (Erstellt auf Basis von GPA 2019, Hellerich 2010 und Reh et al. 2013).	3
Abbildung 2: Gegenüberstellung EU-Recyclingziele und Sammelquoten für Getränkeflaschen in den Jahren 2025 und 2030 mit der Situation in Österreich (ARA 2019b).	4
Abbildung 3: Istwerte (grün) und Sollwerte (grau) zum Erreichen der 50 %-Recyclingquote in den Bereichen Sammlung, Sortiertiefe und Recycling (Datenquelle: ARA 2019b).	6
Abbildung 4: Status (dunkelgrün) und Potentiale (hellgrün) der Sortiertiefen in Österreich für verschiedene Kunststoffe sowie die Durchschnittswerte über alle Kunststoffarten (ARA 2019a).	6
Abbildung 5: Ausgestaltung der Erfassung und Verwertung von Verpackungsabfällen in Österreich mit HS... Holsystem und BS... Bringsystem (Reh et al. 2013:22).	11
Abbildung 6: Übersicht über die Stakeholder im ARA-System. Links: Inverkehrbringer von Verpackungen, Mitte: Systembetreiber ARA für diverse Packstoffe, Rechts: Abfallwirtschaftliche Organisationseinheiten (Abfallwirtschaft Steiermark 2016).	12
Abbildung 7: Verteilung der Sammelsysteme in Niederösterreich. Gelb: 910, Orange: 915, Violett: 930, Grün: 935, Grau: Neunkirchen Wertstofftonne und Weiß: Bundesland Wien (NÖ Umweltverbände 2019:23).	15
Abbildung 8: Systematische Darstellung verschiedener Varianten von Umschlagstationen (Bilitewski und Härdtle 2013:139).	16
Abbildung 9: Ebenen der Verluste und resultierender Anteil an verwertbarem Material im Vergleich zum gesamten Wertstoffpotenzial. Verwertungspotential als strichlierte Linie. (Vereinfacht dargestellt auf Basis von Bilitewski und Härdtle 2013:152).	19
Abbildung 10: Menge an Kunststoffverpackungsabfällen im europäischen Vergleich im Jahr 2018 in Tonnen gesamt (grün) und kg/EW (rot bzw. schwarz, strichliert für EU-27-Durchschnitt). Geschätzte Daten sind mit (1) und Daten aus 2017 mit (2) markiert (Datenquelle: Eurostat 2020b).	21
Abbildung 11: Recyclingraten von Kunststoffverpackungsabfällen im Jahr 2018 in Europa (grün) Geltendes Recyclingziel 2018 von 22,5 % (rot) und Recyclingziel 2015 von 50 % (schwarz; strichliert). Geschätzte Daten sind mit (1) und Daten aus 2017 mit (2) markiert (Datenquelle: Eurostat 2020c).	22
Abbildung 12: Stoffstromänderung im Kunststoffkreislauf durch das Pfandsystem (grün) (Erstellt auf Basis von GPA 2019, Hellerich 2010, Reh et al. 2013 und Schweiger 2020).	25

Abbildung 13: Vergleich einiger Kennzahlen bzgl. Trennung und Lizenzierung in Österreich (links) und Deutschland (rechts). Alle Angaben in Gew.-% (Datenquelle: Reh et al. 2013:27).....	27
Abbildung 14: Input- und Outputströme in einer Sortierstufe inkl. Berechnung von Ausbringen, Wertstoffausbringen und Reinheit in dieser Stufe (Wertstoffe: grün, eckig, Störstoffe: rot, rund).	29
Abbildung 15: Möglicher Anlagenaufbau einer Sortieranlage mit mittlerem Automatisierungsgrad mit FG: Feingut, GG: Grobgut, LG: Leichtgut und SG: Schwergut (Erstellt auf Basis von: Umwelt- und Energiewirtschaft NÖ 2015 und Kaiser et al. 2017).	32
Abbildung 16: Gegenüberstellung der Ausstattung von vier Kunststoffsortieranlagen in Österreich (Neubauer et al. 2020).....	33
Abbildung 17: Aufreißkamm mit versetzt angeordneten Rotorsternen und acht konzentrisch angeordneten Aufreißmeißeln je Element (Recycling-Portal 2018).....	35
Abbildung 18: Aufreißkamm in eingebautem Zustand über Rotortrommel mit Mitnehmern (Matthiessen 2021)	35
Abbildung 19: Skizze eines Kreisschwingsiebes (Kranert 2018:215).	37
Abbildung 20: Skizze eines Trommelsiebes (Bellocq et al. 2016).....	37
Abbildung 21: Spannwellensieb (links) und Funktionsprinzip (rechts) mit Kraftvektorpfeilen (AT-Minerals 2013).	37
Abbildung 22: Funktionsprinzipien von Windsichtern (Schwister 2010:101).....	39
Abbildung 23: Skizze eines Querstromsichters (Kranert 2018:234).....	40
Abbildung 24: Funktionsprinzip eines Ballistik-Separators (links) und Aufbau des Siebbodens mit durchgehenden Längselementen (Kranert 2018:237,238).....	41
Abbildung 25: Funktionsskizze eines Überbandmagneten (Kranert 2018:227).	42
Abbildung 26: Funktionsskizze eines Bandrollenmagnetscheiders (Kranert 2018:230).	43
Abbildung 27: Funktionsskizze eines Trommelmagnetscheiders (Kranert 2018:229).	43
Abbildung 28: Wirbelstromscheider mit exzentrisch angeordnetem Polrad (Kranert 2018:232).....	44
Abbildung 29: Schematischer Aufbau von Bandsortierern (oben) und Schurrensortierern (unten) (Robben und Wotruba 2019).	46
Abbildung 30: Positionierung der Robotersortierung ("Manipulation zone") nach der Materialerkennung ("Inspection zone") (Gundupalli et al. 2020).....	47
Abbildung 31: Elektromagnetisches Spektrum mit jeweiliger Wellenlänge und Frequenz (Gringer 2013).....	49

Abbildung 32: Funktionsprinzip der sensorgestützten Sortierung (SGS) am Beispiel der NIR-Messung (Uepping 2013:373).....	51
Abbildung 33: Visualisierung der räumlichen Auflösung. Links: Geringe Auflösung, Rechts: Hohe Auflösung (Marthinussen 2006:55).....	52
Abbildung 34: Veranschaulichung von Hyperspectral-Imaging (Mehta et al. 2018:2).....	53
Abbildung 35: Gegenüberstellung von Whiskbroom- und Pushbroom-Scanning (Erstellt auf Basis von Handschick et al. 2012:3).....	53
Abbildung 36: Übersicht über die verschiedenen Scanning Methoden (A) Whiskbroom (B) Pushbroom (C) Staring (D) Snapshot (Mehta et al. 2018:4).....	54
Abbildung 37: Fließbild einer SGS-Kombination mit Rougher, Scavenger und Cleaner.....	55
Abbildung 38: Schnittzeichnung einer Kanalballenpresse mit a) Materialaufgabe, b) Vorpresskammer c) Presskanal mit Pressstempel d) Abbindevorrichtung (Presona 2021).....	58
Abbildung 39: Eigenschaften verschiedener Abfallarten (n: niedrig, m: mittel, h: hoch, g: groß) (Kranert 2018:191)	59
Abbildung 40: Darstellung des Zusammenhanges zwischen Inputzusammensetzung, partikelbezogenem Wertstoffausbringen und Produktreinheit, sowie Produktmenge je Zeiteinheit eines Mustergemisches in Abhängigkeit vom Durchsatz (Je dunkler die Linie, desto höher der Ejectanteil im Input) (Küppers et al. 2020c).....	60
Abbildung 41: Einfluss der Inputzusammensetzung auf die Eject-Qualität dargestellt als Kurve des PO-Fehlaustrages (kg/h) in Abhängigkeit vom PET-Anteil im Input (Partikel-%) (Küppers et al. 2020a).....	61
Abbildung 42: Gegenüberstellung der Volumenströme von Siebinput (grau) und Siebüberlauf (schwarz) im zeitlichen Verlauf (Feil et al. 2019).....	64
Abbildung 43: Durchsatz eines Trommelsiebes gemessen über 25 min angegeben als sensorisch erfasste Bandbelegung (oben) und der rechnerisch bestimmten Schwankungsbreite (unten) jeweils als kurzfristige und langfristige Schwankungen (Curtis et al. 2020).....	65
Abbildung 44: Falschfarbenbild mit geringer Bandbelegung (links) und höherer Bandbelegung (rechts); Förderband: schwarz, Objekte: beige, grün, rot.....	68
Abbildung 45: Mögliche Positionen einer sensorischen Überwachung mit FG: Feingut, GG: Grobgut, LG: Leichtgut und SG: Schwergut.....	72
Abbildung 46: Positionierung der 3D-LT-Sensoren zur Überwachung des Volumenstromes im von Input bzw. Siebüberlauf (Feil et al. 2019).....	73
Abbildung 47: Restmüllanalyse in Niederösterreich eingeteilt nach Sammelsystem und Region in m.% (NÖ Umweltverbände 2019:29).....	l

Anhang

I. Restmüllanalyse in Niederösterreich



NÖ RM Analysen 2018/

Abbildung 47: Restmüllanalyse in Niederösterreich eingeteilt nach Sammelsystem und Region in m.% (NÖ Umweltverbände 2019:29).