

# Anforderungen an eine effiziente technologische Behandlung von Post-Consumer Verpackungsmaterialien in Sortieranlagen

## Möglichkeiten und Grenzen

### Requirements for an efficient technological treatment of post-consumer packaging materials in sorting plants

#### Possibilities and limits

Dr.-Ing. Alexander Feil, Nils Kroell, Prof. Dr.-Ing. Thomas Pretz und Prof. Dr. Kathrin Greiff

**Dr.-Ing. Alexander Feil**  
Oberingenieur  
Institut für Anthropogene Stoffkreisläufe (ANTS), RWTH Aachen University

**Nils Kroell, M. Sc.**  
Wissenschaftlicher Mitarbeiter  
Institut für Anthropogene Stoffkreisläufe (ANTS), RWTH Aachen University

**Prof. Dr.-Ing. Thomas Pretz**  
Universitätsprofessor i. R. Institut für Aufbereitung und Recycling (I.A.R.), RWTH Aachen University

**Prof. Dr. Kathrin Greiff**  
Universitätsprofessorin  
Institut für Anthropogene Stoffkreisläufe (ANTS) RWTH Aachen University

#### Zusammenfassung

Sortieranlagen sind die erste technologische Verarbeitungsstufe von Post-Consumer Verpackungsmaterialien (LVP). Mit Blick auf die anspruchsvollen werkstofflichen Verwertungsquoten sollten die in diesen Anlagen erzeugten Vorkonzentrate sowohl ein hohes Wertstoffausbringen als auch eine hohe Reinheit aufweisen. Verfügbare Daten zu den Sortierleistungen zeichnen hingegen ein eher ernüchterndes Bild. So konnten 2019 nur etwa 19 Ma.-% der anfallenden Post-Consumer Kunststoffabfälle als Output in Rezyklate überführt werden. Um gute Sortierergergebnisse zu erhalten, müssen die Stoffströme einer intensiven Vorkonditionierung auf der Artelebene unterzogen werden. Neuinstallationen von Sortieranlagen verfügen meist über mehrstufig angeordnete Trennprozesse, bei denen sowohl ein hohes Wertstoffausbringen als auch eine hohe Wertstoffanreicherung erzielt werden kann. Eine Modellrechnung hierzu zeigt den Nutzen mehrstufiger Sortierprozesse auf. Ein weiteres Kennzeichen moderner Anlagentechnik ist die Ergänzung der üblichen Nahinfrarot-Sortierung durch Multisensorik, um mehr Trennmerkmale für die abschließende Sortentrennung zu nutzen. Trotz dieser Verbesserungen, die i. W. eine Erweiterung des Anlagenbestandes darstellen, existieren eine Reihe betriebstechnisch ungelöster Herausforderungen, wie die derzeit mangelnde Option, Stoffströme sowohl volumetrisch als auch nach ihrer stofflichen Zusammensetzung adaptiv zu steuern. Neben den technischen Herausforderungen birgt auch die Materialzusammensetzung des Stoffstroms sowie das Design des Materials und der Produkte als auch die Sammeldisziplin ein hohes Potential für Reinheit und Wertstoffausbringen. Im vorliegenden Beitrag soll aufgezeigt werden, welche Faktoren den Prozesserfolg von LVP-Sortieranlagen nach Stand der Technik beeinflussen, welche derzeit noch ungelösten Herausforderungen durch technische Entwicklungen zukünftig evtl. einer Lösung zugeführt werden könnten und welche Grenzen hierbei zu beachten sind.

#### Abstract

Sorting plants are the first technological processing stage of post-consumer packaging materials (LWP). In view of the demanding mechanical recycling rates, the pre-concentrates produced in these plants should have both a high recyclable material yield and a high purity. Available data on sorting performance, however, paint a rather sobering picture. Thus, in 2019, only about 19 wt % of the post-consumer plastic waste generated could be transferred into recyclates as output. In order to achieve good sorting results, the material streams must be subjected to intensive preconditioning. New installations of sorting plants usually have separation processes arranged in several stages, in which both a high recyclable material yield and a high recyclable material enrichment can be achieved. A model calculation on this shows the benefits of multi-stage sorting processes. Another feature of modern plant technology is the addition of multi-sensor technology to the usual near-infrared sorting in order to use more separation features for the final sort separation. Despite these improvements there are still a number of unsolved operational challenges, such as the current lack of an option to adaptively control material flows both volumetrically and according to their material composition. In addition to the technical challenges, the material composition of the material flow and the design of the material and products, as well as the collection discipline, also have a high potential for purity and recyclable material output. This paper aims to show which factors influence the process success of LWP sorting plants according to the state of the art, which currently unsolved challenges could possibly be solved in the future through technical developments, and which limits must be considered.

## 1. Einleitung

Post-Consumer Verpackungsabfälle (LVP) sind mit 3,16 Mio. Mg/a der mengenmäßig relevanteste Kunststoffabfallstrom Deutschlands (Conversio Market & Strategy GmbH 2020). Dieser Abfallstrom wird in Deutschland nahezu flächendeckend in gelben Säcken/Tonnen bzw. Wertstofftonnen erfasst und in Sortieranlagen vorbehandelt. Die so erzeugten, wertstoffangereicherten Stoffströme werden als Vorkonzentrate in diverse werkstoffliche Verwertungsrouten überführt, während Reststoffe wie Sortierrest- oder Mischkunststofffraktionen i. d. R. thermisch verwertet werden (Abbildung 1).

Die Sortiertechnologie für getrennt erfasste Leichtverpackungen ist aktuell auf die stofflichen Anforderungen der nachgeschalteten Verwertungsrouten abgestimmt. Deren technisch-wirtschaftlichen Bedingungen führen zu Mindestqualitäten der Vorkonzentrate, die durch die Sortierung sichergestellt werden soll. Aktuell diskutierte alternative Verwertungswege des chemischen oder thermochemischen Recyclings (Wittstock 2021) werden ebenfalls mit qualitativen Mindestanforderungen verbunden sein. Inwieweit sich hier konkurrierende oder aber ergänzende Verhältnisse ergeben werden, kann derzeit noch nicht belastbar eingeschätzt werden.

Trotz verstärkter Investitionen in die Maschinenteknik aufgrund gesetzlicher Verschärfungen bei den geforderten Recyclingquoten (VerpackG 2017) sind die Ergebnisse des werkstofflichen Recyclings bisher allerdings ernüchternd: 2019 konnten nur etwa 19 Ma.-% (1,02 Mio. Mg/a) der anfallenden Post-Consumer Kunststoffabfälle als Output in Rezyklate überführt werden, lediglich 8 Ma.-% (0,43 Mio. Mg/a) wurden zur Substitution von Neuware eingesetzt. (Conversio Market & Strategy GmbH 2020)

Die Ursachen für diese noch unbefriedigende Ausbeute sind vielfältig. So weisen die gesammelten LVP-Mengen erhebliche Anteile an Fremdstoffen und stoffgleichen Nichtverpackungen auf. Ein mittlerer Gehalt an systemfremden Abfällen im LVP-Input von etwa 26 Ma.-% sowie von rund 17 Ma.-% an werkstofflich nicht verwertbarem Kunststoff-Anteil (Christiani 2017) reduziert zwangsläufig die technisch mögliche Ausbeute bei Sortierprozessen. Diese wiederum müssen nicht nur auf ein hohes Wertstoffausbringen, sondern auch auf eine Mindestreinheit parametrisiert werden. Die weit gefächerte Stoffvielfalt führt schließlich bei den Einzelkorn-Sortierprozessen dazu, dass mit Ausbringungsverlusten von 35–40 Ma.-% (Kuchta & Picino 2020) erhebliche Wertstoffverluste in Kauf genommen werden müssen. Gleichzeitig dokumentieren eine Reihe von Untersuchungen unzureichende Reinheiten der in Sortieranlagen produzierten Vorkonzentrate, die teilweise erheblich von den geforderten Reinheitsanforderungen der DSD-Spezifikationen abweichen (EU Recycling 2018; bvse-Fachverband Kunststoffrecycling 2017). Liegen die Qualitäten der erzeugten Vorkonzentrate aus den Sortieranlagen erheblich unter den technischen Mindestanforderungen der nachgeschalteten Recyclinganlagen, sind negative Auswirkungen auf die Qualität der erzeugten Kunststoffrezyklate zu erwarten, wodurch deren vermehrter Einsatz zur Substitu-

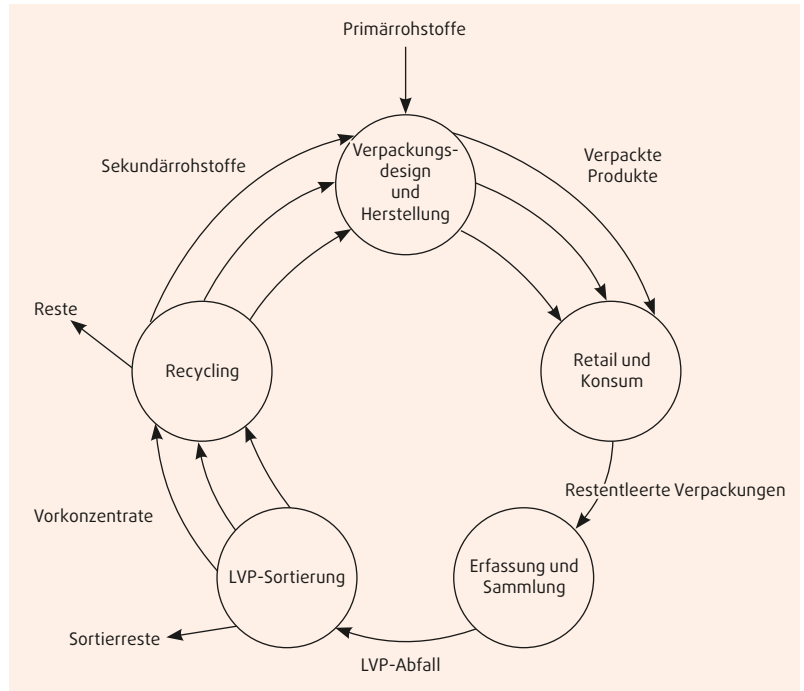


Abbildung 1  
Verwertungswege  
für Post-Consumer  
Leichtverpackungen  
(vereinfachte  
Darstellung).

tion von Neuware gehemmt wird (Hahladakis und Iacovidou 2018; IK Industrievereinigung Kunststoffverpackungen e.V. 2019).

Soll das Ausbringen von Sekundärkunststoffen aus Post-Consumer Abfällen nachhaltig gesteigert werden, ist die Ausbeute an qualitativ hochwertigen Kunststoff-Vorkonzentrat aus LVP-Sortieranlagen deutlich zu erhöhen. Dazu sind einerseits verfahrenstechnische Verbesserungen erforderlich, andererseits gilt es aber auch, die stoffliche Vielfalt durch verbesserte Verpackungen unter dem Gesichtspunkt recyclinggerechten Designs signifikant einzuschränken.

Im vorliegenden Beitrag soll aufgezeigt werden, welche Faktoren den Prozesserfolg von LVP-Sortieranlagen nach Stand der Technik beeinflussen und welche derzeit noch ungelösten Herausforderungen durch technische Entwicklungen zukünftig evtl. einer Lösung zugeführt werden können und welche Grenzen hierbei zu beachten sind.

## 2. Aufbau von LVP-Sortieranlagen

Deutschland verfügt über einen Anlagenbestand von ca. 150 LVP-Sortieranlagen, wovon rund 50 Anlagen im Wettbewerb mit einer zeitlich befristeten Stoffzuweisung beauftragt werden. Die Anlagenkapazität und der technische Ausrüstungsstand variieren stark; so existieren Anlagen in Kapazitätsbereichen von ca. 20.000 bis ca. 125.000 Jahrestonnen; auch die Komplexität der Prozesse sowie der Modernisierungsgrad schwanken beim Anlagenbestand in weiten Bereichen. Eine hohe Sortiertiefe und einen hohen Automatisierungsgrad weisen insbesondere die Anlagen mit Kapazitäten von etwa 100.000 Mg/a auf, die in den letzten 10 Jahren errichtet worden sind.

### 2.1 Technologische Grundstruktur

Bei allen Unterschieden folgt die *mechanisch-physikalische* Behandlung von Post-Consumer Verpackungsab-

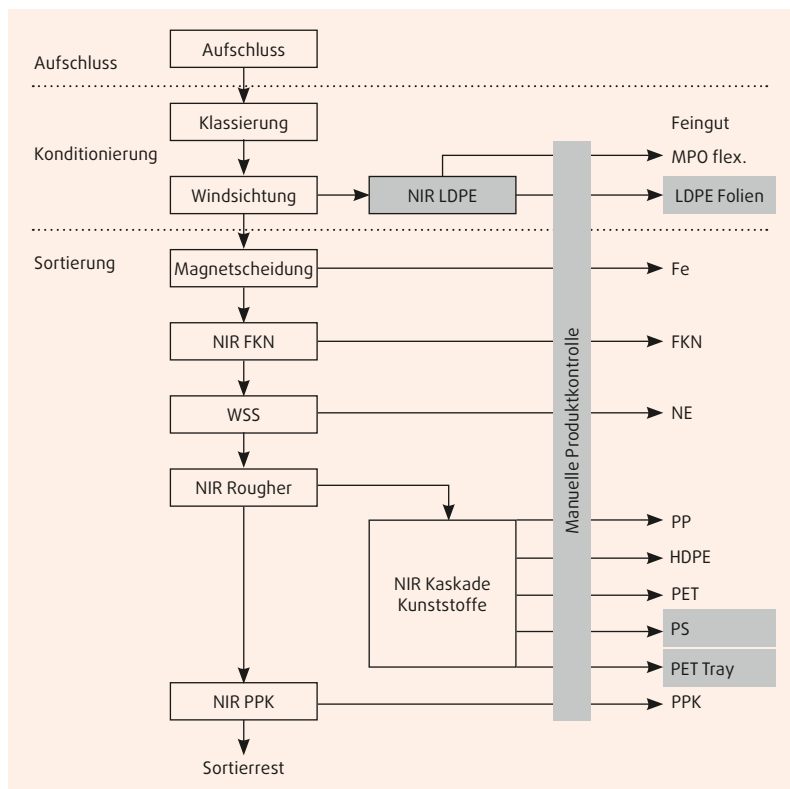


Abbildung 2  
Verwertungswege für Post-Consumer Leichtverpackungen (vereinfachte Darstellung); grau hinterlegt: optional.

fallen in Sortieranlagen dem Verfahrensablauf in der konsekutiven Abfolge Aufschluss, Vorkonditionierung und Sortierung mit abschließender Verpressung der Sortierprodukte (Abbildung 2).

In der *Aufschlussstufe* sollen nur die Transport- und Sammel-Gebinde (Haushalts-Abfallbeutel und gelbe Säcke) aufgerissen werden, ohne dass die Artikeleigenschaften des Inhalts (bspw. Kunststoffflaschen oder Getränkekartonagen) zerstört werden. Zur Gebindeöffnung werden Sackaufreißer, Schneckendosierer oder – bei Durchsätzen > 10 Mg/h häufig – Kammwalzenzerkleinerer eingesetzt. Die nachfolgende *Vorkonditionierung*, bestehend aus Siebklassierung, Windsichtung und ggf. Ballistikseparation, bereitet den Stoffstrom auf die eigentliche Sortentrennung vor. In den Sortierstufen wird die gezielte Anreicherung bestimmter Stoffeigenschaften in Vorkonzentrate durch Abtrennung von Fremdbestandteilen angestrebt.

## 2.2 Sortiertechnik

Werthaltige Produkte fallen in LVP-Sortieranlagen als Ergebnis eines Sortierprozesses an, der aufgrund der erforderlichen hohen Durchsatzraten maschinell durchgeführt wird. Nur noch in Einzelfällen, z. B. zur abschließenden Qualitätskontrolle, kommt eine manuelle Sortierung („Klaubung“) zum Einsatz. Eine händische Sortentrennung findet sich nur noch in Sortieranlagen, die für geringe Jahreskapazitäten konzipiert wurden. Die verschiedenen Verpackungsmaterialien werden je nach Stoffart und Artikeleigenschaften in unterschiedlichen Aggregaten sortiert, deren gemeinsames Merkmal eine *Einzelkorn-Sortierung* ist.

Von herausragender Bedeutung für die Anlagengestaltung von LVP-Sortieranlagen und die Sortierung vorrangig von kohlenstoffhaltigen Stoffen ist die *sensorgestützte Sortierung (SGS)*, die im Abfallbereich seit

etwa 3 Dekaden zum Einsatz kommt. Während die Separierung zu Beginn des Einsatzes dieser Technik ausschließlich über die chemische (Oberflächen)-Zusammensetzung mittels Nahinfrarottechnik (NIR) erfolgte, können heute durch Verschaltung unterschiedlicher Sensoren („Multisensorik“) weitere Unterscheidungsmerkmale wie Artikelform, Farbe und Metallgehalt zur verbesserten Sortentrennung genutzt werden.

Bei Nahinfrarot (NIR)-Detektoren erfolgt die Spektralanalyse im Nahinfrarotbereich von ca. 780 nm bis ca. 2.500 nm. Die Erkennung der meist für kurzlebige Verpackungen verwendeten Kunststoffarten wie bspw. Polyethylen (PE), Polypropylen (PP), Polyethylenterephthalat (PET), Polystyrol (PS) oder Polyvinylchlorid (PVC), ist ebenso möglich wie von bspw. Flüssigkeitskartonagen (FKN), Papier, Pappe und Kartonagen (PPK) oder biologisch-abbaubaren Kunststoffen wie Polymilchsäure (PLA) (Chen et al. 2021; Pellenc ST SAS 2021; RED-WAVE 2021; STEINERT GmbH 2021a; TOMRA Systems GmbH 2021a).

Durch Bestrahlung im sichtbaren Lichtspektrum (VIS; 380 nm–780 nm), können zusätzlich optische Artikelmerkmale wie bspw. Farbe und Form mittels hochauflösender RGB-Farbzeilenkameras detektiert werden. Neben der Nutzung von RGB-Sensordaten zur Farbsortierung nach Stand der Technik nutzen neueste Entwicklungen die aufgenommenen Farbbilder zur objektbasierten Klassifizierung verschiedener Verpackungstypen mittels Deep Learning bspw. zur Differenzierung von PE-Silikonkartuschen mit Silikonrestinhalten, die sich negativ auf den nachfolgenden Recyclingprozess auswirken, von anderen PE-Hohlkörpern (STEINERT GmbH 2021b, TOMRA Systems GmbH 2021b).

Im Falle des heterogenen und vergleichsweise grobstückigen Stoffstroms in Post-Consumer Verpackungsmaterialien sind zur Vermeidung von unerwünschten Relativbewegungen von Artikeln in Sortieranlagen *Bandsortierer* am besten geeignet (Abbildung 3). Der verarbeitbare Artikelgrößenbereich liegt bei diesen Aggregaten meist zwischen 12,5 mm und 250 mm. Nach pixel- oder objektbasierter Klassifizierung auf Basis der erfassten Sensordaten (s. o.) erfolgt die Sortierung des Stoffstroms einzelkornweise auf Basis koordinatengenaue Luftdruckstöße in zwei oder seltener drei Zielfraktionen (*Eject* und *Drop*).

Nichteisen (NE)-metallhaltige Fraktionen sind im LVP-Gemisch insbesondere Aluminium-Schalen und -deckel, aber auch Folien, Getränke- und Tierfutterdosen sowie Kosmetikverpackungen, wobei Aluminium als Metall mit mehr als 80 Ma.-% dominiert. NE-Metall-Artikel werden unter Nutzung ihrer elektrischen Leitfähigkeit in einem wechselnden Magnetfeld durch *Wirbelstromscheider* (WSS) abgetrennt. Um Fehlausträge von Getränkekartonagen in die NE-Metallfraktion zu unterbinden, werden WSS prozesstechnisch i. d. R. einer Abtrennung der FKN-Fraktion mittels NIR-Sortierer nachgeschaltet.

Für die Abtrennung von magnetisierbaren Produkten werden *Magnetscheider* eingesetzt, die je nach Bauform aushebend oder abwerfend arbeiten. Auch aus Gründen des Maschinenschutzes kommen Magnetscheider in verschiedenen Anlagenbereichen zum

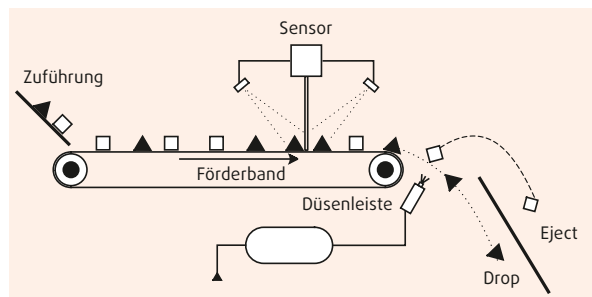


Abbildung 3  
Aufbau und Funktionsweise eines sensorgestützten Bandsortierers.

Einsatz (z. B. vor einem WSS). In den LVP-Gemischen dominieren Weißblechartikel wie Getränke- und Konservendosen, allerdings werden auch diverse Verbunde mit relevantem Anteil an magnetisierbarem Metall sortiert.

### 3. Optimierung der Vorkonditionierung

#### 3.1 Anforderungen

Bei der Prozessierung in Sortieranlagen sind besonders folgende Anforderungen an den Stoffstrom zu stellen, wenn gute Sortiererergebnisse angestrebt werden:

##### 3.1.1 Begrenzung des Feinkornanteils

Das im LVP enthaltene Feinkorn ist Störstoff und kann bis zu 10 Ma.-% Anteil am Gesamtmaterial aufweisen. Erhöhte Feinkornanteile wirken sich neben einer Qualitätsminderung der Wertstofffraktionen ebenfalls negativ auf nachfolgende Sortierprozesse aus. Ein störungsfreier Anlagenbetrieb wird hierbei insbesondere durch Zusetzen von Sensoren und Ausblasvorrichtungen der Sensorsortierer sowie durch anhaftendes Feinkorn auf Förderflächen erschwert. Neben erhöhtem Reinigungsaufwand und Aggregatverschleiß sind reduzierte Sortierleistungen der durch Feinkornanhaftungen eingeschränkten Sortieraggregate zu erwarten.

##### 3.1.2 Separierung in zwei- und dreidimensionale Stoffströme

Leichtverpackungen weisen sowohl zwei- als auch dreidimensionale Formen auf. Die Separierung von einerseits körperförmigen (3D) Anteilen wie z. B. Flaschenkörpern und Bechern und andererseits flächigen (2D) Folienartikeln sollte aufgrund des formbeeinflussenden Prozessverhaltens insbesondere bei großen Volumendurchsätzen unbedingt vor der Sortierstufe erfolgen. So wirken sich Folien aufgrund ihrer flächenhaften Ausdehnung und ihres geringen Flächengewichtes störend auf die Sortierung körperförmiger Artikel aus. Auf sensoroptischen Bandsortierern können Folien durch das Überdecken von Partikeln („Maskierung“) sowohl den Austrag als auch die Erkennung (Bandsortierer) massiv beeinträchtigen. Zudem führen Folien auf Bandsortierern zu einer unerwünschten Partikel-Eigenbewegung, die bei konventionellen Bandsortierern nur durch deutliche Reduzierung der Bandgeschwindigkeit begrenzt werden kann (s. auch Abschnitt 3.1.4). Neben schlechterer Trenngüte führen folienbeladene Stoffströme somit auch zu einer Minderung des Durchsatzes.

#### 3.1.3 Definiertes Kornband

Sensoroptische Sortierer nutzen für den selektiven Partikelaustrag eine druckluftgespeiste Düsenleiste, deren Druckluftstoß die Artikel flächenabhängig ausblasen kann, von seiner Intensität aber nicht modulierbar ist (vgl. Abbildung 3). Bei Wirbelstromscheidern erfolgt die Separation von nichtleitenden und elektrisch leitenden Artikeln durch magnetische Abstoßungskräfte, die im Ergebnis zu unterschiedlichen Wurfweiten führen. Neben dem stoffspezifischen Quotienten aus Leitfähigkeit und Dichte, die Einfluss auf die Abstoßungskraft haben, beeinflussen zudem Kornform und Artikelgröße die Flugbahn der Partikel.

Enge Korngrößenfraktionen bewirken durch ähnliche Flugeigenschaften somit einen positiven Einfluss auf die Trenngüte von sensoroptischen Sortierern und WSS. Im Anlagenbetrieb wird daher häufig ein definiertes Aufgabekornband im Bereich von oberer zu unterer Korngröße im Verhältnis von 3 bzw. 4:1 angestrebt.

#### 3.1.4 Einhaltung von Einzelkornbedingungen

Konventionelle Dichtentrennverfahren und die Siebklassierung benötigen für die Separation ein Kollektiv aus vielen Einzelstücken, um trennunterstützende Schüttungseigenschaften zu erzielen. Im Gegensatz dazu kann die Sortierung auf Sensorsortierern und WSS nur *einzelkornbasiert* erfolgen. Die Kraftwirkung der auslösenden Kraft (Druckluftimpuls oder magnetische Abstoßungskraft) und anschließende Wurfbewegung dürfen daher nicht durch andere Partikel beeinflusst werden.

Dies hat bei WSS zur Konsequenz, dass die Partikel im Wirkungsfeld des magnetischen Wechselfeldes in einer Monoschicht und somit überlappungsfrei vorliegen müssen. Bei der Sensorsortierung sind die Herausforderungen indes noch höher: Da jedes Einzelstück für die digitale Trennung digital erfasst werden muss und im Bereich des Druckluftstoßes keine unerwünschten Wechselwirkungen infolge Luftwirbel benachbarter Druckluftstöße auftreten dürfen, ist zusätzlich zur Monoschicht ein räumlicher Abstand zu angrenzenden Partikeln anzustreben.

#### 3.1.5 Einhaltung kapazitiver Grenzen (Vermeidung von Über- und Unterfüllung)

Bei der Nutzung von Klassier- und Sortieraggregaten sollte unbedingt darauf geachtet werden, dass die Beaufschlagung der Aggregate im bestimmungsgemäßen kapazitiven Bereich liegt. Wird diese überschritten, kommt es zu Überfüllungen und die Trenneffizienz des Prozesses verringert sich. Im Falle der Sortierung auf den Bandsortierern führt eine Überfüllung dazu, dass sowohl die erforderliche Vereinzelung als auch eine artikelselektive Stoffstromausschleusung nicht mehr erreicht werden kann, wodurch sich sowohl das Wertstoffausbringen als auch die Produktreinheit verschlechtert. Wird das Aggregat hingegen unterhalb seiner kapazitiven Auslastung betrieben, werden die Möglichkeiten des Anlagenbetriebes nicht umfassend genutzt, die mengen-spezifischen Betriebskosten erhöhen sich. Ein Extremzustand stellt hierbei der Anlagenleerlauf dar.

## 3.2 Technische Lösungen

### 3.2.1 Siebklassierung

Die Siebklassierung hat die Aufgaben, einerseits Feinkorn abzutrennen (vgl. Abschnitt 3.1.1), andererseits definierte Korngrößenbereiche zu schaffen (vgl. Abschnitt 3.1.3). Aufgrund des hohen flächigen Anteils im Stoffstrom werden zur Klassierung des Stoffstroms Trommelsiebe, inzwischen auch zunehmend Flächensiebe, eingesetzt. Diese überführen den Stoffstrom in eine Feinkornfraktion, ein oder zwei Mittelkorn- und eine Grobkornfraktion, bspw. < 40 mm, 40 mm–120 mm, 120 mm–220 mm, > 220 mm. Die Siebschnitte sollten zudem so gewählt werden, dass die Mittelgutfraktion(en) annähernd gleich große Volumenströme aufweisen.

Die Ausgestaltung der Siebklassierung erfolgt in der Praxis unterschiedlich, mit erheblichen Auswirkungen auf die Siebgüte und somit auf die Qualität der Siebfractionen als auch auf den Kosten- und Platzbedarf: In vielen Anlagen wird aus Gründen verringerter Anschaffungskosten und beengter Platzverhältnisse die Siebung mit zwei Siebschnitten in einer Siebmaschine realisiert (Variante 1 (V1); Abbildung 4). Prozesstechnisch ist diese Variante allerdings nachteilbehaftet, da hierbei die Siebung von fein nach grob erfolgen muss und somit zu Beginn der Siebung die siebschwierige Aufgabe der Feinkornsiebung mit dem größten Siebrückstand, also dem größten Volumenstrom, verbunden ist.

Technologisch vorteilhafter ist es grundsätzlich, die Siebung von grob nach fein durchzuführen, da im ersten Schritt der Volumenstrom bereits deutlich reduziert wird, bevor die anspruchsvollere Feingutsiebung stattfindet (Variante 2 (V2)); s. Abbildung 4. Die Feingutabtrennung wird zudem dadurch verbessert, dass bei zwei Siebmaschinen insgesamt mehr offene Siebfläche dem Stoffstrom zur Verfügung gestellt wird, wodurch die Wahrscheinlichkeit des Feinkorndurchgangs durch den Siebelag erhöht wird. Nachteil dieser Variante ist der deutlich höhere Platzbedarf sowie höhere Investitionskosten für mehr Maschinentchnik (Pretz et al. 2017).

Darüber hinaus führen Über- und Unterfüllungen des Trommelsiebes zu einer verringerten Siebgüte, da bei Überfüllung die Durchgangswahrscheinlichkeit von Feinkorn in den Siebdurchgang verringert und bei Unterfüllung die Verweildauer im Siebkörper durch das „Springen“ einzelner Abfallstücke reduziert wird. Eine gleichmäßige volumetrische Beaufschlagung von Siebmaschinen liefert daher in Verbindung mit einer Siebung von grob nach fein die besten Siebergebnisse.

### 3.2.2 Windsichtung

Erst nach effizienter Feinkornsiebung erfüllt ein Stoffstrom die Bedingungen für eine Windsichtung. Dieser Prozess sortiert ein Stoffgemisch nach Form und Dichte. Stoffströme werden dabei nach den Vorgaben von Abschnitt 3.1.2 in eine 2D- und 3D-Fraktion bzw. Leicht- und Schwergutfraktion separiert.

Die Qualität der Trennung im Windsichter wird insbesondere durch diffuse Materialeigenschaften, bspw. durch nicht aufgeschlossene Verbundmaterialien oder Restinhalte, sowie die Effizienz der vorgeschal-

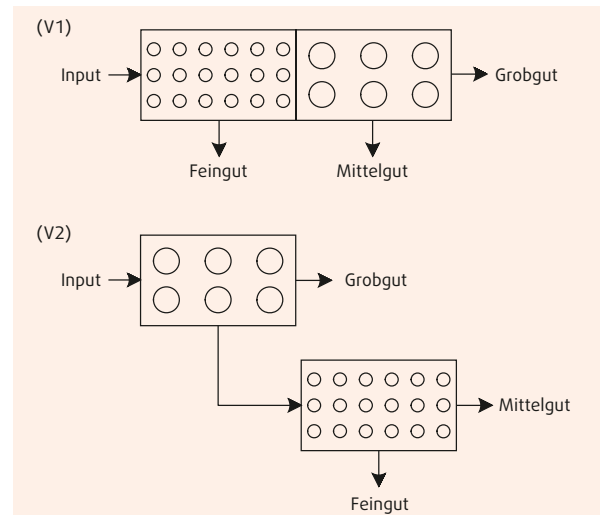


Abbildung 4  
Umsetzung der Siebklassierung in Sortieranlagen (Varianten V1 und V2).

teten Trennprozesse, bspw. der Siebklassierung (Abschnitt 3.2.1), beeinflusst. Überfüllungen in der Zuführung zum Windsichter sollten unbedingt vermieden werden, da für eine gute Trennwirkung eine maximale Feststoffbeladung, die material- und korngrößenabhängig ist, nicht überschritten werden sollte.

Gute Trennergebnisse im Windsichter erfordern insgesamt eine sehr präzise Festlegung von Anforderungen, um das Zusammenspiel von Trenngeschwindigkeit und damit Luftvolumenumsatz im Trennraum und der Luftabfuhr des flugfähigen Materials passgenau auf die Aufgabenstellung auszuliegen.

### 3.2.3 Ballistikseparation

Die Trennung nach Partikelform und somit vorrangig nach Arteikeigenschaften erfolgt über Ballistikseparatoren. In Sortieranlagen werden diese optional eingesetzt, um flächige Partikel (Folien und Papiere) von vorrangig rollfähigen, körperförmigen Kunststoffen sowie Getränkekartonagen zu trennen. Die Trenngüte von Ballistikseparatoren ist bereits alleine wegen Formänderungen nicht artikelselektiv, wie Untersuchungen zur Trennung von Getränkekartons aufgezeigt haben (Feil et al. 2016). So können diese, insbesondere bei Restinhalten, ihre 3D-Struktur behalten, bei starker Kompaktierung z. B. bei hoher Verdichtung in Pressmüllfahrzeugen, allerdings auch als 2D-Material vorliegen. In diesen Fällen werden die wertstoffhaltigen Getränkekartons sowohl in 2D (Verlust) als auch 3D-Fractionen überführt.

Die Vorteile von Ballistikseparatoren liegen insbesondere in der Vorbereitung des Stoffstroms für die nachfolgenden Sortierstufen, die eine Präsentation des Stoffstroms als vereinzelt Monoschicht erfordern. Durch Verwendung von Siebelagen in den Padsegmenten kann zudem eine Dreiproduktentrennung, d. h. mit zusätzlicher Feinkornabtrennung, realisiert werden.

## 4. Mehrstufige Trennprozesse

Nach der Vorkonditionierung erfolgt die Trennung in die materialspezifischen Vorkonzentrate. Die Zielset-

## Post-Consumer-Verpackungsmaterialien in Sortieranlagen

zung, möglichst viel Sekundärrohstoff dem werkstofflichen Recycling zuzuführen, erfordert sowohl die Einhaltung vorgegebener Qualitätsvorgaben (Konzentration  $c_i$ ) als auch ein hohes Wertstoffausbringen  $R_w$ . Die Konzentration  $c_i$  nach Formel (1) ist definiert als das Verhältnis von Wertstoffmasse ( $\dot{m}_{w,i}$ ) zur Gesamtmasse ( $\dot{m}_i$ ). Das Wertstoffausbringen nach Formel (2) ist der Anteil des Wertstoffs in der Aufgabe ( $\dot{m}_{w,Input,i}$ ) der in die Produktfraktion ( $\dot{m}_{w,Produkt,i}$ ) überführt wird.

$$c_i = \frac{\dot{m}_{w,i}}{\dot{m}_i} \quad (1)$$

$$R_w = \frac{\dot{m}_{w,Produkt,i}}{\dot{m}_{w,Input,i}} = \frac{c_{i,Produkt} * \dot{m}_{Produkt,i}}{c_{i,Input} * \dot{m}_{Input,i}} \quad (2)$$

Sortieranlagen der neueren Generation zeichnen sich dabei im Regelfall durch eine effiziente Siebklassierung (Klassierung von grob nach fein, s. Abschnitt 3.2.1) und *mehrstufige* Sortierstrecken aus. In diesem Fall können Vorkonzentrate verlustreduziert (d. h. hohes  $R_w$ ) und mit hoher Reinheit (d. h. hohes  $c_i$ ) erzeugt

werden. Verfügt die Sortieranlage hingegen nur über eine einstufige Sortierstrecke, kann der Aufbereitungsprozess entweder nur auf ein hohes  $R_w$  oder eine hohe Reinheit  $c_i$  ausgerichtet werden. Anhand der folgenden vereinfachten Modellrechnung soll aufgezeigt werden, in welchem Umfang die Anlagenperformance durch vertiefte Sortierung (mit und ohne nachgeschalteter Reinigungsstufe (Scavenger)) verbessert werden kann.

Für eine LVP-Sortieranlage mit einem Einzugsgebiet von 2 Mio. Einwohner ergibt sich bei durchschnittlich 32 kg/E\*a LVP-Sammelmenge pro Kopf (Destatis 2021) eine zu verarbeitende Jahresmenge von 64.000 Mg/a und eine Nettokapazität von 16 Mg/h bei 4.000 Betriebsstunden pro Jahr. Zwei Anordnungen der Sensorsortierstufen werden gegenübergestellt: In *Anordnung A1* erfolgt die sensorgestützte Sortierung der Kunststofffraktionen zweistufig. Hierbei reicht ein NIR-Rougher zunächst die Zielkunststoffe PP, PE, PET und PS an. Anschließend sortieren vier NIR-Refiner die jeweiligen Zielkunststoffe PP, PE, PET und PS aus.

In *Anordnung A2* erfolgt die Sortierung dreistufig, indem eine zusätzliche Scavenger-Stufe verbleibende

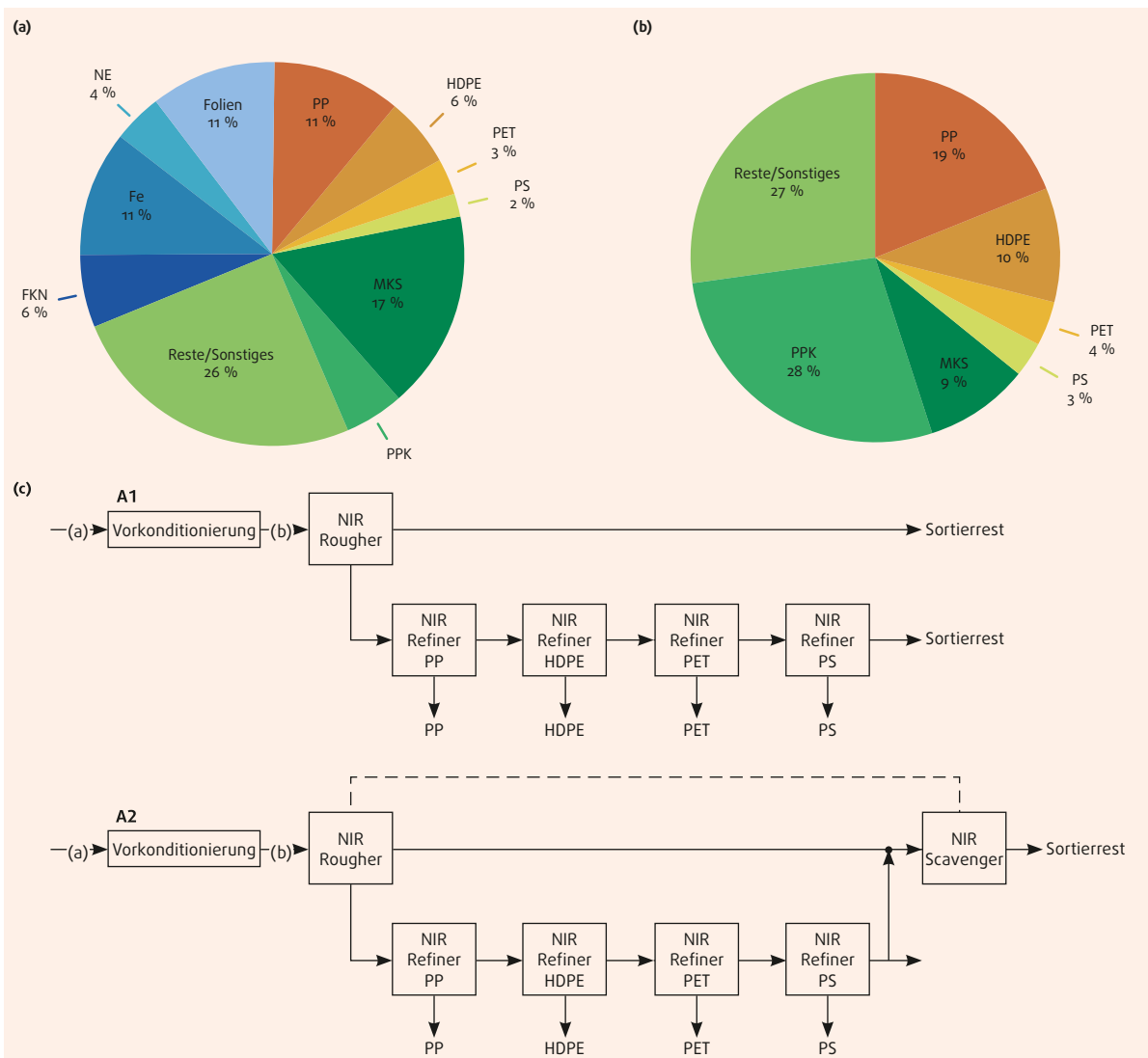
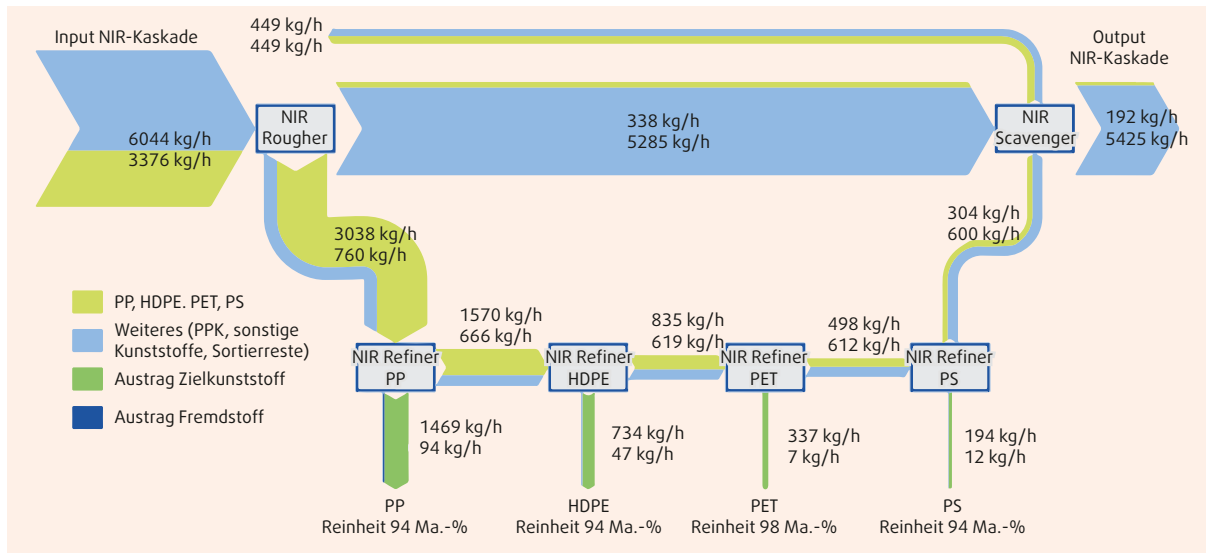


Abbildung 5  
Stoffstromzusammensetzung und Fließbild der Modellrechnung. (a) angenommene Inputzusammensetzung nach (Christiani 2017) (Polyolefinfraktion vereinfacht aufgeteilt in PP und PE im Verhältnis 2:1), (b) vereinfachte Stoffstromzusammensetzung nach Abtrennung der Feinfraktion und Wertstofffraktionen Fe, NE, FKN und Folien nach Vorkonditionierung und Metalltrennung, (c) modellierte Fließbildanordnungen A1 und A2.

Abbildung 6  
Stoffstromflüsse der modellierten NIR Kaskade (Anordnung A2).



Wertstoffe aus den Restfraktionen zurückgewinnt und der Rougherstufe erneut zuführt (s. Abbildung 5c).

Auf Basis einer mittleren LVP-Inputzusammensetzung nach Abbildung 5a ergibt sich nach Abtrennung von 10 Ma.-% Feingut durch die Siebklassierung sowie der Wertstofffraktionen Folien, FKN, Fe und NE aus vorgelagerten Sortierstufen (vgl. Abschnitt 2) die Stoffstromzusammensetzung zu Beginn der NIR-Kunststoffsartierung nach Abbildung 5b. Um die Sortierperformance beider Anordnungen vergleichen zu können, werden einzelne Sensorsortierer durch ein aggregatspezifisches Wertstoffausbringen  $R_w$  und erzielter stoffstromspezifischer Produktreinheit  $c_i$  nach Tabelle 1 modelliert. Kreuzkontaminationen (bspw. Fehlaustrag von PET bei der Aussortierung von PP) werden in der vorliegenden Modellrechnung der Vereinfachung halber vernachlässigt und Fremdstoffe in den jeweiligen Zielfraktionen setzen sich folglich aus der Fraktion „Sonstige“ zusammen.

Im Ergebnis der Modellrechnung zeigt sich, dass unter den getroffenen Annahmen durch den NIR-Scavenger das Wertstoffausbringen der gesamten NIR-Kaskade von 81,0 Ma.-% (A1) auf 94,3 Ma.-% (A2) gesteigert werden kann. Durch die Steigerung des Wertstoffausbringens um 13,3 Ma.-%-Punkte ließen sich somit 449 kg/h Wertstoffe zurückgewinnen, was einer zusätzlichen Wertstoffausbeute von 1.796 Mg/a entspricht (s. Abbildung 6).

## 5. Verbleibende Optimierungspotentiale

Bei kompletter Berücksichtigung vorgenannter Maßnahmen existieren dennoch eine Reihe weiterer technischer Herausforderungen, die bislang nicht oder nur unzureichend in Sortieranlagen gelöst worden sind.

### 5.1 Volumenstromhandling (Materialbeschickung)

Um schlechte Trenneffizienzen infolge von Überfüllungszuständen zu vermeiden, sollte eine geordnete, kontrollierte und gleichmäßige Materialzuführung in den kontinuierlichen Sortieranlagenbetrieb angestrebt werden. Ungünstige Materialeigenschaften von LVP-Gemischen – neben den nicht vorhandenen Schüttguteigenschaften variieren Menge und stoffliche Zusammensetzung jedes einzelnen gelben Sacks – hoher Mengendruck und bislang fehlende technische Möglichkeiten zur Volumenstrombeeinflussung von LVP-Materialien erschweren in der Realität häufig eine gleichmäßige Materialbeaufschlagung der LVP-Sortieranlage. Es liegt daher nahe, dass Phasen mit geringer oder keiner Materialbeschickung – verursacht durch Pausen, Anlagenstillstände oder anderen auszuführenden Ladetätigkeiten – durch Phasen mit erhöhter Beladung kompensiert werden, um betriebliche Vorgaben zum Mengendurchsatz einzuhalten. In Abbildung 7 ist der Zustand für eine betriebsübliche Beschickung (grauer Linienverlauf) in der technischen

Tabelle 1  
Modelliertes Wertstoffausbringen und Reinheiten der Produktfraktionen je Sortieraggregat.

Sortierstufe	$R_w$	Quelle	$c_i$	Quelle
NIR Rougher	90 Ma.-%	Annahme	80 Ma.-%	Annahme
NIR Refiner PP	90 Ma.-%	Eigene Untersuchungen	94 Ma.-%	DSD-Spez. 324
NIR Refiner PE	90 Ma.-%	Eigene Untersuchungen	94 Ma.-%	DSD-Spez. 329
NIR Refiner PET	90 Ma.-%	Eigene Untersuchungen	98 Ma.-%	DSD-Spez. 328-1
NIR Refiner PS	90 Ma.-%	Eigene Untersuchungen	94 Ma.-%	DSD-Spez. 331
NIR Scavenger	70 Ma.-%	Annahme	50 Ma.-%	Annahme

**Konstellation** Kammwalzenzerkleinerer/Trommelsieb des mechanischen Teils einer mechanisch-biologischen Behandlungsanlage dargestellt. Wie ersichtlich, zeigt sich eine stark schwankende Beaufschlagung über die aufgenommene Betriebsdauer; zudem wird das Trommelsieb mehrfach oberhalb seiner kapazitiven Grenze überfahren.

Im Rahmen des Forschungsvorhabens „Energieeffiziente Abluftbehandlung“ (EnAB 2 2017) konnte gezeigt werden, dass sich durch dosierte Radladerbeaufschlagung und Nutzung eines Zweiwellen-Kammwalzenzerkleinerers ein spürbarer Vergleichmäßigungseffekt des Stoffstroms grundsätzlich erreichen lässt, wenn dabei auch Austragsspitzen nicht sicher verhindert werden können.

Auch wenn erste Schritte gemacht worden sind, um das wichtige Thema der Stoffstrombeeinflussung einer methodischen Lösung zuzuführen (siehe z. B. Feil et al. 2019), erfordern betriebssichere Lösungen noch erheblichen Forschungsbedarf zum Thema.

### 5.2 Prozessparametrierung

Eine weitere Herausforderung liegt darin begründet, dass in Sortieranlagen die Prozessparametrierung bislang nicht *adaptiv* auf wechselnde Stoffeigenschaften, sondern lediglich „statisch“, d. h. auf mittlere stoffliche Bedingungen eines zu erwartenden Stoffstroms, eingestellt wird. Als Ergebnis einer bildgebenden Sensorik könnte dann eine positive Beeinflussung des Prozessgeschehens durch spezifische Prozessparametrierung (z. B. variable Einstellgrößen bei Zerkleinerung, Klassierung, Sortierung, etc.) erfolgen. Entsprechende Steuerungs- oder Regelungsmaßnahmen erfordern die systemische Einbindung in Prozessleitsysteme und detaillierte Erkenntnisse von prozesstechnischen Ursache-Wirkprinzipien. Die Regelbarkeit wird dabei auch von der Heterogenität der Stoffströme bestimmt. Bei Post-Consumer Abfallstoffen ist noch unklar, ob und in welchem Umfang gerichtete Steuerungsmaßnahmen überhaupt technisch handhabbar sind, da deren Stoffströme erhebliche zeitliche und stoffliche Heterogenitäten aufweisen.

### 5.3 Verpackungsdesign

Ungeachtet der Umsetzung vorgenannter Optimierungsmaßnahmen und evtl. neuer wissenschaftlicher Erkenntnisse bzgl. Stoffstromvergleichmäßigung, Anlagenparametrierung und datentechnische Rückverfolgbarkeit stoßen Sortierprozesse z. B. bei hohem Verschmutzungsgrad des Sammelgutes sowie sortierungünstigem Design von Verpackungsartikeln an ihre Grenzen.

Sensoroptische Verfahren wie mittels NIR- oder VIS-Detektoren sind Reflexionsverfahren und erfassen die Materialoberflächen mit nur geringer Eindringtiefe. Sind die Oberflächen aber durch Feuchte oder Verschmutzungen „maskiert“, wird eine Identifizierung nach Farben oder Polymerart schwierig bis unmöglich.

Erheblich problematischer aber als Materialverunreinigungen erscheint mit Blick auf effiziente Sortierprozesse die Thematik des recyclingfreundlichen Designs von Leichtverpackungen, da dadurch die grundsätzliche *Sortierfähigkeit* erheblich beeinflusst wird. So

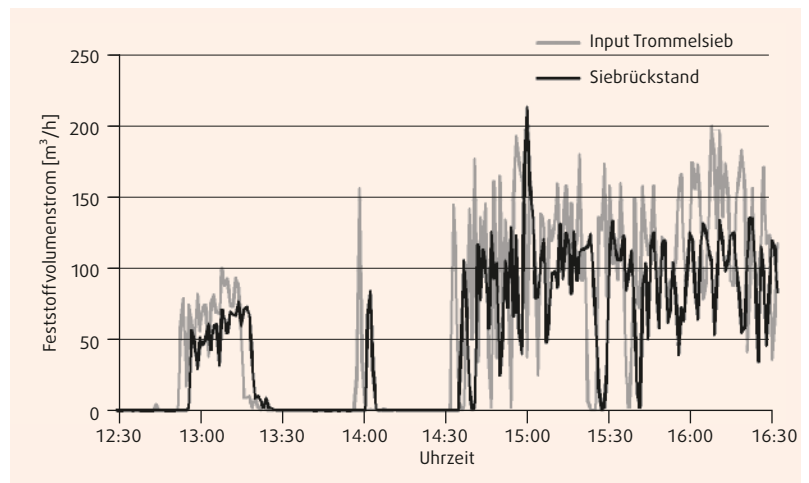


Abbildung 7  
Feststoffvolumenstrommessung des Inputs zum Trommelsieb und des Siebrückstandes in der Abfolge Kammwalzenzerkleinerung/Trommelsieb im mechanischen Aufbereitungsteil einer MBA (EnAB 2 2017).

führen bspw. die zunehmend im Umlauf kommenden Multilayer-Produkte aufgrund ihres mechanisch untrennbaren Verbundcharakters (Vergesellschaftung von mehreren Kunststoffsorten und/oder z. B. Kunststoff-Metall-Verbunden) zwangsläufig zu einer Qualitätsverschlechterung von Vorkonzentrat einer Kunststoffsorte, die darüber hinaus auch nicht werkstofflich recycelt werden können. Hier kann nur chemisches Recycling ansetzen, von betrieblichen Umsetzungen zur Behandlung mengenrelevanter Abfallströme ist man derzeit aber noch weit entfernt. Recyclingunverträglichkeiten sind für die Kunststoffarten Folien, PP, PE, PS (formstabil) sowie für PET ausführlich dargelegt (Dehoust et al. 2021).

Im Gegensatz dazu erscheinen mechanisch separierbare Verbunde (bspw. Joghurtbecher aus Polystyrol mit aluminiumhaltigem Deckel und Schriftbänderole aus Papier) zwar werkstofflich recyclingfähig, aber auch nur, wenn die Komponenten bereits vor dem Eintrag in den gelben Sack durch den Endverbraucher separiert worden sind; der Aufschlussprozess in den LVP-Sortieranlagen ist hierfür nicht geeignet. Erfolgt im Umkehrschluss diese „Vorkonditionierung“ nicht durch den Verbraucher, ist mit hohem Fehlaustrag in die Verbrennung zu rechnen.

Diese Beispiele zeigen, dass recyclinggerechtes Design einen ganz erheblichen Anteil am Sortiererfolg haben wird. Technik in Sortieranlagen stößt auch dann an Grenzen, wenn Designer nicht die technischen Optionen berücksichtigt.

## 6. Fazit

Die Erfüllung anspruchsvoller werkstofflicher Verwertungsquoten ist derzeit sehr schwer zu erfüllen. Durch mehrstufige Sortierprozesse kann dennoch eine erhöhte Reinheit sowie ein verbessertes Wertstoffausbringen bei LVP-Anlagen erreicht werden. Technische Herausforderungen liegen vor allem in den Bereichen einer gleichmäßigen Materialbeschickung und der nicht flexiblen Prozessparametrierung begründet. Ein hoher Fremdstoffanteil sowie nicht verwertbare Fraktionen führen unweigerlich zu einer Verschlechterung der Prozessqualität. Auch wenn technisch noch nicht alle Möglichkeiten ausgeschöpft sind, liegen erhebliche Potentiale für eine Erhöhung von Recyclingquoten in einer recyclingfreundlichen Gestaltung von LVP-Ma-



materialien. Die Vermeidung von Recyclingunverträglichkeiten einerseits und die verstärkte Nutzung sensoropisch generierter Stoffstromdaten andererseits können zukünftig dabei helfen, Sortierprozesse effizienter und damit insgesamt nachhaltiger zu gestalten.

### Literatur

**Feil, A.; Thoden van Velzen, E. U.; Jansen, M.; Pretz, T. (2016):** „Technical assessment of processing plants as exemplified by the sorting of beverage cartons from lightweight packaging wastes“. In: Waste Management 48, S. 95-105, DOI: 10.1016/j.wasman.2015.10.023

**bvse-Fachverband Kunststoffrecycling (Hg.) (2017):** „Kunststoffrecycler erhalten weiterhin ungenügende Qualität“. Online verfügbar unter <https://www.bvse.de/gut-informiert-kunststoffrecycling/nachrichten-kunststoffrecycling/1650-kunststoffrecycler-erhalten-weiterhin-ungenuegende-qualitaet.html>, zuletzt geprüft am 05.05.2021.

**Chen, X.; Kroell, N.; Li, K.; Feil, A.; Pretz, T. (2021):** „Influences of bioplastic polylactic acid on near-infrared-based sorting of conventional plastic“. In: Waste Management & Research. DOI: 10.1177/0734242X211003969

**Conversio Market & Strategy GmbH (Hg.) (2020):** Stoffstrombild Kunststoffe in Deutschland 2019. Online verfügbar unter [https://www.conversio-gmbh.com/res/Kurzfassung\\_Stoffstrombild\\_2019.pdf](https://www.conversio-gmbh.com/res/Kurzfassung_Stoffstrombild_2019.pdf).

**Der Grüne Punkt (Hg.) (2021):** <https://www.gruener-punkt.de/de/downloads>, zuletzt geprüft am 05.05.2021.

**EnAB 2 (2017):** Abschlussbericht „Energieeffiziente Abluftbehandlung 2“, Bundesministerium für Wirtschaft und Energie (BMWi), FKZ 03ET1378A-D.

**EU Recycling (Hg.) (2018):** „Wie können mehr Kunststoffe in Leichtverpackungen recycelt werden?“ Online verfügbar unter <https://eu-recycling.com/Archive/20131>, zuletzt aktualisiert am 05.05.2021.

**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: Waste management & research 37 (2), S. 120-126. DOI: 10.1177/0734242X19826372.

**Dehoust, G.; Hermann, J. A.; Christiani, J.; Bartnik, S.; Beckamp, S.; Bünemann, A. (2021):** Endbericht „Ermittlung der Praxis der Sortierung und Verwertung von Verpackungen im Sinne des § 21 VerpackG, Ressortforschungsplan des Bundesministeriums für Umwelt, Naturschutz und nukleare Sicherheit“, FKZ 3718 33 311 0, Text 11/2021, Umweltbundesamt (Hg.); Online verfügbar unter [https://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/5750/publikationen/2021-01-22\\_texte\\_11-2020\\_oekologische\\_beteiligungsentgelte.pdf](https://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/5750/publikationen/2021-01-22_texte_11-2020_oekologische_beteiligungsentgelte.pdf), zuletzt geprüft am 05.05.2021.

**Hahladakis, J. N.; Iacovidou, E. (2018):** „Closing the loop on plastic packaging materials: What is quality and how does it affect their circularity?“ In: The Science of the total environment 630, S. 1394-1400. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2018.02.330.

**IK Industrievereinigung Kunststoffverpackungen e.V. (Hg.) (2019):** Jahresbericht 2018/19. Online verfügbar unter <https://kunststoffverpackungen.de/wp-content/uploads/2019/09/IK-Jahresbericht-2019-webedition.pdf>

**Christiani, J. (2017):** „Stand der Technik und Herausforderungen für einzelne Verpackungsmaterialien“, In: Recycling und Recyclingfähigkeit von Verpackungen (Berlin, 06. Dezember 2017). Online verfügbar unter [https://www.bvse.de/images/pdf/Themen\\_\\_Ereignisse/2017/1-Christiani\\_Stand\\_der\\_Technik\\_.pdf](https://www.bvse.de/images/pdf/Themen__Ereignisse/2017/1-Christiani_Stand_der_Technik_.pdf)

**Wittstock, K. (2021):** „Chemisches und mechanisches Recycling im Zusammenspiel zur zirkulären Wirtschaft“. In: Berliner Recycling- und Sekundärrohstoff-Konferenz (online, 15. März 2021). Thomé-Kozmiensky Verlag.

**Kuchta, K.; Picuno, C. (2020):** „Kreislauffähigkeit von Post-Consumer Kunststoffverpackungen“. In: Müll und Abfall 3, S. 118-124.

**REDWAVE (2021):** „Kunststoffrecycling“. Online verfügbar unter <https://redwave.com/loesungen/recycling/kunststoff>, zuletzt geprüft am 05.05.2021.

**STEINERT GmbH (2021a):** „Verpackungen sortieren“. Online verfügbar unter <https://steinertglobal.com/de/abfall-recycling/verpackungen/>, zuletzt geprüft am 05.05.2021.

**STEINERT GmbH (2021b):** „Mehr Sortiersicherheit durch Künstliche-Intelligenz-gestützte Software- und Hardwareupgrades“. Online verfügbar unter <https://steinertglobal.com/de/news/news-detail/mehr-sortiersicherheit-durch-kuenstliche-intelligenz-gestuetzte-software-und-hardwareupgrades/>, zuletzt geprüft am 05.05.2021.

**Pellenc ST SAS (2021):** „Abfallsortierung – Kunststoffrecycling“. Online verfügbar unter <https://www.pellencst.com/de/produkte/>, zuletzt geprüft am 05.05.2021.

**Pretz, T.; Feil, A.: „Aufbereitung fester Abfallstoffe“. In: M. Kranert (Hg.) (2017): Einführung in die Kreislaufwirtschaft. Planung – Recht – Verfahren. Springer Vieweg: Wiesbaden. DOI: 10.1007/978-3-8348-2257-4**

**TOMRA Systems GmbH (2021a):** „TOMRA Packaging Sorting PE PP Recovery“. Online verfügbar unter <https://video.tomra.com/tomra-packaging-sorting-pe-pp-recovery-1>, zuletzt geprüft am 05.05.2021.

**TOMRA Systems GmbH (2021b):** „GAIN Intelligence“. Online verfügbar unter <https://solutions.tomra.com/gain>, zuletzt geprüft am 05.05.2021.

**Destatis (Hg.) (2021):** „Eingesammelte gebrauchte Verkaufsverpackungen privater Endverbraucher/-innen“. Online verfügbar unter <https://www.destatis.de/DE/Themen/Gesellschaft-Umwelt/Umwelt/Abfallwirtschaft/Tabellen/eingesammelte-verpackung-endverbraucher-privat-2019.html>, zuletzt geprüft am 14.06.2021.

**Verpackungsgesetz – VerpackG:** Gesetz zur Fortentwicklung der haushaltsnahen Getrennterfassung von wertstoffhaltigen Abfällen, Bundesgesetzblatt Jahrgang 2017 Teil I, Nr. 45, Bonn 12. Juli 2017. Online verfügbar unter [https://www.bgbl.de/xaver/bgbl/start.xav?start=%2F%2F%5B%40attr\\_id%3D%27bgb117s2234.pdf%27%5D#\\_\\_bgbl\\_%2F%2F%5B%40attr\\_id%3D%27bgb117s2234.pdf%27%5D\\_\\_1552314334247](https://www.bgbl.de/xaver/bgbl/start.xav?start=%2F%2F%5B%40attr_id%3D%27bgb117s2234.pdf%27%5D#__bgbl_%2F%2F%5B%40attr_id%3D%27bgb117s2234.pdf%27%5D__1552314334247), zuletzt geprüft am 05.05.2021.

### Anschrift der Autoren

**Dr.-Ing. Alexander Feil, Nils Kroell,  
Prof. Dr.-Ing. Thomas Pretz und Prof. Dr. Kathrin Greiff**  
Institut für Anthropogene Stoffkreisläufe (ANTS)  
RWTH Aachen University  
Wüllnerstraße 2, 52062 Aachen  
E-Mail: alexander.feil@ants.rwth-aachen.de



**ESV** ERICH  
SCHMIDT  
VERLAG  
Auf Wissen vertrauen

## Unsere wichtigste Ressource

### Anlagenbezogener Gewässerschutz Handbuch für Industrie-Anlagen zum Umgang mit wassergefährdenden Stoffen (AwSV)

Von Dr. Cedric Meyer und Dipl.-Ing. Frank Oswald (Hg.)

2019, 275 Seiten, € (D) 49,90. ISBN 978-3-503-15751-8

eBook: € (D) 44,89. ISBN 978-3-503-15752-5

Online informieren und bestellen:

 [www.ESV.info/15751](http://www.ESV.info/15751)

Erich Schmidt Verlag GmbH & Co. KG · Genthiner Str. 30 G · 10785 Berlin  
Tel. (030) 25 00 85-265 · Fax (030) 25 00 85-275 · [ESV@ESVmedien.de](mailto:ESV@ESVmedien.de) · [www.ESV.info](http://www.ESV.info)