

Vorstudie

Vergleich innovativer

Identifikationsverfahren für Post-

Consumer Leichtverpackungen

Endbericht

Erstellt im Auftrag von:

Hamburg Institute for Innovation, Climate Protection and Circular Economy GmbH (HiCCE),
Kritzenberg 7, 22391 Hamburg

Für:

Forum Rezyklat
GS1 Germany GmbH
Maarweg 133, 50825 Köln

Durch:

Prof. Dr.-Ing. Kerstin Kuchta
M.Sc. Jinyang Guo

Institute of Circular Resources Engineering and Management (CREM)
Technische Universität Hamburg

Prof. Dr.-Ing. Jörg Woidasky
M.Sc. Maximilian Auer
M.Sc. Jannick Schmidt

Steinbeis-Transferzentrum Marketing, Logistik und Unternehmensführung an der Hochschule
Pforzheim

Prof. Dipl.-Ing. Dr. mont. Roland Pomberger
Dipl.-Ing. Dr. mont. Alexia Tischberger-Aldrian
M.Sc. Nikolai Kuhn
Alexander Anditsch

Lehrstuhl für Abfallverwertungstechnik und Abfallwirtschaft
Montanuniversität Leoben

Hamburg, im Mai 2023

Executive Summary

This study recognizes and evaluates innovative identification technologies for sorting post-consumer plastic packaging waste in Germany.

The first part gives an overview of existing identification processes, evaluates their suitability for different material streams, the costs, the technical readiness levels (TRL), and current suppliers. Based on the specifications of the Forum Rezyklat, three basic technical approaches to sorting post-consumer lightweight packaging were investigated: Digital watermarks, fluorescent markers and object recognition.

In the second part, the sorting facilities for lightweight packaging (LWP) in Germany were identified and then catalogued and evaluated on the basis of a comprehensive written survey. Actually, there are 39 plants under operation, which have a total capacity of 3.3 Mio. Mg/a. These LWP plants are equipped with technologies for size reduction, classification, density separation, magnets and eddy current separation, as well as sensor-based separation technology, usually near-infrared (NIR) technology. Innovative sorting technology, such as object identification based on artificial neural networks, has been installed in some plants and for specific fractions, e. g. PET material stream (29 %), PE (20 %) and PP (8.70 %). In general, more than one third of the market follows the technology development closely and expressed interest in upgrading their plants. The rest is waiting for feasible concepts and technology and the clear commitment of packaging producers and recyclers to support the further development.

The third part developed an experimental approach for future field tests. The input material was proposed based on data on material composition of the LWP input. Three different charges based on different combinations of packaging features, such as polymer type, food/non-food applications, form, color, size, labels, and caps, are suggested.

It is recommended that the performance evaluation of the innovative identification technologies should be based on the recycle quality. The following full-scale tests should be supported by an experimental approach. Finally, modelling studies including material flow analysis (MFA) and life cycle assessment (LCA) should be carried out to prove the positive environmental effect, to convince different stakeholders and support communication.

Zusammenfassung

Die vorliegende Studie ermittelt und bewertet innovative Identifikationstechnologien zur Sortierung von Post-Consumer Kunststoffverpackungsmaterial in Deutschland. Im ersten Teil wird ein Überblick über bestehende und innovative Identifikationstechniken gegeben, wobei ihre Eignung für unterschiedliche Materialströme, die verbundenen Kosten, der technische Reifegrad (TRL) und verfügbare Lieferanten bewertet werden. Ausgehend von den Vorgaben des Forums Rezyklat wurden drei grundlegende technische Ansätze zur Sortierung von Post-Consumer-Leichtverpackungen untersucht: Digitale Wasserzeichen, Fluoreszenzmarker und Objekterkennung. Im zweiten Teil wurden die Sortieranlagen für Leichtverpackungen (LVP) in Deutschland identifiziert und auf der Grundlage einer umfassenden schriftlichen Befragung katalogisiert und bewertet. Derzeit sind 39 Anlagen in Betrieb, die eine Gesamtkapazität von 3,3 Mio. Mg/a haben. Diese LVP-Anlagen sind mit Technologien zur Zerkleinerung, Klassierung, Dichteseperation, Magneten und Wirbelstromabscheidung sowie mit sensorgestützter Separationstechnik, meist Nahinfrarot (NIR)-Technologie, ausgestattet. Innovative Sortiertechnologien, wie z. B. die Objekterkennung auf der Grundlage künstlicher neuronaler Netze, wurden in einigen Anlagen und für bestimmte Fraktionen, z. B. PET (29 %), PE (20 %) und PP (8,70 %), installiert. Im Allgemeinen verfolgt mehr als ein Drittel des Marktes die technologische Entwicklung aufmerksam und hat Interesse an der Aufrüstung seiner Anlagen bekundet. Der Rest wartet auf realisierbare Konzepte und Technologien und auf das klare Bekenntnis der Verpackungshersteller und Recycler, die weitere Entwicklung zu unterstützen. Im dritten Teil wurde ein experimenteller Ansatz für künftige Feldversuche entwickelt. Das Einsatzmaterial für die Versuche wurde auf der Grundlage des LVP-Materialstroms in Deutschland empfohlen. Im Ergebnis werden drei verschiedene Chargen vorgeschlagen, die auf unterschiedlichen Kombinationen von Verpackungsmerkmalen wie Polymertyp, Lebensmittel-/Nichtlebensmittelanwendungen, Form, Farbe, Größe, Etiketten und Verschlüsse basieren.

Abschließend wird empfohlen, dass die Leistungsbewertung der innovativen Identifizierungstechnologien in großtechnischen Tests und auf der Grundlage der Rezyklatqualität erfolgen sollte. Vor dem Hintergrund neuer Rezyklatprodukte sollte auch eine Überprüfung der genutzten Sortierkriterien erfolgen. Schließlich sollten Modellierungen wie Materialflussanalyse (MFA) und Lebenszyklusbewertung (LCA) durchgeführt werden, um die positiven Umweltauswirkungen nachzuweisen, die verschiedenen Interessengruppen zu überzeugen und die Kommunikation zu unterstützen.

Inhalt

GLOSSAR	VI
ABKÜRZUNGSLISTE.....	VII
1 EINLEITUNG.....	1
1.1 Zielsetzung	1
2 GRUNDLAGEN.....	3
2.1 Definition und grundsätzliches Design von LVP-Sortieranlagen	3
2.2 Sensorgestützte Sortierung.....	5
3 AP1: BESTIMMUNG DER LEISTUNGSFÄHIGKEIT VERSCHIEDENER INNOVATIVER IDENTIFIKATIONSVERFAHREN FÜR POST-CONSUMER-LEICHTVERPACKUNGEN	8
3.1 Methodik und Durchführung	8
3.2 Struktur des Arbeitspakets 1	11
3.3 Verfahren basierend auf inhärenten Materialeigenschaften.....	12
3.3.1 Nahinfrarot (NIR)-Spektroskopie	12
3.3.2 Dichtentrennung.....	15
3.4 Verfahren basierend auf inhärenten Objekteigenschaften	17
3.4.1 Objekterkennung.....	17
3.5 Verfahren basierend auf nicht-inhärenten Materialeigenschaften	27
3.5.1 Fluoreszenz-Markierung	28
3.6 Verfahren basierend auf nicht-inhärenten Produkteigenschaften	43
3.6.1 Digitale Wasserzeichen.....	43
3.7 R-Cycle	54
3.8 Circularise.....	56
4 AP2: LVP-SORTIERANLAGE IN DEUTSCHLAND	58
4.1 Methodik und Daten	58
4.2 Ergebnisse - Bestehende LVP-Sortieranlagen	61
4.2.1 Sonderanlagen.....	64
4.3 Sortierleistung und Sortierprodukte der bestehenden Anlagen.....	67
4.3.1 Sortierleistung verschiedener Sortierfraktionen	67
4.3.2 Anzahl der Sortierfraktionen nach Sortierkapazität der Anlagen.....	68
4.4 Sortierverfahren und Aggregation	69
4.5 Einsatz neuer Sortiertechnologien.....	71

Vergleichsstudie Identifikationsverfahren – Forum Rezyklat

4.6	Nachrüstungsoptionen	72
4.6.1	Interesse zur Nachrüstung	72
4.6.2	Nachrüstungspotenzial verschiedener Sortierfraktionen.....	73
4.6.3	Platzverfügbarkeit für Nachrüstung	74
5	AP3: KONZEPT ZUR IDENTIFIKATION RELEVANTER STOFFSTRÖME UND GESTALTUNG EINER VERSUCHSCHARGE FÜR DIE HAUPTSTUDIE	76
5.1	Literaturrecherche und -auswertung.....	77
5.2	LVP-Daten-Auswertung	84
5.3	Erarbeitung einer Versuchscharge	91
5.3.1	Repräsentative Versuchscharge	91
5.3.2	“Pain-Point“-Versuchscharge	98
6	DISKUSSION	103
6.1	Vergleich der innovativen Identifikationstechnik	103
6.2	Weitere Optimierungen der Sortier-Prozesse	108
6.3	Skizze des Feldversuchs	112
6.3.1	Verbesserung des aktuellen LVP-Sortierverfahrens	112
6.3.2	Neue Sortierkriterien	113
6.3.3	Modellierung und Bewertung.....	114
7	ZUSAMMENFASSUNG	116
8	LITERATURVERZEICHNIS	117

Glossar

2D-Fraktion	Gegenstand mit flexiblem Charakter (z. B. Film, Folie, Beutel)
3D-Fraktion	Gegenstände mit starrem Charakter (z. B. Flaschen, Schachteln, Becher)
Ausbringungsrate	Menge des Ausgangsmaterials geteilt durch die Menge des Eingangsmaterials
Detektion	Relative Materialerkennung mit der das Vorhandensein von Material gemessen wird.
Duale Systeme	Duale (Entsorgungs-)Systeme organisieren die bundesweite Sammlung, Sortierung sowie die Verwertung von gebrauchten Verkaufsverpackungen
Feinfraktion	Siebrückstand mit zu kleiner Dimension (in dieser Studie < 25 mm je nach Anlage)
Identifikation	Absolute Materialerkennung mit der die Materialart bestimmt wird.
Kunststoffart-Sortierung (KA-Sortierung)	Sortierung nach Kunststoffarten (z. B. PET, PE, PP, PS)
Reinheit	Qualitätsparameter für den Outputstrom der Zielfraktion eines Stofftrennungsvorgangs.
Sonderanlage	Sortieranlagen nehmen gelbe Säcke/Säcke als Inputmaterial, aber ohne die Standardauslegung einer LVP-Sortieranlage
Sondersortierfraktion	die Fraktionen, die nur von unter 10 % der Sortierkapazität in Deutschland sortiert werden, haben oft keine Fraktionsnummer
Überkorn	Siebrückstand mit zu großer Dimension (in dieser Studie > 210 - 300 mm je nach Anlage)

Abkürzungsliste

a	annum (Jahr)
ABS	Acrylnitril-Butadien-Styrol
BMBF	Bundesministerium für Bildung und Forschung
CE	Circular Economy
EPS	Expandiertes Polystyrol
FE	Ferrum(Eisen)
FKN	Flüssigkeitskartonage
FSK	formstabile Kunststoffe
HDPE	High-Density Polyethylen
KA	Kunststoffarten
KG	Kapazitätsgruppe
LCA	Lebenszyklusanalyse (EN: LifeCycle Assessment)
LDPE	Low-Density Polyethylen
LVP (LWP)	Leichtverpackung (Lightweight Packaging)
MaReK	Markerbasiertes Sortier- und Recyclingsystem für Kunststoffverpackungen
MFA	Materialflussanalyse
Mg	Megagramm (Tonne)
Mio.	Million
mm	Millimeter
MPO	Gemischte Polyolefine
NE	Nicht-Eisen
NIR	Nahinfrarot
PA	Polyamide
PE	Polyethylen
PET	Polyethylenterephthalat
PET-A	Amorphes PET
PET-G	Glykol-modifiziertes PET
PE-X	Vernetztes Polyethylen
PLA	Polylactid
PMMA	Polymethylmethacrylat
PO	Polyolefin
POM	Polyoxymethylen
PP	Polypropylen
PP-C	Polypropylen-Copolymer
PP-H	Polypropylen-Homopolymer
PPK	Papier, Pappe, Karton
PS	Polystyrol
PVC	Polyvinylchlorid
PVDC	Polyvinylidenchlorid
QR	Quick Response
SK	Spezifische Sortierkapazität
Stk.	Stück

Vergleichsstudie Identifikationsverfahren – Forum Rezyklat

TRL

Technological Readiness Level

UBA

Umweltbundesamt

ZSVR

Zentrale Stelle Verpackungsregister

1 Einleitung

Das Forum Rezyklat wurde 2018 initiiert und bildet heute mit über 65 Mitgliedern die gesamte Wertschöpfungskette entlang der Kreislaufwirtschaft von Verpackungen ab. In gemeinsamen Anstrengungen werden Strategien und Maßnahmen zur Weiterentwicklung der Kreislaufwirtschaft entwickelt und deren Umsetzung vorangetrieben. Um die Ziele des Forum Rezyklat zu erreichen, engagieren sich die Mitglieder in sogenannten Fachpaketen, welche sich mit unterschiedlichen Schwerpunkten auseinandersetzen.

Ziel der mitwirkenden Unternehmen im Fachpaket "Technologie und Recyclingfähigkeit" ist es, die Verfügbarkeit von qualitativ hochwertigen Rezyklaten aus der haushaltsnahen Sammlung zu steigern, um deren Wiedereinsatz zu erhöhen und die Kosten zu senken. Vor diesem Hintergrund beauftragte das Forum Rezyklat Frau Prof. Kuchta, TU Hamburg, Herrn Prof. Woidasky, Steinbeis-Transferzentrum Marketing, Logistik und Unternehmensführung an der Hochschule Pforzheim und Herrn Prof. Pomberger, Montanuniversität Leoben, eine Vorstudie zur Vorbereitung eines Versuches zur Bestimmung der Leistungsfähigkeit verschiedener neuer Identifikationsverfahren für Post-Consumer-Leichtverpackungen durchzuführen.

1.1 Zielsetzung

Diese Vorstudie basiert auf Literaturwerten, Erfahrungswerten aus dem Betrieb von Anlagen, Befragung von Expert*innen und den Ergebnissen von Forschungsprojekten der Projektsteilnehmenden. Die Studie soll neue Sortiertechniken gegenüberstellen, um einen explorativen Vergleich ihrer Leistungsfähigkeit zu erhalten. Dabei sollen die neuen Sortiertechnologien als Ergänzung der aktuell in deutschen Leichtverpackungen (LVP)-Sortieranlagen eingebauten Nahinfrarot(NIR)-Technologie betrachtet werden.

Zusätzlich soll ein Konzept für eine verifizierende Hauptstudie auf der Basis von Versuchen unter „realen“ Bedingungen skizziert werden.

Die Gesamtstudie soll Hersteller*innen, Sortieranlagenbetreibenden und politischen Entscheidungsträger*innen bei der Entscheidungsfindung, z. B. für zukünftige Investitionen, Verpackungsgestaltungen oder Gesetzgebungen, unterstützen.

Der Fokus der Studie liegt auf den Polymeren Polyethylenterephthalat (PET), Polyethylen (PE), Polypropylen (PP) und Polystyrol (PS). Es soll vor allem auch die stoffstromspezifische Relevanz einer Unterscheidung in Food/Non-Food sowie die Identifikation von „kleinen“ Verpackungen mit Abmessungen von 5 bis 10 cm betrachtet werden. Ergänzend wird

Vergleichsstudie Identifikationsverfahren – Forum Rezyklat

die Charakteristik der Verpackungen mit Abmessungen von 2 bis 5 cm in der Sortierung abgeschätzt.

Die Studie ist in die folgenden Arbeitspakete (APs) unterteilt:

- AP1: Bewertung der Sortiertechniken
- AP2: LVP-Sortieranlagen in Deutschland
- AP3: Konzept zur Identifikation relevanter Stoffströme und Gestaltung einer Versuchsscharge für die Hauptstudie

Sie wird mit einer Diskussion und Zusammenfassung abgeschlossen.

2 Grundlagen

In Deutschland werden Sammlung, Sortierung und Verwertung von Verpackungsabfällen durch die *Dualen Systeme* organisiert. Produzent*innen, Handel und Importeur*innen, welche systembeteiligungspflichtige Verpackungen in Deutschland auf den Markt bringen, müssen sich bei der *Zentralen Stelle Verpackungsregister* registrieren und alle in einem Kalenderjahr in Verkehr gebrachten Verpackungen an die Zentrale Stelle Verpackungsregister melden. Zur Erfüllung der Entsorgungsverpflichtungen für die Verpackungen schließen sich die Herstellenden in der Regel einem Dualen System an. Derzeit gibt es elf duale Systembetreiber, welche im Folgenden aufgelistet sind:

- Altera System GmbH
- BellandVision GmbH
- Der Grüne Punkt – Duales System Deutschland GmbH
- EKO-PUNKT GmbH &Co. KG
- Interseroh-Dienstleistungs GmbH
- Landbell AG für Rückhol-Systeme
- Noventiz dual GmbH
- PreZero-Dual GmbH
- Reclay System GmbH
- Recycling Dual GmbH
- Zentek GmbH Co&KG

Post-Consumer Verpackungsabfälle werden über Glassammlung, Altpapier, Gelbe Tonne oder Gelben Sack erfasst. Da sich diese Studie auf Kunststoffverpackungsabfälle konzentriert, werden im Weiteren die Sortierung der Kunststoffverpackungen in der LVP-Sortieranlagen fokussiert.

Das Sammelgemisch aus gelbem Sack und gelber Tonne wird anschließend auf der Basis der physikalischen Eigenschaften der Verpackungsmaterialien sortiert. Die sich ergebenden Fraktionen werden zu Ballen gepresst und einem nachgelagerten Recyclingprozess zugeführt, welcher zum Beispiel aus Zerkleinerung, Waschen, Schwimm-Sink-Trennung, Sortierung und Extrusion besteht.

2.1 Definition und grundsätzliches Design von LVP-Sortieranlagen

Eine Sortieranlage für LVP ist eine Anlage, welche das Sammelgemisch aus der gelben Tonne bzw. dem Gelben Sack für die nachgelagerte Verwertung separiert. Eine LVP-Sortieranlage

Vergleichsstudie Identifikationsverfahren – Forum Rezyklat

umfasst zum Beispiel folgende Technologien und Prozessschritte: Sacköffner, Schredder, Siebtrommeln, Windsichter, Wirbelstromabscheider, Überbandmagnete, ballistische Abscheider und NIR-Sortieraggregate. Einige Anlagen sind zusätzlich mit Sortiereinheiten für Verpackungen mit schwarzer Oberfläche oder Sortierrobotern ausgestattet. Nur noch in wenigen Fällen findet eine manuelle Vor- oder Nachsortierung statt.

Ein typischer Sortierprozess läuft wie im Folgenden dargestellt ab: Die LVP-Abfälle werden nach der Sammlung in einen Lagerbereich oder Bunker verbracht und über einen Bagger dem ersten Verfahrensschritt, dem Sacköffner und/oder dem Schredder zugeführt. Der Sacköffner öffnet die Gebinde und sorgt zusätzlich für einen konstanten Materialstrom in der nachfolgenden Sortieranlage. Es folgt eine Siebung, um den sehr heterogenen Materialstrom in verschiedene Partikelgrößenklassen, in der Regel Fein, Mittel und Grob, zu unterteilen.

Im Anschluss an die Siebung werden Kunststofffolien, d. h. die 2D-Fraktion, durch einen Windsichter abgeschieden. Die Fe-Metalle (Eisen) werden mittels Überbandmagneten abgetrennt, Flüssigkeitskartonage (FKN) über NIR-Sortiermaschinen entfernt und die Nichteisen(NE)-Metalle durch Wirbelstromabscheider abgeschieden. Der verbleibende Materialstrom wird über NIR-Sortieraggregate sortiert. Dabei werden im ersten Schritt Kunststoffe und Nicht-Kunststoffe (Papier, Pappe und Karton (PPK)) separiert und in nachfolgenden Schritten nach Kunststoffarten sortiert (KA-Sortierung). Weitere Sortierstufe nach anderen Eigenschaften (z. B. Farbe, Form) werden bereits teilweise eingesetzt. In dieser Studie werden alle durch NIR-Sortierung erzeugten Fraktionen als NIR-Sortierfraktionen bezeichnet. Der nicht weiter aufgetrennte Rest wird als Sortierrest definiert. Dieser wird in der Regel der energetischen Verwertung zugeführt. Die einzelnen sortierten Fraktionen werden zwischengelagert und für den weiteren Transport zu spezifischen Verwertungsanlagen in Ballen gepresst oder lose verladen.

Ein typisches Fließdiagramm einer LVP-Sortieranlage ist in Abbildung 1 dargestellt.

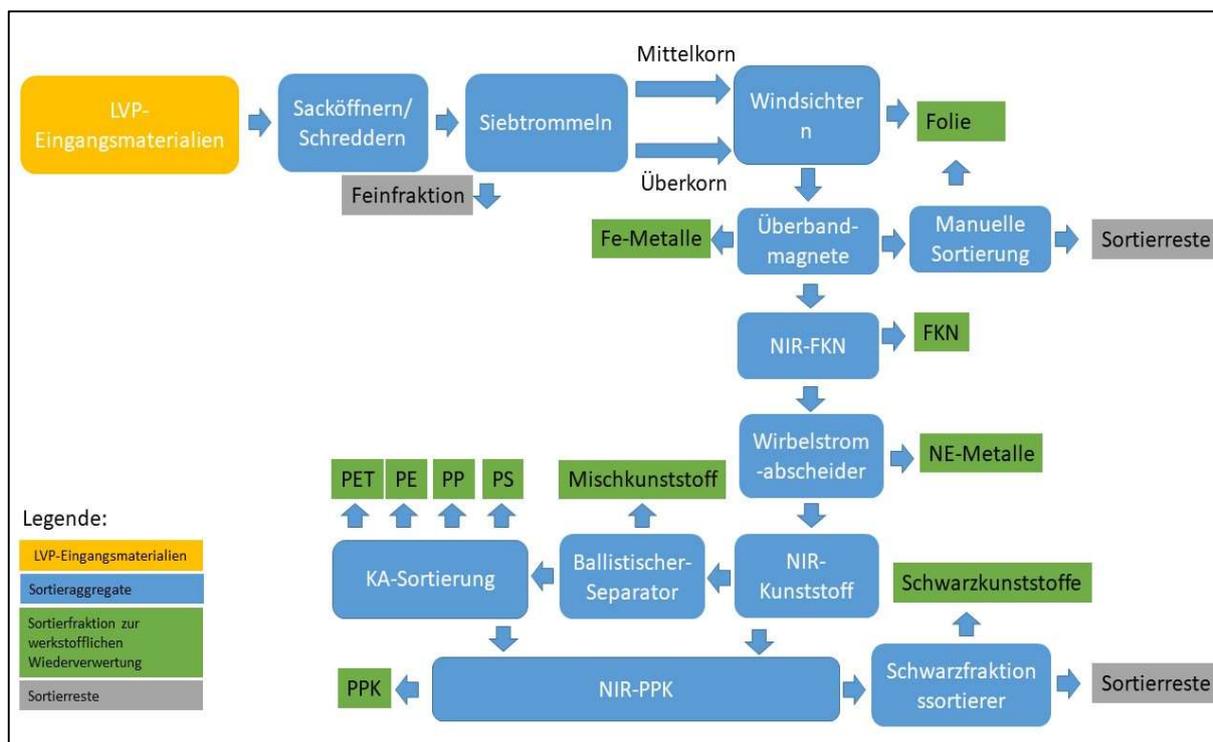


Abbildung 1 Allgemeines Verfahrensfliießdiagramm einer LVP-Sortieranlage, eigene Darstellung

2.2 Sensorgestützte Sortierung

Die Sortierung ist ein Verfahren, durch das ein Gemisch von festen Stoffpartikeln in einem dispersen System nach Materialeigenschaften getrennt wird. Die Trennung erfolgt aufgrund eines physikalischen Trennmerkmals, in dem sich die zu trennenden Partikel ausreichend unterscheiden, z. B. anhand des Absorptionsverhaltens (Schubert 2012). Trennverfahren spielen eine zentrale Rolle in der Abfallbehandlung, da die Verwertungsmöglichkeiten durch die chemische Zusammensetzung und die physikalischen Eigenschaften eines Materialstroms bestimmt werden (Bonifazi et al. 2020). Die Hauptziele von Trennverfahren in der Abfallbehandlung sind die Entfernung unerwünschter Stoffe und die Erzielung einer hohen Reinheit. Allgemein gilt für alle Trennverfahren ein Zielkonflikt zwischen Ausbeute und Reinheit, d. h., dass durch den Sortiervorgang entweder eine hohe Ausbeute der Zielfraktion zulasten einer geringen Reinheit oder eine hohe Reinheit zulasten einer geringen Ausbeute der Zielfraktion erreicht werden kann. Dies kann in einem gewissen Maße durch die Verwendung von mehrstufigen Sortierprozessen, sogenannter Rougher-Cleaner-Scavenger-Konfigurationen, erhöht werden. Hierbei wird vom Materialstrom zuerst die Zielfraktion

Vergleichsstudie Identifikationsverfahren – Forum Rezyklat

getrennt („positiv sortieren“) und diese anschließend von anhaftenden Kontaminationen gezielt befreit („negativ sortieren“) (Pretz und Feil 2020).

Der Sammelbegriff "sensorgestützte Sortierung" beschreibt alle Verfahren, bei denen die Partikel in einem ersten Schritt von einem Sensor erfasst und anschließend mechanisch abgetrennt werden (Wotruba und Harbeck 2010). Die Entkopplung der Materialeigenschaften von der mechanischen Trennung unterscheidet die sensorgestützte Sortierung von Trennverfahren, die Materialeigenschaften wie Dichte oder elektrische Leitfähigkeit direkt zur Separation nutzen. Durch die gezielte Auswahl von Strahlungsquelle, Interaktionsprinzip mit dem Schüttgut oder der Detektorwahl, sind sensorgestützte Sortierverfahren flexibel an unterschiedliche Problemstellungen anpassbar. Infolgedessen können Sortierentscheidungen auf der Grundlage nur eines oder einer Kombination mehrerer relevanter Parameter getroffen werden. Ferner können materialflussspezifische Daten in Echtzeit erfasst und in der Folge für die Qualitäts- und Anlagenkontrolle genutzt werden (Bonifazi et al. 2020).

Die Grundkomponenten eines sensorgestützten Sortieraggregats sind in Abbildung 2 dargestellt. Zuerst wird das zu sortierende Material so konditioniert, dass ideale Bedingungen für die anschließende Detektion und Sortierung gegeben sind (z. B. ähnliche Objektgröße und gleichmäßige Verteilung über die gesamte Sortierebene). Anschließend wird das Material auf ein Förderband oder eine Rutsche gefördert und auf eine bestimmte Geschwindigkeit, meist zwischen $2 - 4,5 \text{ ms}^{-1}$, beschleunigt. Bei Durchlauf des Sensorbereichs wird das Material erfasst (Detektion) und seine Eigenschaften mit einem oder mehreren Sensoren gemessen (Identifikation). Am häufigsten werden Sensoren verwendet, die das elektromagnetische Strahlungsspektrum zwischen 10^{-12} m und 10^4 m nutzen (Wotruba und Harbeck 2010). Klassischerweise werden für die Identifikation verschiedener Kunststoffarten NIR-Spektrometer verwendet. Zusätzlich können auch Farbkameras eingesetzt werden. Nachdem die Signale in einer zentralen Recheneinheit analysiert und ausgewertet wurden, wird jedem Objekt auf Basis der Klassifizierung und Lokalisierung eine binäre Entscheidung zugeordnet (Auswurf oder kein Auswurf). Auf dieser Grundlage wird die Sortierentscheidung an eine mechanische Trennvorrichtung weitergegeben, welche die Zielfraktion von dem Materialstrom trennt. Aufgrund der hohen Ansprechgeschwindigkeit, Auswurfkraft und geringen Abmessungen sind Luftventile im Bereich der Kunststoffsortierung am weitesten verbreitet. Alternativ kann für den Materialaustrag auch ein Portalroboter genutzt werden. (Wotruba und Harbeck 2010)

Wie aus dem vorherigen Abschnitt hervorgeht, ist in der sensorgestützten Sortierung eine gute Koordinierung von Detektion, Identifikation und mechanischer Separation maßgeblich. Das

Vergleichsstudie Identifikationsverfahren – Forum Rezyklat

Ausbringen der Zielfraktion kann somit als das Produkt von Detektion, Identifikation und mechanischer Separation beschrieben werden (vgl. Formel 1).

$$\text{Ausbringen} = \text{Detektion} \times \text{Identifikation} \times \text{mechanische Separation} \quad (1)$$

Entsprechend hängt die Performance eines sensorgestützten Sortieraggregats nicht nur von Bedingungen wie Bandbelegung, Bandgeschwindigkeit, Materialform, etc. ab, sondern auch vom jeweiligen Detektions- und Separationsverfahren sowie der Kombination derselben. Dies kann einen direkten Vergleich von unterschiedlichen Detektionsverfahren (z. B. NIR-Identifikation, Farberkennung) mit verschiedenen mechanischen Separationsverfahren (z. B. Luftventile, Portalroboter) schwierig gestalten. Zugleich stellt dieser Zusammenhang im Vergleich zu direkten, mechanischen Verfahren einen Schwachpunkt dar, da sich Fehler im Rahmen der Detektion und Identifikation multiplizieren.

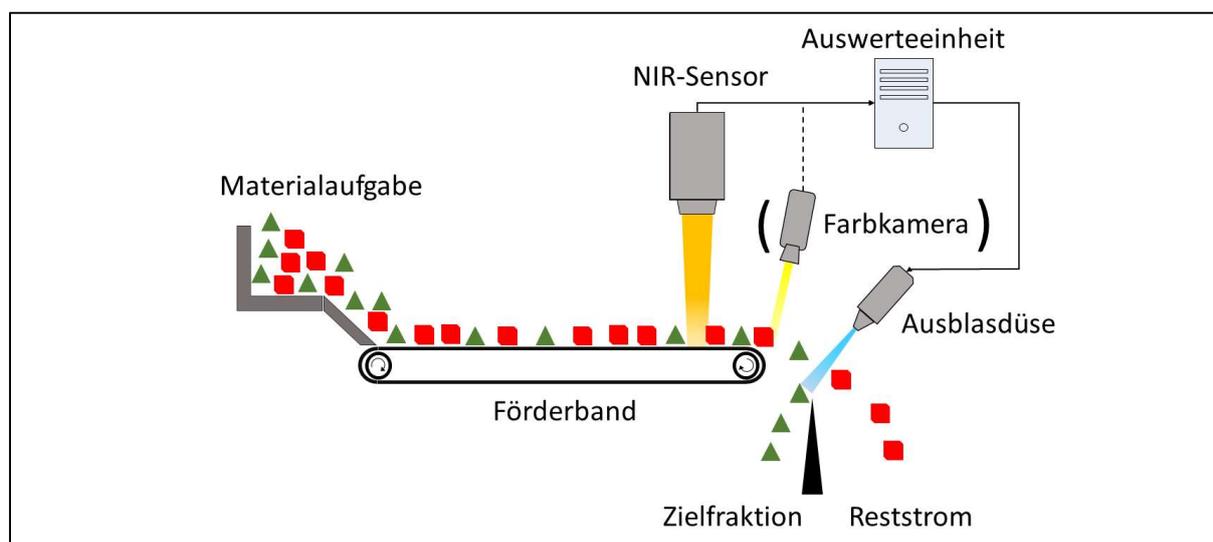


Abbildung 2 Schematische Darstellung des Funktionsprinzips eines sensorgestützten Sortiergeräts, welches für die Sortierung von Post-Consumer-Leichtverpackungen eingesetzt wird: Nach der Materialaufgabe auf ein Beschleunigungsband wird der Kunststoff mittels NIR-Sensors ermittelt. Je nach Sortierziel kann zusätzlich eine Farbkamera installiert werden. Mittels Ausblasdüsen kann die Zielfraktion von dem Reststrom separiert werden. Quelle: Eigene Darstellung basierend auf Maier et al., 2021 und Pfaff et al., 2020.

In den meisten Sortieranlagen für Post-Consumer-LVP in Deutschland werden bereits heute sensorgestützte Sortiergeräte verwendet.

3 AP1: Bestimmung der Leistungsfähigkeit verschiedener innovativer Identifikationsverfahren für Post-Consumer-Leichtverpackungen

3.1 Methodik und Durchführung

Basierend auf den Vorgaben des Forum Rezyklats, wurden drei grundsätzliche technische Lösungsansätze für die Sortierung von Post-Consumer-LVP untersucht: Digitale Wasserzeichen, Fluoreszenz-Marker und Objekterkennung. Grundlage für jedes Verfahren ist ein sensorgestütztes Sortiergerät, mit dem Objekt detektiert, identifiziert und sortiert werden. Im Rahmen der Vorstudie wurden zunächst relevante Lösungsanbieter ermittelt. Diese wurden zunächst durch das Forum Rezyklat vorgegeben und im Rahmen eigener Recherchen basierend auf Pressemitteilungen, Literaturerwähnungen, Messeteilnahmen sowie Internetrecherche ergänzt. Anschließend wurden nur jene Anbieter kontaktiert, die für die vorgegebene Studienausrichtung potenzielle Lösungen aktiv entwickeln oder vermarkten. Eine Auflistung der kontaktierten Anbieter ist Tabelle 1 zu entnehmen; ferner geht hieraus die Zuordnung zum jeweiligen Identifikationsverfahren sowie die Bereitschaft zu einem Austausch hervor. Sofern ein Anbieter nicht auf mehrmalige schriftliche und telefonische Kontaktversuche reagiert hat, ist auf Anbieterangaben oder Angaben von Dritten zurückgegriffen worden.

Auf Grundlage der vom Forum Rezyklat vorgegebenen Inhalte (Stand 06.07.2022) wurde seitens der Montanuniversität Leoben ein Fragenkatalog entwickelt, anhand dessen die jeweiligen Anbieter analysiert wurden. Ferner sind die Stärken und Schwächen der im Bericht betrachteten Lösungen anhand von 19 Fragen qualitativ bewertet worden. Dies erlaubt einen Vergleich der Lösungen untereinander und weist verbundene Chancen und Risiken auf. Das daraus resultierende Stärke-Schwächen-Profil beinhaltet folgende Aspekte, die nachfolgend kurz beschrieben werden.

Detektion / Identifikation / Stoffstrom

Lösung beinhaltet Sortierung	Nicht alle betrachteten Verfahren sehen eine anschließende Sortierung des Materialstroms vor. Alternativ zur sensorgestützten Sortierung können Sensoren auch zur Stoffstromüberwachung während der Sammlung oder Sortierung eingesetzt werden. Nichtsdestotrotz ist eine Verwendung des Identifikationsverfahrens perspektivisch für eine nachfolgende Sortierung denkbar.
Identifikation von PET, PE, PP, PS	Nicht alle betrachteten Lösungen verwenden Verfahren, die eine direkte, materialspezifische Analyse erlauben und somit die Standardkunststoffe PET, PE, PP und PS identifizieren können.
Anzahl zusätzlicher	Die betrachteten Verfahren unterscheiden sich insbesondere in der

Vergleichsstudie Identifikationsverfahren – Forum Rezyklat

Merkmalsklassen	Charakterisierungstiefe / Anzahl zusätzlicher Merkmalsklassen einer Post-Consumer-Leichtverpackung. Je nach Lösung können grundlegende, inhärente Materialeigenschaften (bspw. Kunststoff), zusätzliche Eigenschaften (bspw. Lebensmittelverpackung, Multilayer) oder auch die Identifikation von Verpackungen anhand ihrer Artikelnummer ermittelt werden.
Detektion von Verpackungen 50 - 100 mm	In Sortieranlagen werden die Post-Consumer-Leichtverpackungen anhand ihrer Größen in verschiedene Korngrößenbereiche gesiebt. Insbesondere kleine Verpackungen können hierbei abgesiebt und einer thermischen Verwertung zugeführt werden.
Detektion von Verpackungen 20 - 50 mm	In Sortieranlagen nach Stand der Technik werden Verpackungen in einem Bereich zwischen 20 - 50 mm abgesiebt und einer thermischen Verwertung zugeführt.
Ejektion von Verpackungen von 20 - 50 mm	Die mechanische Separation von Verpackungen in einem Bereich von 20 – 50 mm ist grundsätzlich technisch möglich. Aktuell wird in Sortieranlagen in diesem Korngrößenbereich selten aufgrund der hohen spezifischen Sortierkosten sortiert.
Detektion von Food Grade / Non-Food Grade	Nicht alle Verfahren erlauben die Klassifizierung von Post-Consumer-Leichtverpackungen anhand ihres Packmittels.
Digitaler Produktpass möglich	Nicht alle Verfahren erlauben die Zuordnung von Post-Consumer-Leichtverpackungen zu einem digitalen Produktpass.
Eignung für dunkle Verpackungsfarben	Nicht alle Verfahren eignen sich zur Detektion / Identifikation von mit rußgefärbten, dunklen Post-Consumer-Leichtverpackungen.
Störanfälligkeit (Partikeldeformation, Verunreinigungen)	Der Detektions- und Identifikationsprozess von Post-Consumer-Leichtverpackungen kann insbesondere in der sensorgestützten Sortierung durch Partikeldeformation oder Oberflächenverunreinigungen behindert werden.
Sortierung von markierten Flakes	Nicht alle Verfahren erlauben eine Sortierung anhand ihres Identifikationsmerkmals sowohl auf Artikel- und Flake-Ebene.
Durchsatzleistung im Vergleich zum Stand der Technik	Die Durchsatzleistung in der sensorgestützten Sortierung basiert auf dem Zusammenspiel von hohen Förderbandgeschwindigkeiten sowie schneller Datenauswertung. Nicht alle Verfahren erreichen aktuell Durchsätze, die in Anlagen nach Stand der Technik gefahren werden.
Rückstandsfreie Entfernung der Markierung	Je nach Lösung werden Verpackungen durch die Verwendung von fluoreszierenden Markern oder Druckertinte markiert. Diese Substanzen können entweder direkt auf die Verpackung, ein Etikett oder in die Polymermatrix eingebracht werden.
Kosten	
Kosten Aufbringung Markierung	Je nach Lösung sind für die Sortierung eine vorherige Markierung notwendig, welche bei einer ökonomischen Betrachtung berücksichtigt werden müssen. Die betrachteten Lösungen unterscheiden sich in der benötigten Infrastruktur.
Kosten Sensorsystem	Je nach Verfahren sind zusätzlich zu Förderbändern oder Druckluftventilleisten weitere Sensoren und Beleuchtungssysteme vonnöten.

Vergleichsstudie Identifikationsverfahren – Forum Rezyklat

Kosten Lizenzierung /
Softwareaktualisierung

Je nach Verfahren ist die Erhebung von Lizenzierungsentgelten bzw. Gebühren für regelmäßige Softwareaktualisierung Teil des Geschäftsmodells oder (perspektivisch) als Einnahmequelle zur Kostendeckung notwendig.

Sonstiges

Technological Readiness
Level

Die betrachteten Lösungen unterscheiden sich in ihrem Technologie-Reifegrad. Dieser kann anhand des Technological Readiness Level bewertet werden.

Monopolstellung Anbieter

Die betrachteten Lösungen unterscheiden sich durch die zugrundeliegende Geschäftsstrategie in ihrer Offenheit und Zugang.

Kombinationsfähigkeit mit
anderen
Identifikationstechniken

Die betrachteten Lösungen unterscheiden sich in ihrer Interoperabilität mit anderen Identifikationstechniken.

Das Stärke-Schwächen-Profil erlaubt einen einfachen Vergleich der Lösungen innerhalb eines Kriteriums. Dabei ist zu berücksichtigen, dass die Bewertung anhand eines Best-In-Class-Ansatzes erfolgt. Dies bedeutet, dass die Lösung die maximale Bewertung zugeteilt bekommt, die im jeweiligen Kriterium am besten abschneidet. Durch diesen Ansatz ist die Erstellung einer Rangfolge zur Ermittlung einer insgesamt vorteilhafteren Lösung weder zielführend noch methodologisch anwendbar.

Im Rahmen der Studiererstellung wurde eine neutrale Analyse der möglichen Verfahren angestrebt, um einen sachlichen Vergleich der vorgegebenen Kategorien zu ermöglichen. Eine große Hürde stellte hierbei die geringe Datentransparenz dar, da viele Informationen lediglich auf Basis von Einschätzungen und Präsentation der jeweiligen Lösungsanbieter zugänglich sind.

Tabelle 1 Kontaktierte Anbieter von Identifikationsverfahren für Post-Consumer-Leichtverpackungen.

Anbieter	Identifikations- verfahren	Rückmeldung		
		Keine	Schriftlich	Gespräch
Alpvision	DW	x		
Berry Global	OD	x		
CurvCode	DW	x		
Fraunhofer FHR	n.a.	x		
Gabriel-Chemie	FM	x		
HolyGrail 2.0 (AIM)	DW	x		
HolyGrail 2.0 (digimarc)	DW			x
HolyGrail 2.0 (P&G)	DW		x	
Nextloopp	FM			x
Polysecure	FM			x
Polytag	FM		x	
R-Cycle	n.a.			x
Recycleye	OD		x	
STEINERT	OD			x
Tailorlux	FM			x
TOMRA	OD			x
Vogt-Plastic	n.a.			x
ZenRobotics	OD	x		

DW = Digitale Wasserzeichen; FT = Fluoreszenz-Markierung; OD = Objekterkennung; n.a. = nicht anwendbar

3.2 Struktur des Arbeitspakets 1

Die Struktur des Berichtes orientiert sich an den für die Identifikationsverfahren relevanten Detektions- und Markierungsverfahren. Diese unterscheiden sich in ihrer Zielstellung, den zugrundeliegenden Funktionsprinzipien und der benötigten Materialvorbehandlung. In Abbildung 3 werden die jeweiligen Verfahren anhand der ermittelten Eigenschaften folgenden Kategorien zugeordnet:

- *Inhärente Materialeigenschaften*
 - Grundlage: Physikalisch-chemische Eigenschaften vom Objektmaterial
 - Identifikation durch: NIR-Spektroskopie, Dichte
- *Inhärente Objekteigenschaften*
 - Grundlage: Für das menschliche Auge erkenn- oder ableitbare Objekteigenschaften

Vergleichsstudie Identifikationsverfahren – Forum Rezyklat

- Identifikation durch: Objektdetektion (maschinelles Lernen)
- **Nicht-inhärente Materialeigenschaften**
 - Grundlage: Gezieltes Hinzufügen einer Materialeigenschaft durch eine der Produktion nachgeschaltete Manipulation des Werkstoffes
 - Identifikation durch: Fluoreszenz-Markierung
- **Nicht-inhärente Produkteigenschaften**
 - Grundlage: Eindeutige Identifikation des tragenden Objektes
 - Identifikation durch: Fluoreszenz-Identifikator, Digitale Wasserzeichen

Inhärente Materialeigenschaften	Inhärente Objekteigenschaften	Nicht-Inhärente Materialeigenschaften	Nicht-Inhärente Produkteigenschaften
 NIR-Spektroskopie	 Objektdetektion	 Fluoreszenz-Markierung	 Fluoreszenz-Identifikator
 Farberkennung			 Digitale Wasserzeichen
 Dichtentrennung			

Abbildung 3 Detektions- und Markierungsverfahren, die im Rahmen der vorliegenden Studie betrachtet werden. Quelle: Eigene Darstellung.

Die Struktur des Berichts folgt der zuvor beschriebenen Systematik von oben nach unten und von links nach rechts.

3.3 Verfahren basierend auf inhärenten Materialeigenschaften

Verfahren, die auf inhärenten Materialeigenschaften beruhen, verwenden die klassischen Merkmale von Objekten (bspw. Dichte, elektrische Leitfähigkeit oder materialspezifisches Absorptionsverhalten). Für die Sortierung von Post-Consumer-LVP werden hauptsächlich sensorgestützte Sortiergeräte eingesetzt, deren Sensoren auf dem Prinzip der NIR-Spektroskopie basieren, oder Sortierzentrifugen, die anhand der Materialdichte trennen.

3.3.1 Nahinfrarot (NIR)-Spektroskopie

Das Grundprinzip spektrometrischer Verfahren ist die Analyse *inhärenter physikalischer Eigenschaften des dem Sensor zugewandten Objektanteils* – also der Seite einer Verpackung, welcher zum Zeitpunkt der Sensormessung dem Sensor zugewandt ist. Mit Hilfe der NIR-Spektroskopie können Standardkunststoffe, welche in großen Mengen in Post-Consumer-LVP

Vergleichsstudie Identifikationsverfahren – Forum Rezyklat

Anwendung finden, detektiert und somit sortiert werden. Dies inkludiert die Thermoplasten PE, PP, PS und PET. Die NIR-Spektroskopie basiert auf der Anregung von Molekülschwingungen durch elektromagnetische Strahlung bei Wellenlängen zwischen 780 nm und 2.500 nm. Dazu wird Infrarotstrahlung, die von Quarz-Wolfram-Halogen-Lampen oder Leuchtdioden emittiert wird, auf die Materialoberfläche fokussiert.

Detektion / Identifikation / Stoffstrom	Lösung beinhaltet Sortierung	5
	Identifikation von PET, PE, PP, PS	5
	Anzahl zusätzlicher Merkmalsklassen	0
	Detektion von Verpackungen 50 - 100 mm	4
	Detektion von Verpackungen 20 - 50 mm	4
	Ejektion von Verpackungen 20 - 50 mm	3
	Detektion von Food Grade / Non-Food Grade	0
	Digitaler Produktpass möglich	0
	Eignung für dunkle Verpackungsfarben	0
	Störanfälligkeit (Partikeldeformation, Verunreinigungen)	3
	Sortierung von markierten Flakes	0
	Durchsatzleistung im Vergleich zum Stand der Technik	5
	Rückstandsfreie Entfernung der Markierung	5
	Kosten	Kosten* Aufbringung Markierung
Kosten* Sensorsystem		4
Kosten Lizenzierung / Softwareaktualisierung		5
Sonstiges	Technological Readiness Level (laut Anbieter)	5
	Monopolstellung Anbieter	5
	Kombinationsfähigkeit mit anderen Identifikationstechniken	2

*Kosten umfassen sowohl Investitions- als auch Betriebskosten

Abbildung 4 Stärken-Schwächen-Profil der sensorgestützten Sortierung basierend auf der NIR-Spektroskopie. Die einzelnen Kriterien sind qualitativ auf einer Skala von 0 bis 5 bewertet, wobei 5 Punkte das Maximum darstellen. Ausgenommen sind die Kriterien **Kosten** und **Monopolstellung**, bei denen jeweils das Maximum für geringere Kosten bzw. geringere Monopolstellung steht. Für eine leichtere Lesbarkeit wurde zusätzlich zur Punkteskala ein Balkensystem mit einem Farbcode eingeführt (leerer Balken = 0, roter Balken = 1, oranger Balken = 2, gelber Balken = 3, grüner Balken = 4, blauer Balken = 5).

Wenn NIR-Strahlung auf das Partikel trifft, kann ihre Energie absorbiert, übertragen oder reflektiert werden. Entsprechend der Resonanzfrequenz des Materials werden bestimmte Wellenlängenbereiche besonders stark absorbiert. Die Absorption entspricht hauptsächlich Obertönen und Kombinationen von Schwingungsmoden von C-H-, O-H- und N-H-Bindungen, die in Polymeren vorkommen (Zhu et al. 2019). Die aus der Reflektion erhaltene Absorptionslinie bildet einen materialspezifischen „Fingerabdruck“, der mit Referenzspektren verglichen werden kann. Anhand dieses „Fingerabdrucks“ kann der jeweilige Kunststoff identifiziert werden. Aufgrund des langjährigen Einsatzes der NIR-Spektroskopie in der

sensorgestützten Sortierung von Kunststoffen ist diese somit mit TRL 9 (actual system proven in operational environment) zu bewerten. Eine qualitative Bewertung der sensorgestützten Sortierung ist in Abbildung 4 dargestellt.

Grenzen der NIR-Spektroskopie in der sensorgestützten Sortierung

Allgemein sind für eine komplikationsfreie Verarbeitung von Kunststoffen hohe Reinheiten im Sinne von Homopolymeren erforderlich. Dies stellt insbesondere das Recycling von Post-Consumer-LVP aus der getrennten Sammlung vor Herausforderungen. Denn mit größerer Heterogenität eines Stoffstroms steigt der Aufwand zur Erreichung der für die Weiterverarbeitung spezifischen Anforderungen. Häufig können derartig spezifische Anforderungen auch nicht mit dem aktuellen Stand der Technik durch eine sensorgestützte Vorsortierung und eine nachgeschaltete nass-mechanische Aufbereitung erreicht werden. Grund hierfür ist die Heterogenität des Designs von LVP, bei dem zur Erreichung bestimmter Eigenschaften auf Polymerunterklassen (z. B. Copolymere), Füllstoffe (z. B. Kreide) und Verbunde mit anderen Kunststoffen (z. B. Polyamid als Sauerstoffbarriere) zurückgegriffen wird. In der NIR-spektroskopischen Auswertung ergeben diese verschiedenen Verpackungsausführungen Mischspektren, die eine eindeutige Zuordnung zu den aktuell von den Sammlung- und Verwertungssystemen vorgegebenen Sortierfraktionen verhindern. Nichtsdestotrotz ist die Analyse von NIR-Spektren zur Detektion von Compounds, Füllstoffen, Monomer-Zusammensetzung und Polymerisationsgrad Forschungsgegenstand (bspw. (Koinig et al. 2022)). Hierfür werden insbesondere höhere spektrale Auflösungen sowie rechenintensivere Auswertungsalgorithmen verwendet. Eine besondere Herausforderung stellt die Beibehaltung kurzer Auswertezeiten trotz größerer Datenmengen dar.

Ein langjähriges Problem der Sortierung von Kunststoffen mit Hilfe von NIR-Spektroskopie stellen rußgeschwärmte Kunststoffe dar. Grund hierfür ist die starke Absorption der NIR-Strahlung durch den Ruß. Mittlerweile gibt es für dieses Problem von verschiedenen Seiten Lösungsansätze: so bieten Kunststoffhersteller schwarze Pigmente mit stärkerer NIR-Reflektion an¹ und Sortiermaschinenhersteller modifizierte Sortiergeräte. Letztere können entweder so modifiziert werden, dass sie lediglich die Präsenz schwarzer Kunststoffobjekte detektieren oder auch den Kunststoff. Die Detektion der Präsenz schwarzer Kunststoffobjekte kann einerseits durch eine veränderte Positionierung des NIR-Sensors erfolgen. Hierbei wird der NIR-Sensor auf den Sortierschacht ausgerichtet, wodurch sich schwarze Partikel vom

¹ <https://www.circularise.com/massbalancer>

Vergleichsstudie Identifikationsverfahren – Forum Rezyklat

Hintergrund abheben und somit detektiert werden können (STEINERT UniSort Black²). Alternativ kann mittels 3D-Lasertriangulation die Förderbandoberfläche abgetastet werden und die detektierte Oberfläche mit dem über NIR-Sensor ermittelten Abbild abgeglichen werden. Die Differenz der beiden Sensorsignale kann für die Ermittlung des schwarzen Objektes verwendet werden (TOMRA LOD³). Auch das Sortieren schwarzer Kunststoffobjekte ist möglich. Hierfür wird auf eine Anregungsstrahlung im mittleren Infrarot-Wellenbereich (MIR) zwischen 2.500 – 12.000 nm zurückgegriffen, da in diesem Bereich die Reflektion von Kunststoffen höher ist⁴.

3.3.2 Dichtentrennung

Grundlage für die Dichtentrennung von Kunststoffen ist die Schwimm-Sink-Sortierung. Das Wirkprinzip beruht auf einem fluiden Trennmedium, dessen Dichte zwischen den Dichten der spezifisch leichtesten sowie spezifisch schwersten Bestandteilen des zu trennenden Materials liegt. In diesem Trennmedium, zur Trennung von Kunststoffen meist Wasser, sollen die spezifisch schwereren Partikel absinken und die spezifisch leichteren aufschwimmen (vgl. Abbildung 5).

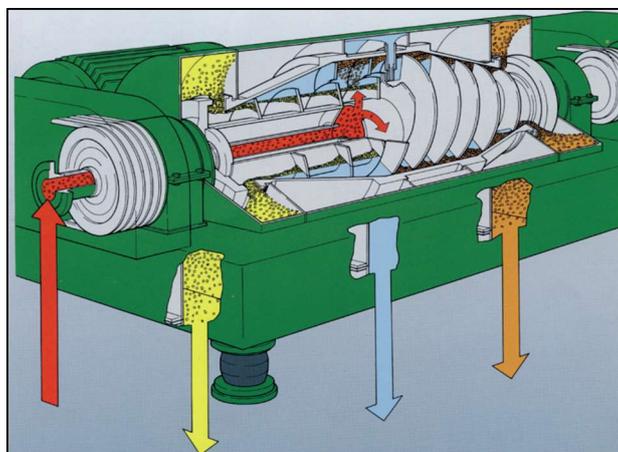


Abbildung 5 Funktionsprinzip einer Sortierzentrifuge: Die Kunststoffflakes (rot) werden in die mit einer Trennflüssigkeit gefüllte Zentrifuge gefördert. Die rotierende Zentrifuge schleudert das Material mit im Vergleich zur Trennflüssigkeit spezifisch größeren Dichte nach außen (orange). Das Material mit der spezifisch geringeren Dichte (= Zielfraktion) schwimmt im Zentrifugeninneren auf und wird durch die gegenläufige Schneckenwendel entgegengesetzt ausgetragen (gelb). (Andritz 2014)

² <https://steinertglobal.com/magnets-sensor-sorting-units/sensor-sorting/nir-sorting-systems/unisort-black/>

³ <https://languagesites.tomra.com/de-de/sorting/recycling/tomra-technology/lod>

⁴ <https://steinertglobal.com/de/magnete-sensorsortierer/sensorsortierung/nir-sortiersysteme/unisort-blackeye/>

Vergleichsstudie Identifikationsverfahren – Forum Rezyklat

Klassischerweise wird dieses Verfahren für die Aufbereitung von technischen Kunststoffen verwendet. Die Firma Vogt-Plastic GmbH betreibt in Deutschland zwei Sortieranlagen für Post-Consumer-LVP, in denen die Kunststoffzielfractionen durch Sortierzentrifugen gewonnen werden. Die beiden Anlagen haben eine Jahresgesamtkapazität von 180.000 Mg LVP aus der getrennten Sammlung. Zuerst werden Metalle mit einem Magnetabscheider sowie Getränkekartons und Papier mit Hilfe von NIR-Sortiergeräten heraussortiert. Anschließend wird das Material zerkleinert und mehreren nacheinander geschalteten Sortierzentrifugen zugeführt. Diese separieren das Material in die Fraktionen PE, PS, PP und Polyolefin (PO)-Mix. Bei Vogt-Plastic erfolgen somit Sortierung und die nass-mechanische Aufbereitung von Post-Consumer-LVP zu Kunststoff-Flakes bzw. Regranulat in einem Schritt. Klassischerweise erfolgen diese beiden Schritte in Deutschland getrennt voneinander in zwei Anlagen, die nicht zwingend dem gleichen Betreiber gehören und auch nicht am gleichen Standort sind. Die Vorteile dieser Praxis ist die Verwendung von etablierter, robuster und auf mechanischen Eigenschaften beruhender Sortiertechnik. Somit sind auch für Probleme der sensorgestützten Sortierung, wie auf Rußbasis eingefärbte oder reflektierende Kunststoffe, sich überlagernde Objekte oder LVP aus mehreren Kunststoffen, die nicht voneinander getrennt sind (bspw. HDPE-Flaschen und PP-Deckel) trennbar. Des Weiteren können durch den integrierten Betrieb Effizienzen im Transport, der Logistik und Qualität verbucht werden.

Nachteilig ist, dass bestimmte Wertstofffraktionen (z. B. PET) bei Vogt-Plastic nicht ausgebracht werden. Dies liegt einerseits an den in Deutschland getrennt gesammelten PET-Flaschen, die somit nur in geringerem Maße im Input einer Sortieranlage sind und andererseits an dem hohen Anteil von Multilayer-Material in PET-Schalen, welche nicht stofflich verwertet werden können. Technisch wäre eine Sortierung von PET möglich. Aber es können auch mit diesem Verfahren Monomaterial-LVP von Multimaterial-LVP nicht getrennt werden. Da der Sortiervorgang auf Flake-Ebene durchgeführt wird, können objektbezogene Informationen nicht berücksichtigt werden (z. B. als weiteres Sortierkriterium). Je nach zukünftigen Anforderungen an Sortierbetriebe, könnten diese ohne Eingriff in die Aufbereitungsverfahren nicht erfüllt werden. Ein Beispiel hierfür wäre die Einführung eines, im Rahmen der Novellierung der europäischen Ökodesign-Richtlinie diskutierten, digitalen Produktpasses. Aufgrund des langjährigen Einsatzes von Sortierzentrifugen zur Sortierung von Kunststoffen sind diese somit mit TRL 9 (actual system proven in operational environment) zu bewerten. In Abbildung 6 werden die Stärken und Schwächen der Dichtentrennung qualitativ gegenübergestellt.

Detektion / Identifikation / Stoffstrom	Lösung beinhaltet Sortierung	5
	Identifikation von PET, PE, PP, PS	5
	Anzahl zusätzlicher Merkmalsklassen	0
	Detektion von Verpackungen 50 - 100 mm	5
	Detektion von Verpackungen 20 - 50 mm	5
	Ejektion von Verpackungen 20 - 50 mm	5
	Detektion von Food Grade / Non-Food Grade	0
	Digitaler Produktpass möglich	0
	Eignung für dunkle Verpackungsfarben	5
	Störanfälligkeit (Partikeldeformation, Verunreinigungen)	5
	Sortierung von markierten Flakes	0
	Durchsatzleistung im Vergleich zum Stand der Technik	5
	Rückstandsfreie Entfernung der Markierung	5
	Kosten	Kosten* Aufbringung Markierung
Kosten* Sensorsystem		4
Kosten Lizenzierung / Softwareaktualisierung		5
Sonstiges	Technological Readiness Level (laut Anbieter)	5
	Monopolstellung Anbieter	5
	Kombinationsfähigkeit mit anderen Identifikationstechniken	0

*Kosten umfassen sowohl Investitions- als auch Betriebskosten

Abbildung 6 Stärken-Schwächen-Profil der Dichtentrennung, die von Vogt-Plastic verwendet wird. Die einzelnen Kriterien sind qualitativ auf einer Skala von 0 bis 5 bewertet, wobei 5 Punkte das Maximum darstellen. Ausgenommen sind die Kriterien Kosten und Monopolstellung, bei denen jeweils das Maximum für geringere Kosten bzw. geringere Monopolstellung steht. Für eine leichtere Lesbarkeit wurde zusätzlich zur Punkteskala ein Balkensystem mit einem Farbcode eingeführt (leerer Balken = 0, roter Balken = 1, oranger Balken = 2, gelber Balken = 3, grüner Balken = 4, blauer Balken = 5).

3.4 Verfahren basierend auf inhärenten Objekteigenschaften

Mit Verfahren, die auf inhärenten Objekteigenschaften beruhen, können *Eigenschaften*, die für das *menschliche Auge erkenn- oder ableitbar* sind, detektiert werden. Bei LVP könnten dies beispielsweise die Marke, Verpackungsform oder Verpackungen für Lebensmittel sein. Im Gegensatz zu den zuvor vorgestellten Verfahren, die Objekte aufgrund ihrer inhärenten Materialeigenschaften trennen können, wird für dieses Verfahren Objekterkennung genutzt.

3.4.1 Objekterkennung

Mit Hilfe softwaregestützter Objekterkennung können Objekte aufgrund ihrer inhärenten Eigenschaften wie Form, Farbe oder Bedruckungsmuster automatisiert detektiert werden. Um eine automatisierte Erkennung von Objekten zu ermöglichen, benötigt es die Fähigkeit eines Computers, Objekte zu erkennen und diese anschließenden Kategorien zuzuordnen. Von den

Vergleichsstudie Identifikationsverfahren – Forum Rezyklat

Fortschritten in der Entwicklung von leistungsstarken und effizienten Computersystemen, sinkenden Kosten für Datenspeicherung und schneller Datenübertragung profitieren insbesondere Objekterkennungstechnologien, die auf maschinellem Lernen beruhen.

Obwohl maschinelles Lernen seit den 1940er Jahren intensiv erforscht wird, gibt es keine allgemein anerkannte Definition (Haenlein und Kaplan 2019). Am häufigsten wird es als die Untersuchung von Computeralgorithmen charakterisiert, die es Computerprogrammen ermöglichen, sich automatisch aus vorhandenen Daten zu verbessern (Mitchell 2010; Russell und Norvig 2010) oder mit dem Zusatz, zukünftige Ergebnisse auf der Grundlage neuer Daten desselben Datentyps vorherzusagen (Döbel et al. 2018;) Durch den Algorithmus wird ein Modell gewonnen, das ohne vordefinierte Regeln zur Generierung von Entscheidungen, Vorhersagen oder Empfehlungen verwendet werden kann. Die Anwendung eines solchen Modells eignet sich besonders für komplexe Situationen, die z. B. kaum analytisch beschrieben werden können, für die aber genügend Beispieldaten (bspw. Sensordaten, Bilder, Texte) vorhanden sind. (Döbel et al. 2018).

Im Bereich der sensorgestützten Sortierung von Post-Consumer-LVP ist insbesondere die Anwendung von Objekterkennungsmodellen für die Analyse von Bildern bzw. Videostream interessant. Die meisten Objekterkennungsmodelle beruhen auf künstlichen neuronalen Netzwerken, die nachfolgend kurz charakterisiert werden. Ein künstliches neuronales Netzwerk ist ein Berechnungsmodell, dessen geschichtete Struktur vom Nervensystem von Lebewesen inspiriert ist. Dabei werden künstliche Neuronen so miteinander verknüpft, dass ihre Zusammenarbeit eine Funktion aus Ein- und Ausgangswerten beschreibt. Durch iterative Optimierung des Zusammenspiels der einzelnen künstlichen Neuronen kann ein künstliches neuronales Netz trainiert werden, es „lernt“. Das Training erfolgt so lange, bis die vorhandenen Ein- und Ausgangswerte eine unbekannte, den jeweiligen Sachverhalt ideal beschreibende Funktion, zufriedenstellend approximieren. (Herrmann 1997) Abbildung 7 zeigt den Aufbau eines einfachen künstlichen neuronalen Netzes, welches fünf Inputinformationen innerhalb von zwei Schichten zu einer Outputinformation verarbeitet.

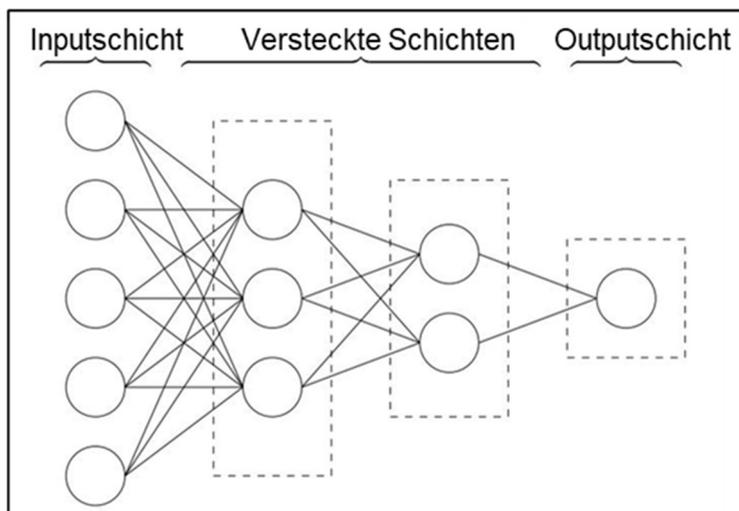


Abbildung 7 Aufbau eines einfachen neuronalen Netzwerkes. In dieses können fünf Datenpunkte eingespeist werden (Inputschicht), die anschließend in zwei versteckten Schichten mit jeweils drei bzw. zwei künstlichen Neuronen zu einer Outputinformation verarbeitet werden. Quelle: Modifiziert nach Mitchell 2010

Für die Objekterkennung wird meist ein sogenanntes Convolutional Neural Network verwendet, welches auf einem hierarchischen Informationsfluss basiert, also zunehmend komplexere Informationen in einfachere Kategorien filtert. Es beruht dabei auf einer abstrakten Form des visuellen Cortex, welcher im menschlichen Gehirn für das Erkennen und Verarbeiten von optischen Signalen der Augen zuständig ist. Die Neuronen der Inputschicht können dabei die Pixel eines Bildes repräsentieren – ein Pixel entspricht einem Neuron - wobei bei schwarz/weiß-Bildern die Helligkeit jener Pixel als sogenannte „Aktivierung“ der Neuronen herangezogen wird und somit die Input-Informationen darstellen. (Russell und Norvig 2010)

Im Kontext der sensorgestützten Sortierung werden als Input für die Objekterkennung meist Farbkameras verwendet. Grund hierfür ist einerseits, dass die meisten Algorithmen für dreikanalige-Inputdateien konzipiert sind und andererseits, dass im sichtbaren Bereich die für eine Sortierung notwendigen Informationen vorzufinden sind. Im Vergleich zur den für die im NIR-Bereich benötigten Spektrographen sind Farbkameras günstiger in der Beschaffung als auch robuster bezüglich Umgebungseinflüssen wie Temperatur und Luftfeuchtigkeit. Ein weiterer Vorteil ist, dass Objekte ohne vorherige Modifikation der Verpackungsoberfläche anhand ihrer optisch erkennbaren Merkmale detektiert werden können.

Ein Nachteil im Kontext der Sortierung von Post-Consumer-LVP ist deren große Variabilität hinsichtlich Größe, Form oder Farbe innerhalb kurzer Zeiträume. Allein in Deutschland kommen jährlich etwa 5.000 neue bzw. modifizierte LVP auf den Markt. Aufgrund der geringen Nutzungsdauer von LVP ist eine kontinuierliche Verbesserung und Anpassung der

Vergleichsstudie Identifikationsverfahren – Forum Rezyklat

Objekterkennungssoftware erforderlich. Deshalb bieten die Hersteller von Sortiergeräten bisher nur Module an, die eine Erkennung von Störstoffen ermöglichen, wie beispielsweise Silikonkartuschen (STEINERT Intelligent Object Identifier⁵; TOMRA GAIN⁶). Ferner ist eine Farbkamera bisher in Sortiergeräten nicht standardmäßig verbaut. Eine nachträgliche Aufrüstung aber inklusive des benötigten Auswertemoduls ist jedoch möglich. In den Interviews mit den beiden Sortiergeräteherstellern STEINERT und TOMRA wurde auf jeweils eigene Weiterentwicklungen der Objekterkennung auf Grundlage von individuellen Kundenwünschen hingewiesen. Die Eigenschaften werden in Abbildung 8 qualitativ bewertet.

Detektion / Identifikation / Stoffstrom	Lösung beinhaltet Sortierung	■	■	■	■	■	■	5
	Identifikation von PET, PE, PP, PS	■	■	■	■	■	■	5
	Anzahl zusätzlicher Merkmalsklassen	■						1
	Detektion von Verpackungen 50 - 100 mm	■	■	■	■	■		4
	Detektion von Verpackungen 20 - 50 mm	■	■	■	■	■		4
	Ejektion von Verpackungen 20 - 50 mm	■	■	■	■			3
	Detektion von Food Grade / Non-Food Grade	■	■	■	■			3
	Digitaler Produktpass möglich	■						1
	Eignung für dunkle Verpackungsfarben	■	■	■	■	■		4
	Störanfälligkeit (Partikeldeformation, Verunreinigungen)	■	■					2
	Sortierung von markierten Flakes							0
	Durchsatzleistung im Vergleich zum Stand der Technik	■	■	■	■	■	■	5
	Rückstandsfreie Entfernung der Markierung	■	■	■	■	■	■	5
Kosten	Kosten* Aufbringung Markierung	■	■	■	■	■	■	5
	Kosten* Sensorsystem	■	■	■	■			3
	Kosten Lizenzierung / Softwareaktualisierung	■	■	■	■	■		4
Sonstiges	Technological Readiness Level (laut Anbieter)	■	■	■	■	■	■	5
	Monopolstellung Anbieter	■	■	■	■	■		4
	Kombinationsfähigkeit mit anderen Identifikationstechniken	■	■					2

*Kosten umfassen sowohl Investitions- als auch Betriebskosten

Abbildung 8 Stärken-Schwächen-Profil der von den Sortiergeräteherstellern STEINERT und TOMRA angebotenen Sortiergeräte, die durch maschinelles Lernen auch Objekte erkennen können. Die einzelnen Kriterien sind qualitativ auf einer Skala von 0 bis 5 bewertet, wobei 5 Punkte das Maximum darstellen. Ausgenommen sind die Kriterien Kosten und Monopolstellung, bei denen jeweils das Maximum für geringere Kosten bzw. geringere Monopolstellung steht. Für eine leichtere Lesbarkeit wurde zusätzlich zur Punkteskala ein Balkensystem mit einem Farbcode eingeführt (leerer Balken = 0, roter Balken = 1, oranger Balken = 2, gelber Balken = 3, grüner Balken = 4, blauer Balken = 5).

Jenseits der „klassischen“ Sortiergerätehersteller, die vornehmlich auf die Kombination von Farbkamera mit NIR-Spektroskopie setzen, drängen in den letzten Jahren auch Neugründungen auf den Markt der sensorgestützten Abfallsortierung. Diese sind in der Regel

⁵ <https://steinertglobal.com/intelligent-digital-solutions-for-waste/object-identifier.html>

⁶ <https://solutions.tomra.com/en/gain-deep-learning>

stark auf die Softwareentwicklung, insbesondere der Objekterkennung, fokussiert. Außerdem wird für das Ausklauben von Objekten ein Portalroboter verwendet. Im Vergleich zu Luftventilen, sind Portalroboter insbesondere für schwere, kompakte Objekte geeignet. Sie gelten jedoch im Praxiseinsatz durch ihren komplexen Aufbau als störanfällig. Für das erfolgreiche Greifen bzw. Ansaugen der Objekte, werden langsame Förderbandgeschwindigkeiten von $0,1 - 1 \text{ ms}^{-1}$ benötigt (bei Sortiergeräten mit Luftventilen werden Bandgeschwindigkeiten von etwa 3 ms^{-1} verwendet). Dies führt zu einem niedrigeren Durchsatz und somit höheren Sortierkosten im Vergleich zur Sortierung mithilfe von Luftventilen. Zuletzt kann ein Roboterarm in einer über die gesamte Bandbreite stets nur ein Objekt ergreifen, während in konventionellen Sortiergeräten mehrere Luftdüsen parallel angesteuert werden können. Dies kann jedoch auch einen Vorteil darstellen, da das Mitreißen von ungewollten Objekten (wie z. B. Verpackungen aus anderen Materialien, die nicht zur Zielfraktion gehören) reduziert werden kann. Aus diesem Grund, werden Sortierroboter für Post-Consumer-LVP häufig nachgelagert an die eigentliche Sortierung als Qualitätskontrolle eingesetzt.

3.4.1.1 ZenRobotics

Die finnische Firma ZenRobotics bietet bereits seit den frühen 2010er Jahren Lösungen für die Abfallsortierung an, die auf maschinellem Lernen basieren. Als bildgebender Sensor wird eine Farbkamera verwendet, die mittig auf einer Brücke montiert ist und senkrecht hinunter auf ein Förderband gerichtet ist. Das zu sortierende Material wird mithilfe eines Portalroboters geklaubt, wobei in mehrere Zielfraktionen simultan sortiert werden kann. Aktuell werden zwei verschiedene Ausführungen angeboten, die sich neben dem Effektor auch in den verwendeten Sensoren unterscheiden: für Bau- und Abbruchabfälle wird ein Greifer zusammen mit einer Farbkamera, einem NIR-Sensor, einem Metalldetektor sowie einem Laser-Scanner eingesetzt; es können Objekte von bis zu 30 kg sortiert werden (Heavy Picker⁷). Für Post-Consumer-LVP gibt es einen auf schnelle Bewegungen ausgelegten Vakuum-Sauggreifer. Dieser verwendet eine Farbkamera als Sensor (Fast Picker⁸). Beide Roboterversionen greifen auf die gleiche Software, dem ZenBrain, zurück⁹. Der Fast Picker (vgl. Abbildung 9) ist im Stande, bis zu 80 Griffe pro Minute über einer Förderbandbreite von 1.200 mm und -länge von 600 mm auszuführen. Die Geschwindigkeit des Förderbands beträgt je nach Anwendungsfall $0,1$ bis 1 ms^{-1} . Objekte dürfen ein maximales Gewicht von 1 kg und eine maximale Abmessung von

⁷ <https://zenrobotics.com/heavy-picker>

⁸ <https://zenrobotics.com/fast-picker>

⁹ <https://zenrobotics.com/zenbrain>

Vergleichsstudie Identifikationsverfahren – Forum Rezyklat

400 mm × 400 mm × 240 mm aufweisen. Die minimale Größe entspricht mit etwa 50 mm der Saugnapfgröße des Greifers. Da die Kunststoffe häufig von der Form und Farbe von LVP abhängen, lassen sich ZenRobotics zufolge alle im Post-Consumer-Bereich anfallenden LVP erkennen bzw. sortieren. Angaben bezüglich der Ausbringungsraten variieren und sind stark von den Versuchsbedingungen abhängig. ZenRobotics berichtet von einer möglichen sortenreinen Stoffrückgewinnung von bis zu 99 %, wobei die genauen Umstände (z. B. Vorsortierung des Materials, Bandbelegung etc.) unklar sind. Im realen Anlagenbetrieb sind Ausbringungsraten von etwa 70 % bekannt. Allerdings sei in diesem Kontext auf den in Abschnitt 2.2 beschriebenen Zusammenhang von Detektion, Identifikation und mechanische Separation hingewiesen. Beispielsweise ist somit denkbar, dass der Roboterarm nicht alle von der Objekterkennungssoftware erkannten Objekte separieren kann.

Da für den Sensor eine Farbkamera eingesetzt wird, ist die Erkennung von schwarzen Kunststoffen möglich.

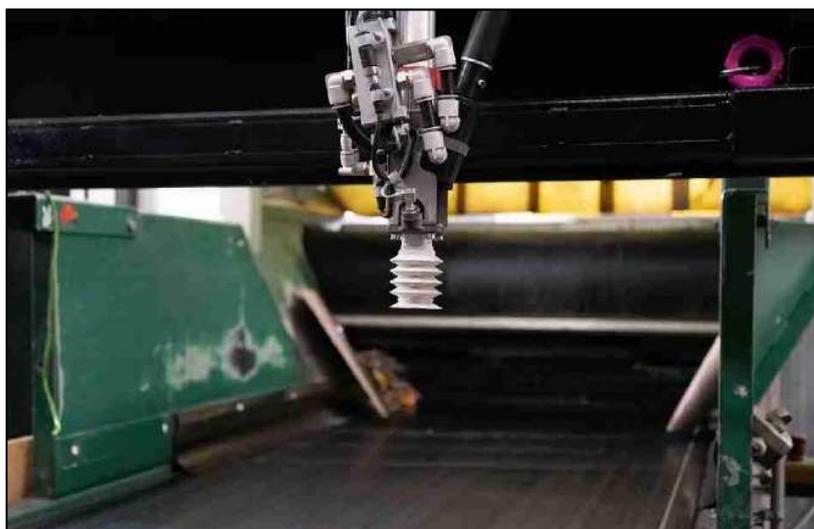


Abbildung 9 Der Fast Picker von ZenRobotics mit einem Vakuum-Sauggreifer als Effektor.
Quelle: ZenRobotics, 2022¹⁰

Bisher wird der Fast Picker von ZenRobotics meist zur nachträglichen Qualitätssicherung eingesetzt. Er ist somit den NIR-Sortiergeräten nachgeschaltet und unterstützt bzw. ersetzt die händische Nachsortierung. Beispielsweise werden in den Sortieranlagen der Firma Altem¹¹ in Straßburg, Frankreich, und der Firma Masotina¹² in Mailand, Italien, durch den Fast Picker

¹⁰ <https://zenrobotics.com/robots>

¹¹ <https://zenrobotics.com/clients/schroll>

¹² <https://zenrobotics.com/clients/masotina>

Vergleichsstudie Identifikationsverfahren – Forum Rezyklat

Störstoffe aus der Fraktion bereits sortierter PET-Flaschen entfernt. Somit ist der Fast Picker als TRL 9 (actual system proven in operational environment) einzustufen.

Eine qualitative Bewertung der Stärken und Schwächen des Fast Pickers von Zenrobotics ist Abbildung 10 zu entnehmen.

Detektion / Identifikation / Stoffstrom	Lösung beinhaltet Sortierung	■	■	■	■	■	■	5
	Identifikation von PET, PE, PP, PS	■	■	■	■	■	■	4
	Anzahl zusätzlicher Merkmalsklassen	■	■	■	■	■	■	2
	Detektion von Verpackungen 50 - 100 mm	■	■	■	■	■	■	4
	Detektion von Verpackungen 20 - 50 mm	■	■	■	■	■	■	3
	Ejektion von Verpackungen 20 - 50 mm	■	■	■	■	■	■	2
	Detektion von Food Grade / Non-Food Grade	■	■	■	■	■	■	2
	Digitaler Produktpass möglich	■	■	■	■	■	■	1
	Eignung für dunkle Verpackungsfarben	■	■	■	■	■	■	1
	Störanfälligkeit (Partikeldeformation, Verunreinigungen)	■	■	■	■	■	■	2
	Sortierung von markierten Flakes	■	■	■	■	■	■	0
	Durchsatzleistung im Vergleich zum Stand der Technik	■	■	■	■	■	■	2
	Rückstandsfreie Entfernung der Markierung	■	■	■	■	■	■	5
	Kosten	Kosten* Aufbringung Markierung	■	■	■	■	■	■
Kosten* Sensorsystem		■	■	■	■	■	■	1
Kosten Lizenzierung / Softwareaktualisierung		■	■	■	■	■	■	3
Sonstiges	Technological Readiness Level (laut Anbieter)	■	■	■	■	■	■	5
	Monopolstellung Anbieter	■	■	■	■	■	■	4
	Kombinationsfähigkeit mit anderen Identifikationstechniken	■	■	■	■	■	■	2

*Kosten umfassen sowohl Investitions- als auch Betriebskosten

Abbildung 10 Stärken-Schwächen-Profil des von ZenRobotics angebotenen Fast Pickers. Die einzelnen Kriterien sind qualitativ auf einer Skala von 0 bis 5 bewertet, wobei 5 Punkte das Maximum darstellen. Ausgenommen sind die Kriterien Kosten und Monopolstellung, bei denen jeweils das Maximum für geringere Kosten bzw. geringere Monopolstellung steht. Für eine leichtere Lesbarkeit wurde zusätzlich zur Punkteskala ein Balkensystem mit einem Farbcode eingeführt (leerer Balken = 0, roter Balken = 1, oranger Balken = 2, gelber Balken = 3, grüner Balken = 4, blauer Balken = 5).

3.4.1.2 Recycleye

Ein weiteres im Bereich der Objekterkennung aktives Unternehmen ist die britische Firma Recycleye. Wie auch bei ZenRobotics ist das Kernprodukt eine auf maschinellem Lernen basierende Bilderkennungssoftware für Farbbilder, das sogenannte Recycleye Vision. Diese kann auf die, nach eigenen Angaben mit mehr als drei Millionen Bildern, größte Datenbank mit Abfallbildern, dem sogenannten WasteNet, zurückgreifen¹³. In ihr sind sowohl Abfallbilder aus industrieller als auch Laborumgebung enthalten. Im Gegensatz zum ZenBrain ist Recycleye Vision auf die Detektion von Post-Consumer-LVP ausgerichtet. Einem Objekt können bis zu

¹³ <https://recycleye.com/wastenet/>

Vergleichsstudie Identifikationsverfahren – Forum Rezyklat

acht verschiedenen Kategorien zugeteilt werden (z. B. Verpackungsart, Materialart oder Lebensmittelverpackung; vgl. Abbildung 11)¹⁴.

Density	Material	Object	Size	Colour
0 Spaced 1 Low 2 High Grade 0 Unapplicable 1 Mixed 2 Foodgrade 3 Non foodgrade Damage 0 Unapplicable 1 Mixed 2 Damaged 3 Undamaged Format 0 Unapplicable 1 Mixed 2 No-feature 3 Flat 4 Deep 5 Square 6 Circular 7 Sleeved	0 Unknown 1 Mixed 2 PET 3 HDPE 4 PVC 5 LDPE 6 PP 7 PS 8 Newspaper 9 Magazine 10 Print 11 Greyboard 12 Cardboard 13 Steel 14 Aluminum 15 Multi 16 Textiles 17 WEEE 18 Moulded-pulp 19 Mixed-plastic 20 Residual	0 Unknown 1 Mixed 2 Bottle 3 Tray 4 Can 5 Film 6 Aerosol 7 TetraPak 8 Eggcarton 9 Cylinder 10 Box 11 Toothpaste 12 Pot 13 Wrapper 14 Lid	0 Unapplicable 1 Mixed 2 0-0.25l 3 0.25-0.5l 4 0.5-1l 5 1-1.5l 6 1.75-2l 7 >2l 8 Small 9 Large	0 Unapplicable 1 Mixed 2 Clear transparent 3 White transparent 4 Blue transparent 5 Green transparent 6 Brown transparent 7 Red transparent 8 Coloured transparent 9 White opaque 10 Blue opaque 11 Green opaque 12 Brown opaque 13 Black opaque 14 Coloured opaque

Abbildung 11 Der Datensatz des WasteNet erlaubt die Hinterlegung von Objektinformationen zu acht Kategorien: Dichte, Lebensmittelverpackung, Beschädigungsgrad, geometrische Form, Materialart, Verpackungsart, Größe bzw. Verpackungsvolumen und Farbe. Quelle: Recycleye, 2022¹³.

Abbildung 12 zeigt ein Beispiel für die Objekterkennungssoftware von Recycleye anhand einer Papiersortierlinie. Ähnlich wie bei ZenRobotics wird eine Farbkamera verwendet, die mittig auf einer Brücke montiert ist und senkrecht hinunter auf ein Förderband gerichtet ist.

¹⁴ <https://recycleye.com/artificial-intelligence-total-waste/>

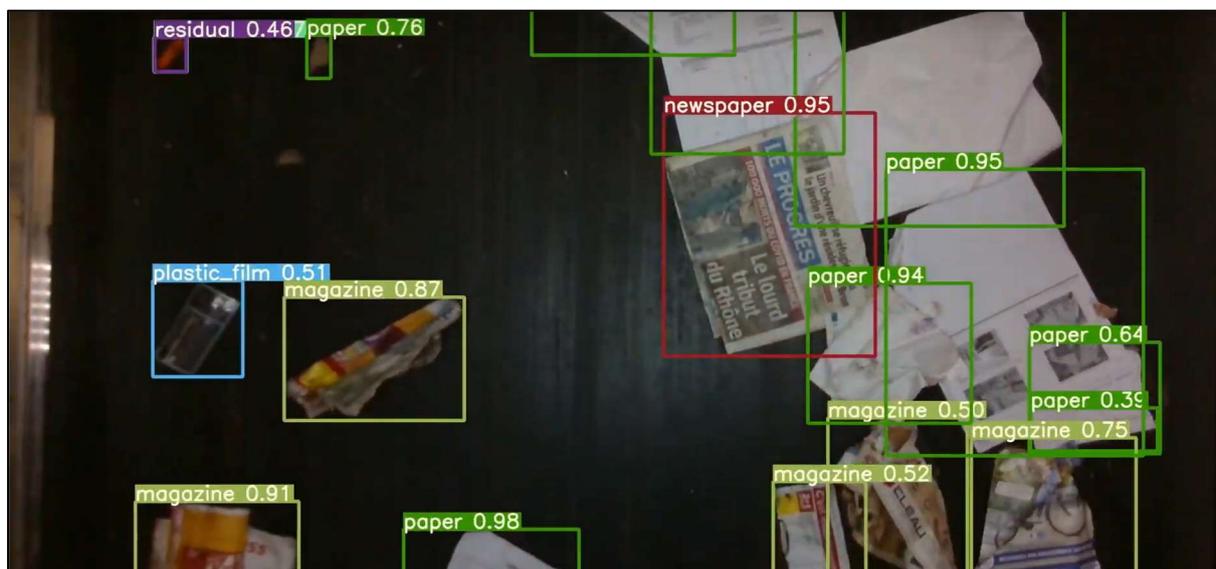


Abbildung 12 Ein Beispiel für die Objekterkennung und -klassifizierung durch Recycleye Vision anhand einer Papiersortierlinie. Die Rahmen umschließen die erkannten Objekte; durch Farbe und Beschriftung sind die zugeordneten Klassen nachvollziehbar; die Dezimalzahlen weisen auf die Wahrscheinlichkeit einer korrekten Zuordnung hin, wobei eine 100-prozentige Richtigkeit einer 1 entsprechen würde. Quelle: Recycleye, 2022¹⁵.

Dabei ist es auch möglich anhand von Logos verschiedene Marken zu erkennen. Eine solche Erkennung ist bisher nur für Getränkeflaschen möglich und hierbei wiederum auf drei Marken reduziert ist (s. Abbildung 13)¹⁶. Aktuell (Stand September 2022) führt Recycleye Praxistests zur Separierung von Lebensmittel- und Nicht-Lebensmittelverpackungen aus PP, HD-PE und PET durch¹⁷. Nach eigenen Angaben können Objekte nach den in Abbildung 11 aufgeführten Kategorien sortiert werden.

¹⁵ <https://youtu.be/jqt5FSQ1z00?list=PLrUXye9X3kRVf64IH4n6hDz5F5pebsbOo>

¹⁶ <https://recycleye.com/logo-detection-paul-gredigui/>

¹⁷ <https://recycleye.com/recycleye-project-omni/>



Abbildung 13 Der Objekterkennungsalgorithmus von Recycleye kann auch anhand von Logos die Marken von verschiedenen Getränkeflaschen erkennen. Dies ist bisher auf die drei Firmen mit dem höchsten Marktanteil (Coca-Cola, Pepsi, Heineken) reduziert. Quelle: Recycleye 2022¹⁶

Auch Recycleye nutzt für die Klaubung der Objekte einen Portalroboter mit Vakuumsauggreifer. Die maximale Grifftrate pro Minute liegt hier bei 60 Objekten. Angaben bezüglich minimaler und maximaler Partikelgröße, sowie -gewicht und Förderbandgeschwindigkeit stehen nicht zur Verfügung. Allerdings können hier ähnliche Werte wie bei ZenRobotics angenommen werden¹⁸.

Neben Recycleye Vision bietet Recycleye auch einen Algorithmus für das Rendering von Abfallströmen an. Primäres Ziel des Rendering-Ansatzes ist das verbesserte Ergreifen von Objekten¹⁹. Insbesondere bei komplexen Oberflächenstrukturen und sich bewegenden Objekten ist eine präzise Lokalisierung des idealen Greifpunktes relevant. Da durch die Farbkamera lediglich ein zweidimensionales Abbild des Abfallstroms erzeugt wird, kann durch eine dreidimensionale Rekonstruktion die Greifpunktlokalisierung optimiert werden. Als Input werden die Form und Textur des mittels Recycle Vision erkannten Objektes genutzt. Ein weiteres Anwendungsfeld dieser Lösung stellt im Rahmen der Abfallsortierung die Volumenstromkontrolle dar.

Bezüglich der Ausbringung von Recycleye liegen keine überprüfbaren Angaben vor. Es kann aber angenommen werden, dass diese in einem ähnlichen Bereich liegen wie bei ZenRobotics (vgl. Abschnitt 3.4.1.1). Auch hier sei auf den in Abschnitt 2.2 beschriebenen Zusammenhang von Detektion und Separation hingewiesen. Somit besteht auch bei Recycleye ebenfalls die Möglichkeit, dass die Software präziser arbeitet als die Hardware ist.

¹⁸ <https://recycleye.com/recycling-robotics-total-automation/>

¹⁹ <https://recycleye.com/single-shot-2d-image-to-3d-model/>

Vergleichsstudie Identifikationsverfahren – Forum Rezyklat

Ähnlich wie ZenRobotics wird der Sortierroboter von Recycleye bisher zur Qualitätskontrolle in Sortieranlagen eingesetzt und wird zwischen TRL 7 (system prototype demonstration in operational environment) und TRL 8 (system complete and qualified) eingestuft.

Die Stärken und Schwächen von Recycleye werden in Abbildung 14 qualitativ bewertet.

Detektion / Identifikation / Stoffstrom	Lösung beinhaltet Sortierung	■	■	■	■	■	■	5
	Identifikation von PET, PE, PP, PS	■	■	■	■	■	■	4
	Anzahl zusätzlicher Merkmalsklassen	■	■	■	■	■	■	3
	Detektion von Verpackungen 50 - 100 mm	■	■	■	■	■	■	4
	Detektion von Verpackungen 20 - 50 mm	■	■	■	■	■	■	3
	Ejektion von Verpackungen 20 - 50 mm	■	■	■	■	■	■	2
	Detektion von Food Grade / Non-Food Grade	■	■	■	■	■	■	4
	Digitaler Produktpass möglich	■	■	■	■	■	■	1
	Eignung für dunkle Verpackungsfarben	■	■	■	■	■	■	1
	Störanfälligkeit (Partikeldeformation, Verunreinigungen)	■	■	■	■	■	■	2
	Sortierung von markierten Flakes	■	■	■	■	■	■	0
	Durchsatzleistung im Vergleich zum Stand der Technik	■	■	■	■	■	■	2
	Rückstandsfreie Entfernung der Markierung	■	■	■	■	■	■	5
Kosten	Kosten* Aufbringung Markierung	■	■	■	■	■	■	5
	Kosten* Sensorsystem	■	■	■	■	■	■	1
	Kosten Lizenzierung / Softwareaktualisierung	■	■	■	■	■	■	3
Sonstiges	Technological Readiness Level (laut Anbieter)	■	■	■	■	■	■	5
	Monopolstellung Anbieter	■	■	■	■	■	■	4
	Kombinationsfähigkeit mit anderen Identifikationstechniken	■	■	■	■	■	■	2

*Kosten umfassen sowohl Investitions- als auch Betriebskosten

Abbildung 14 Stärken-Schwächen-Profil von Recycleye. Die einzelnen Kriterien sind qualitativ auf einer Skala von 0 bis 5 bewertet, wobei 5 Punkte das Maximum darstellen. Ausgenommen sind die Kriterien Kosten und Monopolstellung, bei denen jeweils das Maximum für geringere Kosten bzw. geringere Monopolstellung steht. Für eine leichtere Lesbarkeit wurde zusätzlich zur Punkteskala ein Balkensystem mit einem Farbcode eingeführt (leerer Balken = 0, roter Balken = 1, oranger Balken = 2, gelber Balken = 3, grüner Balken = 4, blauer Balken = 5).

3.5 Verfahren basierend auf nicht-inhärenten Materialeigenschaften

Charakteristisch für nicht-inhärente Materialeigenschaften ist, dass erst durch eine *der Produktion nachgeschaltete, nachträgliche Manipulation des Werkstoffes gezielt eine weitere Eigenschaft hinzugefügt* wird. Diese Eigenschaft gilt ab dann als eine inhärente Materialeigenschaft. Im Kontext von Identifikationsverfahren für Post-Consumer-LVP schließt dies insbesondere Markierungsverfahren ein, die eine geringe Anzahl an Zusatzmerkmalen (klassischerweise eines, bspw. Lebensmittelverpackung) ermöglichen. Mit Hilfe von Sortiergeräten kann somit nach zusätzlichen Merkmalen sortiert werden.

3.5.1 Fluoreszenz-Markierung

Grundlage für die Fluoreszenz-Markierung ist die Verwendung fluoreszierender / phosphoreszierender Substanzen, häufig auf Basis von Seltenerdverbindungen. Diese werden wie ein Additiv im Compounder während der Polymerschmelze in die Materialmatrix eingebracht. In diesem Fall sind sie anschließend fester Bestandteil des daraus hergestellten Objektes. Alternativ ist auch eine Verwendung der Markersubstanzen im Etikettendruck möglich. Hierbei werden die Markersubstanzen als Teil der Druckfarbe entweder auf ein Etikett oder direkt auf das Objekt aufgebracht.

Zur Detektion werden die markierten Objekte mit einer elektromagnetischen Strahlung (z. B. Laser oder Ultraviolettes (UV)-Licht) bestrahlt. Infolgedessen emittieren die Markersubstanzen weitgehend unbeeinflusst von Staub und Schmutz in jede Richtung ihre spezifische Fluor- oder Phosphoreszenz. Diese kann anschließend durch Sensoren wie Farb- oder NIR-Kameras detektiert werden. Da dieses Prinzip (Anregung – Emission – Detektion) analog auch in den konventionell genutzten, sensorgestützten Sortiergeräten verwendet wird (vgl. Abschnitt 2.2), sind Fluoreszenz-Markierungen für die Sortierung von Post-Consumer-LVP grundsätzlich geeignet.

Voraussetzung für die Fluoreszenz ist die Anregung der Moleküle der Markersubstanz durch die Strahlung. Während der anschließenden Entspannung auf den Grundzustand wird Strahlung in einer charakteristischen Wellenlänge emittiert. Dieser Mechanismus wird Up-Conversion genannt, da nach sequenzieller Absorption einer diskreten Menge energetisch geringerer Photonen (mindestens zwei), darauffolgend eine kleinere Anzahl Photonen größeren Energieinhaltes emittiert werden. Für die sensorgestützte Sortierung ist hierbei eine hohe Stabilität der angeregten Elektronenzustände relevant, da dies längere Detektionszeiten ermöglicht. (Woidasky et al. 2020a)

Die Anwendung der beschriebenen Systeme ist von den Anbietern (mit Ausnahme von SORT4CIRCLE®) bisher auf förderbandbetriebene Sortiergeräte mit Druckluftaustrag konzeptioniert. Ein Austrag durch andere Systeme (bspw. Roboter oder Klappen) ist theoretisch ebenfalls möglich.

3.5.1.1 Nextloopp

Die britische Firma Nextloopp Ltd., mit Sitz in London, bietet Recyclinglösungen für Post Consumer-LVP aus PP mit Lebensmittelzulassung an. Hintergrund ist eine seit April 2022 im Vereinigten Königreich erhobene Kunststoffsteuer in Höhe von 200 £ pro Tonne für Produzenten und Importeure von Kunststoff-LVP mit einem Rezyklatanteil von unter 30 %

Vergleichsstudie Identifikationsverfahren – Forum Rezyklat

(Plastic Packaging Tax). Gemeinsam mit der dazugehörigen Firma Nextek, werden zwei Verfahren angeboten: Ein Markierungsverfahren für LVP aus PP, genannt Polyprism, sowie ein anschließendes Dekontaminationsverfahren, genannt PPristine²⁰.

Ziel

Hauptziel von Nextloop ist die Schaffung eines geschlossenen Recyclingkreislaufes für Post-Consumer-LVP aus PP. Durch die Markierung (Polyprism), sowie die Aufbereitung (PPristine), sollen zukünftig lebensmittelzugelassene PP-Rezyklate generiert werden können. Weitere Nebenziele sind die Bereitstellung von Rezyklaten, die für die Herstellung von Kosmetikprodukten geeignet bzw. für verschiedene Verarbeitungsverfahren geeignet sind²¹.

Detektionsverfahren

Das Funktionsprinzip des Detektionsverfahrens entspricht dem in Abschnitt 3.5.1 beschriebenen Ablauf. Die Herkunft bzw. Zusammensetzung der Markersubstanz wird seitens Nextloops nicht offengelegt, eine Seltenerdverbindung ist jedoch anzunehmen. Parallel zu den angebotenen Markersubstanzen, werden aktuell graphitbasierte Markersubstanzen entwickelt, die laut eigenen Angaben ab 2023 zur Verfügung stehen. Die bestehende Markersubstanz ist bereits von der Europäischen Behörde für Lebensmittelsicherheit (EFSA) als auch der amerikanischen Food and Drug Administration (FDA) als lebensmitteltauglich eingestuft. Die neu entwickelte, graphitbasierte Markersubstanz soll diese ebenso erhalten²².

Die Markersubstanz von Nextloop wird im UV-Bereich angeregt und emittiert im sichtbaren Wellenbereich (vgl. Abbildung 15). Dementsprechend wird eine UV-Lampe, eine Farbkamera sowie eine Software-Einbindung benötigt. Zur Materialdetektion ist weiterhin ein NIR-Sensor notwendig. Die Einbindung aller benötigten Module in ein bestehendes Sortiergerät wird von Nextloop angeboten.

Stoffstrom

Zielstoffstrom des Markierungsverfahrens von Nextloop sind LVP aus PP mit Lebensmittelzulassung. Die zusätzlich zum NIR-Signal notwendige Information „Lebensmittelzulassung“ kann durch die Markierung gewährleistet werden. Eine Ausweitung auf verpackungs- oder materialfremde Stoffströme ist bisher nicht geplant, allerdings kann Nextloop auch drei Markierungssubstanzen mit unterschiedlichen Farbemissionen

²⁰ <https://www.nextek.org/>

²¹ <https://www.nextloop.com/about/>

²² <https://www.nextloop.com/project/making-an-impact-across-the-globe/>

Vergleichsstudie Identifikationsverfahren – Forum Rezyklat

aufbringen. Somit könnten theoretisch sieben verschiedene Merkmalskombinationen erzeugt werden. Prinzipiell kann die Markierung sowohl in die Polymermatrix der Verpackung als auch auf das Etikett aufgebracht werden. Allerdings wird seitens Nextloopp die Markierung auf abtrennbare Etiketten bevorzugt, damit der PP-Stoffstrom nicht zusätzlich markiert wird. Diese können nach einer Sortierung des markierten PP-Stroms, während der nass-mechanischen Aufbereitung, von den PP-Verpackungen getrennt werden. Somit können die getrennten PP-Post-Consumer-LVP dem PPristine-Recyclingverfahren zugeführt werden. Aus den markierten Etiketten soll eine Rückgewinnung der Markierungssubstanz möglich sein. Danach kann aus den Etikettenfolien ein Polyolefin-Rezyklat hergestellt werden²³.

Technisch gibt es somit keine für die Markierung zu berücksichtigende Mindestobjektgröße. Allerdings bevorzugt Nextloopp aus zuvor genannten Gründen eine Markierung von Objekten die groß genug für eine Etikettierung sind.



Abbildung 15 Die Markierung von Nextloopp: Oben links sind markierte Objekte (die linken vier Flaschen) und unmarkierte Flaschen (Flasche rechts) im Tageslicht zu sehen; die Markierung ist für das menschliche Auge nicht wahrnehmbar. Im Bild unten links sind die gleichen Objekte unter Anregung von UV-Licht zu sehen, wodurch die markierten Objekte in einer spezifischen Farbe fluoreszieren. Das rechte Bild zeigt die Möglichkeit Markierungssubstanzen mit unterschiedlichen Farbemissionen (gelb, rot, blau) voneinander zu unterscheiden. Quelle: Recyclingtoday, 2021²⁴.

Bewertung

Die beiden Verfahren von Nextloopp, Polyprism und PPristine, befinden sich nach eigener Aussage im Moment zwischen den TRL-Stufen 8 (system complete and qualified) und 9 (actual

²³ <https://www.nextloopp.com/>

²⁴ <https://www.recyclingtoday.com/article/nextloop-food-grade-pp-recycling/>

Vergleichsstudie Identifikationsverfahren – Forum Rezyklat

system proven in operational environment). Die erste Industrie-maßstabsgetreue Anlage wird von Viridor mit einer Kapazität von 10.000 Mg/a konzipiert und gebaut. Der Fokus auf PP als alleinig zu markierenden Stoffstrom beruht hauptsächlich auf dem Ziel, lebensmittelzugelassene Rezyklate zu generieren. Für diesen Stoffstrom gibt es bisher kein von der EFSA zugelassenes Recyclingverfahren, da diese bisher nur mit Material mit Lebensmittelzulassung beschickt werden dürfen. Ferner sind nach Angaben von Nextloopp etwa 80 % des PP im Inputstrom von Sortieranlagen Lebensmittelverpackungen.

Als Kosten für die Markierung von einer Tonne LVP gibt Nextloopp 20 € an. Für die Aufrüstung eines bestehenden Sortiergerätes werden einmalige Kosten in Höhe von 30.000 € angegeben. In Abbildung 16 werden die Stärken und Schwächen von Nextloopp qualitativ bewertet.

Detektion / Identifikation / Stoffstrom	Lösung beinhaltet Sortierung	5
	Identifikation von PET, PE, PP, PS	5
	Anzahl zusätzlicher Merkmalsklassen	3
	Detektion von Verpackungen 50 - 100 mm	4
	Detektion von Verpackungen 20 - 50 mm	4
	Ejektion von Verpackungen 20 - 50 mm	3
	Detektion von Food Grade / Non-Food Grade	5
	Digitaler Produktpass möglich	0
	Eignung für dunkle Verpackungsfarben	4
	Störanfälligkeit (Partikeldeformation, Verunreinigungen)	4
	Sortierung von markierten Flakes	0
	Durchsatzleistung im Vergleich zum Stand der Technik	5
	Rückstandsfreie Entfernung der Markierung	5
	Kosten	Kosten* Aufbringung Markierung
Kosten* Sensorsystem		3
Kosten Lizenzierung / Softwareaktualisierung		5
Sonstiges	Technological Readiness Level (laut Anbieter)	4
	Monopolstellung Anbieter	3
	Kombinationsfähigkeit mit anderen Identifikationstechniken	2

*Kosten umfassen sowohl Investitions- als auch Betriebskosten

Abbildung 16 Stärken-Schwächen-Profil von Nextloopp. Die einzelnen Kriterien sind qualitativ auf einer Skala von 0 bis 5 bewertet, wobei 5 Punkte das Maximum darstellen. Ausgenommen sind die Kriterien Kosten und Monopolstellung, bei denen jeweils das Maximum für geringere Kosten bzw. geringere Monopolstellung steht. Für eine leichtere Lesbarkeit wurde zusätzlich zur Punkteskala ein Balkensystem mit einem Farbcode eingeführt (leerer Balken = 0, roter Balken = 1, oranger Balken = 2, gelber Balken = 3, grüner Balken = 4, blauer Balken = 5).

3.5.1.2 Polysecure

Die Firma Polysecure mit Sitz in Freiburg i. Br. bietet neben markerbasierten Lösungen zum Verfolgen, Identifizieren und Authentifizieren von Produkten auch Lösungen für das

Vergleichsstudie Identifikationsverfahren – Forum Rezyklat

markerbasierte Sortieren von Kunststoffprodukten bzw. -verpackungen an²⁵. Hierbei werden sowohl Markierungssubstanzen und die für Sortiergeräte benötigten Detektionseinheiten als auch ein eigenes Sortiermodul (SORT4CIRCLE[®]) angeboten, welches in einem Schritt Objekte vereinzelt, detektiert und sortiert.

Polysecure offeriert im Kern zwei Markierungslösungen: die Markierung und Erweiterung von bestehenden Anlagen mit bis zu drei verschiedenen Markern (TBS light) und die Kombination dieser drei verschiedenen Marker in unterschiedlichen Konzentrationen (TBS complete). Während für TBS light bestehende LVP-Sortieranlagen mit Detektionseinheiten für die NIR-Sortiergeräte aufgerüstet werden müssen, soll das Sortiermodul SORT4CIRCLE[®] die Kaskadenanordnung von Sortiergeräten ersetzen und direkt nach der mechanischen Vorkonditionierung (Vereinzelung, Klassierung) eingesetzt werden.

Die Markierungssubstanzen von Polysecure werden bereits industriell für die Trennung von PVC-Fensterprofilen genutzt, die aus einem optisch nicht zu unterscheidbarem glasfaserverstärkten Kern und einer glasfaserfreien Außenschicht bestehen (vgl. Abbildung 17). Während der Extrusion werden die Markierungssubstanzen dem glasfaserverstärkten PVC-Fensterprofil-Kern zugemischt. Nachdem das Fensterprofil das Lebensende erreicht hat, wird es auf Korngrößen von 2 – 8 mm zerkleinert und die markierte, glasfaserverstärkte Komponente kann von der glasfaserfreien Außenschicht getrennt werden. (Woidasky et al. 2020a)

Weitere Erfahrung im Bereich der Fluoreszenz-Markierung wurden im Rahmen eines vom Bundesministerium für Bildung, Wissenschaft und Forschung geförderten Forschungsprojektes gesammelt. Dabei wurden PET-Flaschen mit PA-Sauerstoffbarriere markiert, um diese von solchen ohne Sauerstoffbarriere zu trennen. (Woidasky et al. 2020a)

²⁵ <https://polysecure.eu/verlaesslich-sortieren/tracer-based-sorting>



Abbildung 17 Ein glasfaserverstärktes PVC-Fensterprofil dessen Profil-Kern angeregt wird (Fluoreszenz in der Bildmitte). Die unmarkierte Fensteraußenschicht leuchtet nicht. Quelle: Woidasky et al. 2020b, S. 445.

Ziel

Im Kontext von Verpackungsabfällen möchte Polysecure eine Alternative zum bestehenden Sortiersystem anbieten. Hierzu sollen insbesondere Verpackungen markiert werden, die aktuell aufgrund ihrer Materialeigenschaften nicht recycelt werden können bzw. bestehende Recyclingverfahren negativ beeinflussen (TBS light). Das aktuell entwickelte eigene Sortiermodul SORT4CIRCLE® soll für jedes Objekt zusätzlich zur Markierungsdetektion mit Sensoren für NIR-Spektroskopie, Objekterkennung, Farbdetektion und optionaler Auswertung von digitalen Wasserzeichen ausgestattet sein (s. Abbildung 18). Hierbei werden die Fluoreszenzmarker miteinander kombiniert, wodurch 50 - 100 verschiedene Sortiercodes erzeugt werden können. Aktuell sind 21 Fraktionen technisch umsetzbar²⁶. Ferner soll im Rahmen einer strategischen Partnerschaft mit der Carl Zeiss AG eine verbesserte Detektionseinheit entwickelt und konstruiert werden, die eine erhöhte Detektionsgenauigkeit und somit auch eine größere Anzahl an Sortierfraktionen erlauben soll²⁷.

Detektionsverfahren

Das Funktionsprinzip des Detektionsverfahrens entspricht dem in Abschnitt 3.5.1 beschriebenen Ablauf. Grundlage ist eine Anregung der Markierungssubstanzen durch Laser bei 980 nm. Die anschließende, auf dem zuvor beschriebenen Mechanismus der Up-Conversion beruhende Emission von Photonen, kann durch eine Kamera sowohl im VIS(visible)- als auch im NIR-Bereich detektiert werden.

²⁶ <https://polysecure.eu/verlaesslich-sortieren>

²⁷ https://www.polysecure.eu/fileadmin/main/Technologie/Media-Files/211210_PM_Start_Kooperation_Zeiss_Polysecure.pdf

Vergleichsstudie Identifikationsverfahren – Forum Rezyklat

Nach eigenen Angaben kann bisher kein anderes natürliches oder synthetisch erzeugtes Material optische Signale im visuellen Bereich erzeugen, wenn es lediglich durch eine Laser-Strahlung im NIR-Bereich angeregt wird. Daher weist das Detektionsverfahren von Polysecure ein sehr geringes Signal-Rausch-Verhältnis auf, wodurch es robust gegenüber Staub, Schmutz, Deformation und Lage der Verpackung ist.

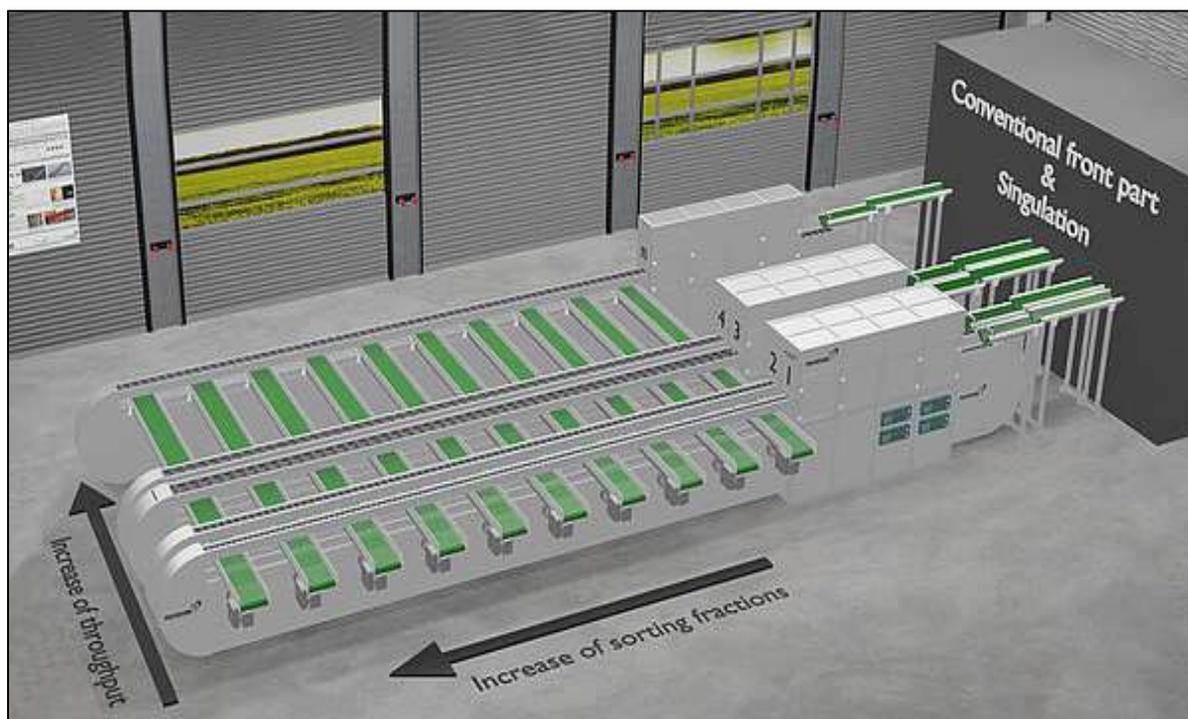


Abbildung 18 Im Rahmen von TBS complete schlägt Polysecure einen Alternativaufbau für Sortieranlagen für Leichtverpackungen vor (SORT4CIRCLE®). Nach einer konventionellen Vorsortierung werden die vereinzelt Post-Consumer-Leichtverpackungen in das Multi-Sensor Sortiersystem von Polysecure eingeführt. Durch die Kombination von Markierungsdetektion, NIR-Spektroskopie, Objekterkennung, Farbdetektion und optionaler Auswertung von digitalen Wasserzeichen sollen die Objekte einmalig detektiert und anschließend, ähnlich wie in der Briefsortierung, den einzelnen Zielfractionen zugeordnet werden. Quelle: Polysecure, 2022²⁸.

Stoffstrom

Die Markierungssubstanzen von Polysecure können für die Markierung von allen gängigen Kunststoffen eingesetzt werden. Hierbei werden, je nach Anwendungsfall, zwischen 10 – 100 µg Markersubstanz pro Verpackung benötigt. Um eine Detektion zu gewährleisten, muss allerdings für dunklere Kunststoffe eine höhere Konzentration an Markierungssubstanzen eingebracht werden. Je nach Markierungsart können somit Verpackungen direkt aufgrund ihrer eigenen Markierung oder indirekt aufgrund der Markierung des Etiketts sortiert werden.

²⁸ https://www.polysecure.eu/fileadmin/_processed_/e/5/csm_CompleteFinal_4x3_01_8a169f7abf.jpg

Vergleichsstudie Identifikationsverfahren – Forum Rezyklat

Aus diesem Grund gibt es keine technisch vorgegebene Objektmindestgröße. Bei einer Markierung der Verpackung verteilen sich die Marker gleichmäßig im Material, weshalb auch eine Sortierung von Flakes möglich ist. Erfolgt die Markierung des Etiketts ist eine Sortierung von Flakes nicht möglich.

Auch Polysecure möchte die Rückgewinnung der Markierungssubstanz anbieten, die Kreislaufführung steht allerdings im Vordergrund, da die Marker auch nach mehreren Recyclingzyklen nicht an Intensität verlieren. Während TBS light nur eine geringe Anzahl an Zusatzmerkmalen erlaubt (z. B. „nicht-recyclebar“ oder Lebensmittelverpackung), ermöglicht TBS complete das Definieren einer Vielzahl von Zusatzmerkmalen (bspw. Verarbeitungsart, Verbunde, Inverkehrbringer) anhand derer sortiert werden kann.

Bewertung

TBS light und complete befinden sich nach eigener Aussage auf TRL 8 (system complete and qualified) und TRL 9 (actual system proven in operational environment). Das Sortiermodul SORT4CIRCLE® ist momentan TRL 6 (technology demonstrated in relevant environment) zuzuordnen, da es nach aktuellem Stand noch durch eine nicht ausgereifte Vereinzelung limitiert ist. Nach eigenen Angaben ist eine Lebensmittelzulassung für die Markierungssubstanzen bereits beantragt, liegt jedoch noch nicht vor.

Als Kosten für die Markierung einer Tonne LVP gibt Polysecure 20 - 50 € an (Integration Druckfarbe bis Integration Kunststoff). Für die Aufrüstung eines bestehenden NIR Sortiergerätes um den Anregungslaser werden einmalige Kosten in Höhe von 10.000 € pro Bandmeterbreite angegeben. Für die Sortierung mittels SORT4CIRCLE®-Modul werden Investitionskosten von 400 €/Mg und Sortierkosten von 100 €/Mg Post-Consumer-LVP angegeben. Die benötigte Fläche pro Sortiergerät umfasst 780 m². Da beide Verfahren eigenständige Lösungen darstellen, werden die jeweiligen Stärken und Schwächen voneinander getrennt in Abbildung 19 dargestellt.

		TBS light	TBS complete
Detektion / Identifikation / Stoffstrom	Lösung beinhaltet Sortierung	5	5
	Identifikation von PET, PE, PP, PS	5	5
	Anzahl zusätzlicher Merkmalsklassen	3	4
	Detektion von Verpackungen 50 - 100 mm	4	5
	Detektion von Verpackungen 20 - 50 mm	4	5
	Ejektion von Verpackungen 20 - 50 mm	3	5
	Detektion von Food Grade / Non-Food Grade	5	5
	Digitaler Produktpass möglich	0	3
	Eignung für dunkle Verpackungsfarben	5	4
	Störanfälligkeit (Partikeldeformation, Verunreinigungen)	5	5
	Sortierung von markierten Flakes	5	5
	Durchsatzleistung im Vergleich zum Stand der Technik	5	3
	Rückstandsfreie Entfernung der Markierung	0	0
Kosten	Kosten* Aufbringung Markierung	3	2
	Kosten* Sensorsystem	2	1
	Kosten Lizenzierung / Softwareaktualisierung	5	3
Sonstiges	Technological Readiness Level (laut Anbieter)	5	4
	Monopolstellung Anbieter	3	2
	Kombinationsfähigkeit mit anderen Identifikationstechniken	2	5

*Kosten umfassen sowohl Investitions- als auch Betriebskosten

Abbildung 19 Stärken-Schwächen-Profil der beiden Markierungslösungen TBS light (links) und TBS complete (rechts) von Polysecure. Die einzelnen Kriterien sind qualitativ auf einer Skala von 0 bis 5 bewertet, wobei 5 Punkte das Maximum darstellen. Ausgenommen sind die Kriterien Kosten und Monopolstellung, bei denen jeweils das Maximum für geringere Kosten bzw. geringere Monopolstellung steht. Für eine leichtere Lesbarkeit wurde zusätzlich zur Punkteskala ein Balkensystem mit einem Farbcode eingeführt (leerer Balken = 0, roter Balken = 1, oranger Balken = 2, gelber Balken = 3, grüner Balken = 4, blauer Balken = 5).

3.5.1.3 Tailorlux

Das westfälische Unternehmen Tailorlux bietet Integritätslösungen zur chemischen Markierung und Detektion von Materialien wie Kunststoffen, Metallen, Keramiken oder Textilfasern aber auch Saatgut an²⁹. Diese können zur Markierung und Sortierung von LVP eingesetzt werden. Im Gegensatz zu den zuvor vorgestellten Verfahren, beeinflusst die Markierungssubstanz von Tailorlux das Absorptionsspektrum von Kunststoffen im NIR-Bereich (s. Abbildung 20). Somit benötigt diese Lösung lediglich ein Softwareupdate des NIR-Sortiergeräts und es werden keine zusätzlichen Anregungsquellen oder Sensoren benötigt. Eine zusätzliche Stärke von Tailorlux liegt nach eigenen Angaben in der Ermittlung der minimal notwendigen Dosierungsmenge der Markierungssubstanzen unter Beibehaltung einer maximalen Detektionsrate.

²⁹ <https://www.tailorlux.com/unternehmen/>

Ziel

Die Zielmärkte für die Markierungslösung von Tailorlux im Bereich des Recyclings sind einerseits die Markierung von Störstoffen für Recyclingprozesse (bspw. Silikonkartuschen) und andererseits die Markierung von hochwertigen, kundenspezifischen Polymerblends bzw. technischen Kunststoffen wie Acrylnitril-Butadien-Styrol (ABS) oder Polyoxymethylen (POM).

Detektionsverfahren

Das Funktionsprinzip des Detektionsverfahrens von Tailorlux entspricht einer modifizierten Form des in Abschnitt 3.5.1 beschriebenen Ablaufs. Hierbei werden die Markierungssubstanzen nicht durch elektromagnetische Strahlung angeregt, sondern absorbieren die Infrarotstrahlung in charakteristischen Wellenlängenbereichen. Somit kann ihre Präsenz durch ein NIR-Spektrometer detektiert werden, da der Fingerabdruck des detektierten Polymers durch ein Minimum in einem bestimmten Spektralband erkennbar ist. Für die Sortierung ist daher eine Aktualisierung der Datenbank des Sortiergerätes notwendig.³⁰

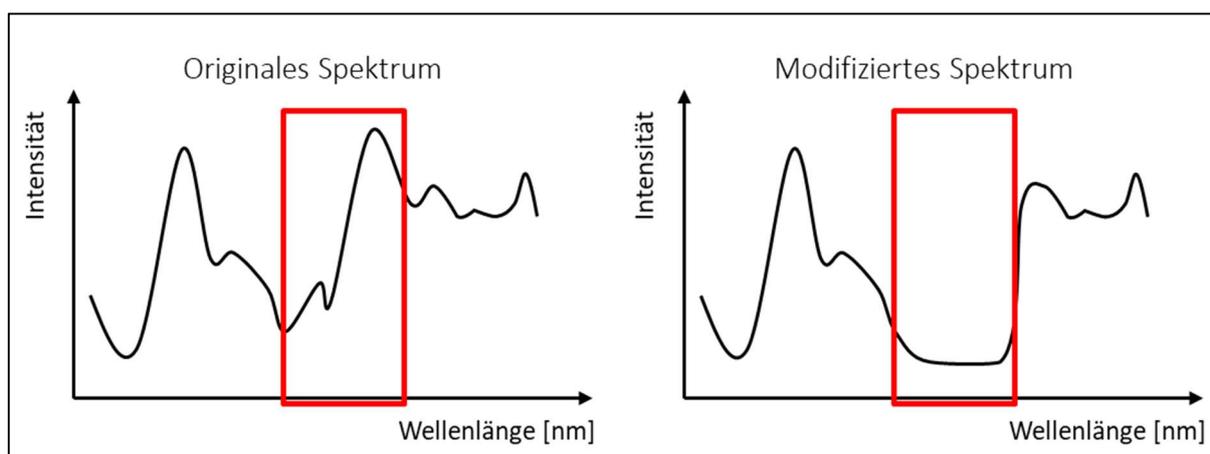


Abbildung 20 Schematische Darstellung des Funktionsprinzips der Markierungslösung von Tailorlux. Durch die Markierungssubstanz wird das kunststoffspezifische Spektrum (links) modifiziert. In einem bestimmten Spektralband wird die NIR-Strahlung zusätzlich absorbiert, woraus ein zusätzliches Minimum im Spektrum entsteht (rechts). Quelle: Eigene Darstellung.

Stoffstrom

Die Markierungssubstanzen von Tailorlux können für die Markierung von allen gängigen Kunststoffen eingesetzt werden. Bislang wurden Praxisversuche mit PE, PET und Polyactid durchgeführt. Hierbei werden, je nach Anwendungsfall, 0,5 % – 1 % der Gesamtmasse eines Produktes bzw. einer Verpackung markiert. Bisher kann durch das Verfahren eine weitere

³⁰ <https://www.pressebox.de/pressemitteilung/tailorlux-gmbh/NIR-Markierung-von-Silikonkartuschen-nun-auch-mit-internationaler-Auszeichnung/boxid/1095217>

Vergleichsstudie Identifikationsverfahren – Forum Rezyklat

Merkmalsklasse pro Kunststoff. Ähnlich wie in den zuvor beschriebenen Verfahren ist für Tailorlux sowohl die homogene Einbringung der Markierungssubstanz in die Polymermatrix der Verpackung als auch die Aufbringung auf Etiketten möglich. Je nach Markierungsart können somit Verpackungen direkt, aufgrund ihrer eigenen Markierung, oder indirekt, aufgrund der Markierung des Etiketts sortiert werden. Aus diesem Grund gibt es keine technisch vorgegebene Objektmindestgröße. Bei einer Markierung der Materialmatrix einer Verpackung können auch daraus gewonnene Flakes sortiert werden. Im Gegensatz zu anderen markerbasierten Verfahren ist die Anzahl zusätzlicher Merkmalsausprägungen gering.

Nach Angaben von Tailorlux ist die Rückgewinnung von Markierungssubstanzen über Depolymerisation möglich. Das mechanische Recycling beeinflusst die Markierung kaum, selbst nach sechs Recyclingzyklen konnten die Markierungssubstanzen detektiert werden.

Bewertung

Das Markierungsverfahren von Tailorlux ist aktuell mit TRL 7 (system prototype demonstration in operational environment) und 8 (system complete and qualified) zu bewerten. Grundlage hierfür ist einerseits die bereits erprobte Demonstrierung durch die Markierung von Silikon-Kartuschen und andererseits die Detektion bzw. Sortierung im Technikum eines Herstellers von Sortiergeräten.

Als Kosten für die Markierung von einer Tonne LVP gibt Tailorlux 5 € an. Für eine Aufrüstung eines bestehenden NIR-Sortiergeräts fallen lediglich Servicekosten für ein Software-Upgrade über Fernwartung an.

Abbildung 21 zeigt das für Tailorlux angefertigte Stärken-Schwächen-Profil.

Detektion / Identifikation / Stoffstrom	Lösung beinhaltet Sortierung	■	■	■	■	■	■	5
	Identifikation von PET, PE, PP, PS	■	■	■	■	■	■	5
	Anzahl zusätzlicher Merkmalsklassen	■	■					2
	Detektion von Verpackungen 50 - 100 mm	■	■	■	■			4
	Detektion von Verpackungen 20 - 50 mm	■	■	■	■			4
	Ejektion von Verpackungen 20 - 50 mm	■	■	■				3
	Detektion von Food Grade / Non-Food Grade	■	■	■	■	■	■	5
	Digitaler Produktpass möglich							0
	Eignung für dunkle Verpackungsfarben	■	■	■	■			4
	Störanfälligkeit (Partikeldeformation, Verunreinigungen)	■	■	■	■	■	■	5
	Sortierung von markierten Flakes	■	■	■	■	■	■	5
	Durchsatzleistung im Vergleich zum Stand der Technik	■	■	■	■	■	■	5
	Rückstandsfreie Entfernung der Markierung							0
Kosten	Kosten* Aufbringung Markierung	■	■	■				3
	Kosten* Sensorsystem	■	■	■	■			4
	Kosten Lizenzierung / Softwareaktualisierung	■	■	■	■	■	■	5
Sonstiges	Technological Readiness Level (laut Anbieter)	■	■	■	■			4
	Monopolstellung Anbieter	■	■	■				3
	Kombinationsfähigkeit mit anderen Identifikationstechniken	■	■					2

*Kosten umfassen sowohl Investitions- als auch Betriebskosten

Abbildung 21 Stärken-Schwächen-Profil von Tailorlux. Die einzelnen Kriterien sind qualitativ auf einer Skala von 0 bis 5 bewertet, wobei 5 Punkte das Maximum darstellen. Ausgenommen sind die Kriterien Kosten und Monopolstellung, bei denen jeweils das Maximum für geringere Kosten bzw. geringere Monopolstellung steht. Für eine leichtere Lesbarkeit wurde zusätzlich zur Punkteskala ein Balkensystem mit einem Farbcode eingeführt (leerer Balken = 0, roter Balken = 1, oranger Balken = 2, gelber Balken = 3, grüner Balken = 4, blauer Balken = 5).

3.5.1.4 Gabriel-Chemie

Das österreichische Unternehmen Gabriel-Chemie ist auf die Produktion von Masterbatches spezialisiert und fügt somit Roh-Polymeren Farbe, Effekte und funktionelle Additive zu. Anders als die zuvor beschriebenen Lösungen bietet Gabriel-Chemie gemeinsam mit den Firmen Leuchtstoffwerk Breitung, Sensor Instruments Systemtechnik und Sensor Instruments eine Kombination aus Fluoreszenz-Markierung und -Identifizierung an. Die hierbei verwendeten Markierungssubstanzen werden in Form eines Masterbatches unter dem Namen TagTec vermarktet.

Ziel

Gabriel-Chemie bietet, wie auch die zuvor genannten Akteure, Lösungen für die Authentifizierung und Materialdetektion an. Im Gegensatz zu diesen sollen aber beide Lösungen miteinander kombiniert werden können. Grundlage für die Authentifizierung ist ein produktionsbedingt individuelles Muster aus den Markierungssubstanzen auf der Produkt- bzw.

Vergleichsstudie Identifikationsverfahren – Forum Rezyklat

Verpackungsoberfläche. Durch die Nutzung von bildgebenden Verfahren sieht dieses wie ein Sternenhimmel aus, weshalb es Markernetz genannt wird. Da das bildgebende Detektionsverfahren auf einen Detektionsbereich von 10×10 mm limitiert ist, muss das Markernetz bei jedem Produkt stets an einer zuvor festzulegenden Position aufgenommen werden. Somit eignet sich dieses Verfahren zwar für die produktspezifische Nachverfolgung entlang von Lieferketten, jedoch ist das Auslesen dieses Markernetzes von einer Post-Consumer-LVP in einer Sortieranlage limitiert. Diese Limitation beruht auf der Tatsache, dass in der Sortierung einerseits die zur Auslesung des Markernetz benötigte Ausrichtung der Verpackung garantiert werden kann und andererseits die Verpackung deformiert oder bzw. fraktioniert sein kann. Aus diesem Grund können von Gabriel-Chemie markierte Objekte lediglich anhand ihrer verwendeten Markierung einer Merkmalsklasse zugeordnet werden. (Baumann et al. 2022)

Detektionsverfahren

Das Funktionsprinzip des Detektionsverfahrens entspricht dem in Abschnitt 3.5.1 beschriebenen Ablauf. Grundlage ist eine Anregung der Markierungssubstanzen durch ultraviolette A-Strahlung. Die anschließende, auf dem zuvor beschriebenen Mechanismus des Up-Conversion beruhende Emission von Photonen kann durch eine Kamera detektiert werden. Zusätzlich wird die Abklingdauer ($100 - 1.000 \mu\text{s}$) nach Beendigung der Anregung gemessen. Somit lassen sich neben der Emissionsintensität auch die räumliche Verteilung von Markersubstanzen ermitteln. Da die Markierungssubstanzen während der Extrusion der Polymerschmelze hinzugefügt werden, werden diese bei der Einzelteilproduktion randomisiert in das Produkt bzw. die Verpackung eingebracht. Mit Hilfe einer Infrarotkamera kann das so generierte Markernetz detektiert werden und eine Identifikationsnummer in einer Datenbank hinterlegt werden (vgl. Abbildung 22). Da das aufgenommene Markernetz immer nur charakteristisch für eine festzulegende Position des Produktes bzw. der Verpackung ist, ähnelt diese Lösung einem Bar- oder Quick Response (QR)-Code, der ebenfalls nur an einer Position ausgelesen werden kann.



Abbildung 22 Die mit einem Masterbatch von Gabriel-Chemie markierten Verschlussdeckel von Getränkeflaschen (rechts) zeigen ein individuelles Markernetz. Dieses, visualisiert durch die miteinander verbundenen grünen Punkte, kann zur Authentifizierung und Verfolgung eines Produktes über die Lieferkette hinweg genutzt werden, erlaubt jedoch keine individuelle Produktidentifizierung während des Sortiervorgangs als Post-Consumer-Leichtverpackung. Quelle: Sensor Instruments, 2022³¹.

Stoffstrom

Die Markierungssubstanzen von Gabriel-Chemie können für die Markierung von allen gängigen Kunststoffen eingesetzt werden. Wie auch bei den anderen Fluoreszenz-Verfahren, werden, je nach Anwendungsfall, 0,5 % – 1 % der Gesamtmasse eines Produktes bzw. einer Verpackung markiert. Um eine Detektion zu gewähren, muss für dunklere Kunststoffe eine höhere Konzentration an Markierungssubstanzen eingebracht werden. Gabriel-Chemie forciert die Einbringung in die Polymermatrix des Produktes bzw. der Verpackung und möchte somit die fluoreszenzbasierte Produktauthentifizierung, die Fluoreszenz-Markierung, die Einzelteildetektion (Markernetz) sowie zusätzliche funktionelle Aspekte (bspw. Materialverschleiß oder -verstreckung) zugleich anbieten. Hierfür ist die homogene Einbringung der Markierungssubstanz in die Polymermatrix des Produkts bzw. der Verpackung notwendig. Somit kann ein Produkt bzw. eine Verpackung innerhalb der Lieferkette nachverfolgt und als Post-Consumer-LVP nach Klassen wie Lebensmittelverpackung oder Multilayer sortiert werden. Auch die von Gabriel-Chemie

³¹ https://www.sensorinstruments.de/cmsimages/Produkte_Produktkennzeichnung/Rot_2022_06_28_Bild04_Proben.jpg

Vergleichsstudie Identifikationsverfahren – Forum Rezyklat

markierten Verpackungen können nach einer Zerkleinerung in Form von Flakes nach den zuvor definierten Klassen nach sortiert werden. (Baumann et al. 2022)

Bewertung

Eine genaue Evaluierung des TRL ist angesichts der wenigen zur Verfügung stehenden Informationen schwierig. Auf Basis der zur Verfügung stehenden Informationen wird von einem TRL zwischen 2 (technology was formulated) und 3 (first lab tests were made) ausgegangen.

Als Kosten für die Markierung von einer Tonne LVP gibt Gabriel Chemie 20 € an. Für die Aufrüstung eines bestehenden Sortiergerätes werden einmalige Kosten in Höhe von 10.000 € bis 20.000 € angegeben.

Eine qualitative Bewertung der Stärken und Schwächen von Gabriel-Chemie ist Abbildung 23 zu entnehmen.

Detektion / Identifikation / Stoffstrom	Lösung beinhaltet Sortierung	■	■	■	■	■	■	5
	Identifikation von PET, PE, PP, PS	■	■	■	■	■	■	5
	Anzahl zusätzlicher Merkmalsklassen	■	■					2
	Detektion von Verpackungen 50 - 100 mm	■	■	■	■	■		4
	Detektion von Verpackungen 20 - 50 mm	■	■	■	■	■		4
	Ejektion von Verpackungen 20 - 50 mm	■	■	■				3
	Detektion von Food Grade / Non-Food Grade	■	■	■	■	■	■	5
	Digitaler Produktpass möglich							0
	Eignung für dunkle Verpackungsfarben	■	■	■	■	■		4
	Störanfälligkeit (Partikeldeformation, Verunreinigungen)	■	■	■	■	■	■	5
	Sortierung von markierten Flakes	■	■	■	■	■	■	5
	Durchsatzleistung im Vergleich zum Stand der Technik	■	■	■	■	■		4
	Rückstandsfreie Entfernung der Markierung							0
Kosten	Kosten* Aufbringung Markierung	■	■	■				3
	Kosten* Sensorsystem	■	■	■				3
	Kosten Lizenzierung / Softwareaktualisierung	■	■	■	■	■	■	5
Sonstiges	Technological Readiness Level (laut Anbieter)	■						1
	Monopolstellung Anbieter	■	■	■				3
	Kombinationsfähigkeit mit anderen Identifikationstechniken	■	■					2

*Kosten umfassen sowohl Investitions- als auch Betriebskosten

Abbildung 23 Stärken-Schwächen-Profil der Markierungslösung von Gabriel-Chemie. Die einzelnen Kriterien sind qualitativ auf einer Skala von 0 bis 5 bewertet, wobei 5 Punkte das Maximum darstellen. Ausgenommen sind die Kriterien Kosten und Monopolstellung, bei denen jeweils das Maximum für geringere Kosten bzw. geringere Monopolstellung steht. Für eine leichtere Lesbarkeit wurde zusätzlich zur Punkteskala ein Balkensystem mit einem Farbcode eingeführt (leerer Balken = 0, roter Balken = 1, oranger Balken = 2, gelber Balken = 3, grüner Balken = 4, blauer Balken = 5).

3.6 Verfahren basierend auf nicht-inhärenten Produkteigenschaften

Verfahren, die auf nicht-inhärenten *Produkteigenschaften* basieren ermöglichen neben der Zuordnung einer bestimmten Klasse auch die eindeutige Feststellung der Identität des tragenden Objekts. Grundlage ist somit die individuelle Markierung eines jeden Objektes, welches in der Regel durch die Zuweisung einer Identifikationsnummer durch Permutation (bspw. Kombination von Farbanordnungen oder QR-Codes) erfolgt. Durch die Markierung können, je nach Anwendung, sowohl Informationen direkt auf der Verpackung selbst oder in einer Datenbank hinterlegt werden.

3.6.1 Digitale Wasserzeichen

Ein digitales Wasserzeichen ist eine technische Markierung in einem Trägermedium, die eine Information enthält. Digitale Wasserzeichen können zur Identifizierung, Authentifizierung oder Legitimierung von Objekten verwendet werden. (Cox et al. 2008)

Im Kontext einer Kreislaufwirtschaft für Verpackungen entwickeln aktuell mehrere Anbieter digitale Wasserzeichen für Verpackungen. Hierdurch können neben den inhärenten material- und objektspezifischen Eigenschaften zusätzliche Informationen zur Verpackung übermittelt werden. Diese können in der sensorgestützten Sortierung abgerufen und als weiteres Sortierkriterium verwendet werden. Dieses Konzept ist Teil von „smart packaging“ und ermöglicht dem Inverkehrbringer zusätzlich Informationen über den Verbleib der Verpackung zu generieren. Ferner können Konsumenten zusätzliche Informationen wie z. B. über den korrekten Entsorgungspfad mittels Smartphones erhalten.

Die Anwendung der beschriebenen Systeme ist von den Anbietern bisher auf förderbandbetriebene Sortiergeräte mit Druckluftaustrag konzeptioniert. Ein Austrag durch andere Systeme (bspw. Roboter oder Klappen) ist theoretisch ebenfalls möglich.

3.6.1.1 Polytag

Das britische Unternehmen Polytag hat sich im Zuge der erweiterten Produktverantwortung auf das Aufbringen von QR-Codes auf PET-Flaschen spezialisiert. Hierbei wird eine kombinierte Lösung aus den für Menschen sichtbaren QR-Codes mit konventioneller Tinte und unsichtbaren QR-Codes basierend auf fluoreszierender Tinte angeboten.

Ziel

Polytag verfolgt das Ziel Informationen über den gesamten Produktlebenszyklus zu sammeln und zu nutzen. Kernziel ist ein digitales Pfandsystem für bepfandete

Lebensmittelverpackungen. Somit wird diese Lösung aktuell *nicht* in LVP-Sortieranlagen genutzt³².

Detektionsverfahren

Polytag verwendet QR-Codes zur Markierung von Verpackungen, die auf Etiketten aufgebracht werden (vgl. Abbildung 24). Damit diese sowohl für Endverbraucher als auch industriell lesbar sind, wird eine hybride Lösung aus konventioneller und fluoreszierender Tinte angeboten. Somit können Endverbraucher mittels Smartphone das Produkt scannen und, im Kontext der erweiterten Herstellerverantwortung, die korrekte Entsorgung des Produktes nachweisen. Die gleichmäßig über die gesamte Etikettenoberfläche, mit fluoreszierender Tinte gedruckten QR-Codes, könnten hingegen nach der Abfüllung oder auch in einer Sortieranlage ausgelesen werden³³. Das genaue Funktionsprinzip der verwendeten Fluoreszenz konnte nicht in Erfahrung gebracht werden. Allerdings ist von dem in Abschnitt 3.5.1 beschriebenen Ablauf auszugehen, da die Anregung durch UV-Licht erfolgt.

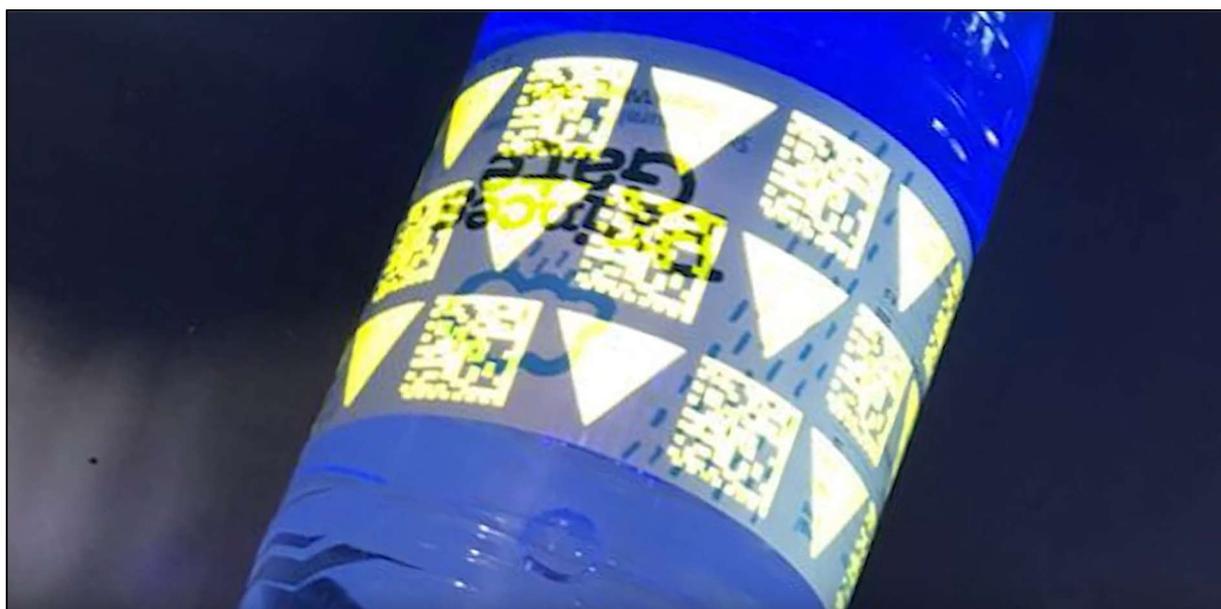


Abbildung 24 Darstellung eines von Polytag bedruckten Etiketts auf einer PET-Flasche. Durch die UV-Beleuchtung fluoreszieren die aufgetragenen QR-Codes in gelber Farbe. Quelle: Polytag, 2022.

³² <https://www.polytag.co.uk/>

³³ <https://www.polytag.co.uk/our-pilots/wells-farm-dairy-printing/>

Stoffstrom

Die Markierungssubstanzen von Polytag werden bisher lediglich auf PE-Etiketten aufgebracht, die für PET-Flaschen verwendet werden. Um eine Detektion zu gewährleisten, muss allerdings für dunklere Kunststoffe eine höhere Konzentration an Markierungssubstanzen eingebracht werden. Über den weiteren Verbleib der Markierungssubstanzen nach dem Abtrennen von der PET-Flasche stehen bisher keine Informationen zur Verfügung. Die Möglichkeit einer Rückgewinnung, ähnlich wie bei Nextloop, wäre jedoch prinzipiell denkbar.

Im Gegensatz zu den zuvor beschriebenen fluoreszenzbasierten Lösungen ermöglicht die Verwendung von GS1-kompatiblen QR-Codes die Anbindung an einen eindeutigen Identifikationsschlüssel (bspw. die Global Trade Item Number)³⁴. Dies ermöglicht, neben einem offenen Zugang, eine nahtlose Nachverfolgbarkeit des markierten Objekts.

Bewertung

Eine genaue Evaluierung des TRL ist angesichts der wenigen zur Verfügung stehenden Informationen schwierig. Auf Basis der vorhandenen Informationen wird von einem TRL zwischen 2 (technology was formulated) und 3 (first lab tests were made) ausgegangen. Im Gegensatz zu den anderen Verfahren ist durch den Fokus auf ein Pfandsystem bisher *keine Implementierung in ein Sortiergerät* vorgesehen. Die im Rahmen eines Pilotversuches installierte Sensorbrücke in einer Sortieranlage entspricht somit aus verfahrenstechnischer Sicht lediglich der Stoffstromüberwachung.

Genaue Kosten für die Markierung einer Tonne LVP sind den Autor*innen nicht bekannt. Diese liegen wahrscheinlich in einem ähnlichen Bereich wie bei den zuvor beschriebenen Anbietern von Fluoreszenz-Markierungen zwischen 20 - 50 €/Mg.

³⁴ <https://www.polytag.co.uk/applications/customer-engagement/>

Vergleichsstudie Identifikationsverfahren – Forum Rezyklat

In Abbildung 25 werden die Stärken und Schwächen von Polytag qualitativ gegenübergestellt.

Detektion / Identifikation / Stoffstrom	Lösung beinhaltet Sortierung							0
	Identifikation von PET, PE, PP, PS	■	■	■	■	■	■	5
	Anzahl zusätzlicher Merkmalsklassen	■	■	■	■	■	■	5
	Detektion von Verpackungen 50 - 100 mm	■	■	■	■			4
	Detektion von Verpackungen 20 - 50 mm	■	■					2
	Ejektion von Verpackungen 20 - 50 mm							0
	Detektion von Food Grade / Non-Food Grade	■	■	■	■	■	■	5
	Digitaler Produktpass möglich	■	■	■	■	■	■	5
	Eignung für dunkle Verpackungsfarben	■	■	■	■			4
	Störanfälligkeit (Partikeldeformation, Verunreinigungen)	■	■					2
	Sortierung von markierten Flakes							0
	Durchsatzleistung im Vergleich zum Stand der Technik	■	■	■				3
	Rückstandsfreie Entfernung der Markierung							0
	Kosten	Kosten* Aufbringung Markierung	■	■				
Kosten* Sensorsystem		■	■					2
Kosten Lizenzierung / Softwareaktualisierung		■	■	■				3
Sonstiges	Technological Readiness Level (laut Anbieter)	■	■	■				3
	Monopolstellung Anbieter	■						1
	Kombinationsfähigkeit mit anderen Identifikationstechniken	■	■	■				3

*Kosten umfassen sowohl Investitions- als auch Betriebskosten

Abbildung 25 Stärken-Schwächen-Profil der Markierungslösung von Polytag. Die einzelnen Kriterien sind qualitativ auf einer Skala von 0 bis 5 bewertet, wobei 5 Punkte das Maximum darstellen. Ausgenommen sind die Kriterien Kosten und Monopolstellung, bei denen jeweils das Maximum für geringere Kosten bzw. geringere Monopolstellung steht. Für eine leichtere Lesbarkeit wurde zusätzlich zur Punkteskala ein Balkensystem mit einem Farbcode eingeführt (leerer Balken = 0, roter Balken = 1, oranger Balken = 2, gelber Balken = 3, grüner Balken = 4, blauer Balken = 5).

3.6.1.2 HolyGrail 2.0 (Digimarc)

Die Initiative HolyGrail 2.0 wird von „AIM – European Brands Association“ angetrieben und von der Alliance to End Plastic Waste unterstützt. Mehr als 160 Unternehmen und Organisationen aus der gesamten Verpackungswertschöpfungskette sind in ihr zusammengeschlossen. Das Ziel der Initiative ist der Nachweis der Realisierbarkeit digitaler Wasserzeichentechnologien in der Sortierung von Kunststoffverpackungen sowie deren Wirtschaftlichkeit. Die Initiative ist eine Fortführung des Projektes HolyGrail 1.0, welches von 2016 bis 2019 lief und von der Ellen MacArthur Foundation unterstützt wurde. Hierbei wurden zwei verschiedene Konzepte der Modifikation der Verpackung zur Verbesserung des Sortiervorganges untersucht: der Einsatz von Fluoreszenz-Markern sowie digitale Wasserzeichen. Letztere werden in der vorliegenden Studie untersucht, da durch sie im Rahmen von smart-packaging Lösungen zusätzliche Möglichkeiten zur Kundenbindung und Nachvollziehbarkeit der Lieferkette sowie der Verfolgung des Produktlebenszyklus bestehen.

Vergleichsstudie Identifikationsverfahren – Forum Rezyklat

(HolyGrail 2.0 30.03.2022, 2022) Nach der Festlegung auf digitale Wasserzeichen werden aktuell zwei verschiedene Verfahren (von Digimarc und CurvCode) untersucht. Dabei scheint die Lösung von Digimarc technisch bereits ausgereifter zu sein als die von CurvCode. Das im Mai 2019 vorgestellte Proof-of-Concept für digitale Wasserzeichen auf Verpackungen inklusive demonstrierter Testsortierlinie wurde mit dem Verfahren von Digimarc durchgeführt. Dementsprechend wird im nachfolgenden Absatz auf die Lösung von Digimarc eingegangen und CurvCode in Abschnitt 3.6.1.3 beleuchtet.

Ziel

Im Vordergrund von HolyGrail 2.0 steht das Aufbringen von digitalen Wasserzeichen auf Verpackungsoberflächen. Dadurch soll eine Identifikation, Nachverfolgung und Sortierung von Verpackungen in Abhängigkeit des aufgebrachten Codes ermöglicht werden. Dabei gibt es eine 2D-Codierung (Bedruckung von Etiketten / Sleeves oder Direktdruck) und eine 3D-Codierung (Modifikation der Oberflächenstruktur).

Detektionsverfahren

Technischer Hintergrund der Digimarc-Lösung ist die Ausnutzung unterschiedlicher Oberflächeneigenschaften. So kann auf einer Verpackung ein flächendeckendes Wasserzeichen (Größe der Informationseinheit ca. 20 mm × 20 mm) durch bewusst herbeigeführte Pixelanordnung aufgebracht bzw. aufgedruckt werden (2D-Codierung). Diese Pixelanordnungen sind für das menschliche Auge nicht sichtbar, können aber mittels Kamera zur Rekonstruktion eines Bar- oder QR-Codes verwendet werden (vgl. Abbildung 26). Das gesamte Objekt wird mit sich wiederholenden Kacheln gekennzeichnet, damit das Sortiergerät die Wasserzeichen aus jeder Perspektive erkennen kann. Des Weiteren erlaubt das System eine Rekonstruktion aus mehreren Kacheln, falls individuelle Kacheln verblasst oder anderweitige Informationseinbußen (bspw. durch Abrieb, Anhaftungen oder Deformation) erlitten haben sollten.



Abbildung 26 Darstellung der Modifikation der Bedruckungslösung von Digimarc für Verpackungen (2D-Codierung). Über die gesamte Verpackungsoberfläche sind etwa 40 mm² große digitale Wasserzeichen gleichmäßig verteilt. Hierfür werden bereits bestehende Pixel verwendet und keine speziellen Druckerfarben benötigt. Für das menschliche Auge ist lediglich die Bedruckung mit den Produktinformationen (rechts) sichtbar, wohingegen die Auswerteeinheit die in der Bedruckung hinterlegten Kacheln zur Rekonstruktion eines Bar- oder QR-Codes (links) nutzt. Quelle: Jaeger 2021.

Alternativ bietet Digimarc auch eine Modifikation der Oberflächenstruktur für spritz-streckgeblasene und thermogeformte Produkte an (3D-Codierung). Dafür wird mittels Lasertexturverfahren die Formoberfläche nachträglich so variiert, dass ein individuelles Oberflächenmuster generiert wird (vgl. Abbildung 27). Jede mit dieser spezifischen Gussform hergestellte Verpackung ist dadurch nachverfolgbar. Es handelt sich somit um eine nicht-inhärente Materialeigenschaft, da keine individuelle Nachverfolgung der Verpackung möglich ist. Eine Produktserien bezogene Verfolgung ist jedoch möglich. Die Detektion erfolgt anhand der Brechung des Lichtes durch die Oberflächenstruktur.

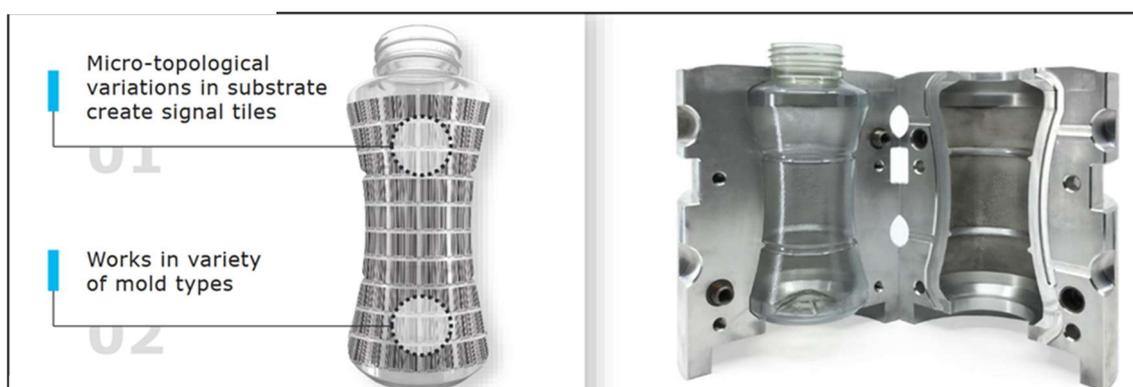


Abbildung 27 Darstellung der Modifikation der Oberflächenstruktur von Digimarc (3D-Codierung). Durch die individuelle Oberflächenstruktur wird das Licht unterschiedliche gebrochen. Dadurch können alle Produkte, die mit einer bestimmten Spritzgussform hergestellt wurden, erkannt werden. Quelle: Jaeger 2021.

Vergleichsstudie Identifikationsverfahren – Forum Rezyklat

Für die Sortierung ist eine modifizierte Version von sensorgestützten Sortiergeräten notwendig (vgl. Abbildung 28): Die Ausleseeinrichtung umfasst Lichtquellen zur gleichmäßigen Beleuchtung des Förderbandes, eine Farbkamera und einen Computer. Nachdem das Wasserzeichen mit der Kamera erfasst worden ist, werden die Bilder an den Computer transferiert. Dort werden die Wasserzeichen dekodiert und die jeweiligen Metadaten von einer Datenbank bezogen. Typische Attribute sind Hersteller, Artikelnummer, Polymertyp, Additive oder Klassifizierung als Lebensmittelverpackung. Eine Anbindung erweiterter Datenbanken ist möglich (z. B. ECHA-Datenbank). Zuletzt können die Verpackungen je nach gewünschtem Merkmal sortiert werden. (Krüger 2020)

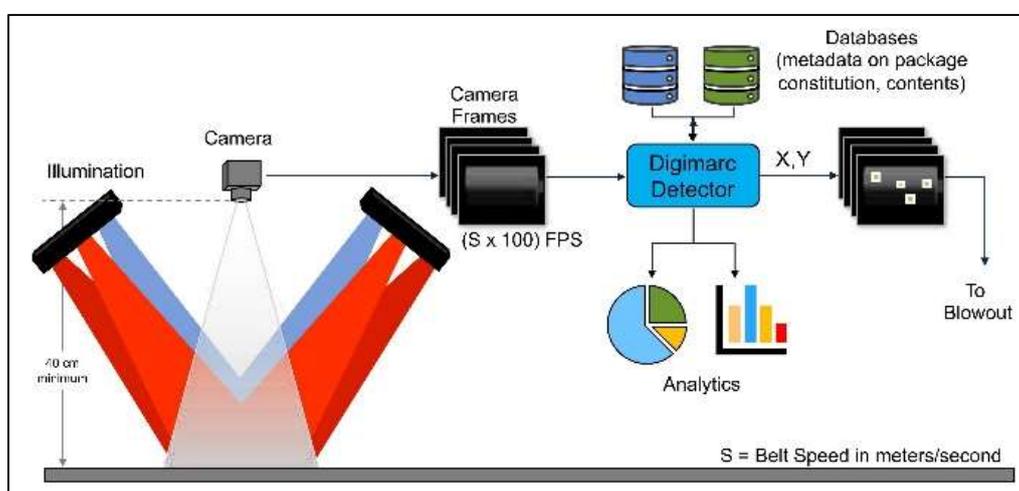


Abbildung 28 Schematischer Aufbau des für die Detektion von digitalen Wasserzeichen (basierend auf der Bedruckung) benötigten Auswerteinheit. Diese besteht aus Lichtquellen, einer VIS-Kamera sowie einem Computer mit Zugriff auf eine zentrale Datenbank, von der die gespeicherten Metadaten abgerufen werden. Quelle: Jaeger 2021.

Stoffstrom

Das Aufbringen von digitalen Wasserzeichen ist nicht auf bestimmte Verpackungsformen, Materialien oder Größen limitiert, sondern prinzipiell überall dort anwendbar, wo bereits jetzt Etiketten oder Bedruckungen eingesetzt werden. Somit könnten auch Verpackungen, die nicht aus Kunststoff sind, sortiert werden. Die Markierung benötigt derzeit eine Mindestfläche von 40 mm².

Alternativ können auch Objekte ohne Etikett oder Bedruckung über Gravuren markiert werden. Bei dieser Lösung ist jedoch keine individuelle Verfolgung der Verpackung möglich, da alle mit einer spezifischen Form hergestellten Verpackung die gleiche Oberflächenmodifikation aufweisen.

Bewertung

Nach eigener Darstellung befindet sich die Wasserzeichen-Technologie von HolyGrail zum Zeitpunkt der Studiererstellung in der letzten Entwicklungsphase und wird seit dem ersten Quartal 2022 mit TRL 8 (system complete and qualified) bewertet (Jaeger 2021).

In mehreren Praxisversuchen zwischen Oktober 2021 und Januar 2022 im Amager Resource Center in Kopenhagen wurden etwa 125.000 verschmutzte und deformierte Verpackungen gemeinsam mit unmarkierten Verpackungen sortiert. Hierbei wurden Verpackungen mit 2D-Codierung verwendet. Insgesamt wurden etwa 260 Verpackungstypen mit industrietypischen Bandgeschwindigkeiten von 3 m s^{-1} und Durchsätzen von $2,5 \text{ t h}^{-1}$ (Hohlkörper) bzw. $0,5 \text{ t h}^{-1}$ (Folien) sortiert³⁵. Bei den Versuchen wurden sowohl ausschließlich Bandsortierer mit einer Auswerteeinheit für digitale Wasserzeichen getestet als auch solche in Kombination mit einem NIR-Sensor. Hierbei lieferte die Kombination der Auswerteeinheit gemeinsam mit dem NIR-Sensor höhere Ausbringungsraten, die Tabelle 2 entnommen werden können.

Tabelle 2 Evaluierungswerte (Detektionsrate, Ausbringungsrate, Reinheit) der Praxisversuche von HolyGrail 2.0 im Winter 2021 unter industrieähnlichen Bedingungen. Quelle: Digitalwatermarks, 2022³⁵.

	Detektionsrate [%]	Ausbringungsrate [%]	Reinheit [%]
Formstabil PP	99.6	95.6	94.2
Formstabil PE-Folien	97.6	92.0	90.8
Formstabil PET	99.1	95.7	92.6
Faserbasierte Verpackungen	98.9	97.0	93.1

An fünf Standorten in Frankreich und Deutschland sind Auswerteeinheiten bei den Partnern SUEZ, PreZero, Indorama, TOMRA / Borealis / Zimmermann und Paprec installiert. Ferner kommen in Dänemark, Frankreich und Deutschland Produkte mit digitalen Wasserzeichen bereits seit Sommer 2022 in den Handel. Aktuell wird das Ende der dritten und letzten Entwicklungsphase, TRL 9 (actual system proven in operational environment), für 2023 angestrebt. (Jaeger, 2021) Kosten für die Markierung und Aufrüstung eines bestehenden Sortiergerätes sollen Ende 2022 angegeben werden.

³⁵ <https://www.digitalwatermarks.eu/post/validation-of-second-prototype-machine-takes-holygrail-2-0-one-step-closer-to-industrial-scale>

Vergleichsstudie Identifikationsverfahren – Forum Rezyklat

Eine qualitative Bewertung der Stärken und Schwächen von Digimarc ist Abbildung 29 zu entnehmen.

		2D-Codierung					3D-Codierung						
Detektion / Identifikation / Stoffstrom	Lösung beinhaltet Sortierung						5						5
	Identifikation von PET, PE, PP, PS						5						5
	Anzahl zusätzlicher Merkmalsklassen						5					4	
	Detektion von Verpackungen 50 – 100 mm						4					4	
	Detektion von Verpackungen 20 – 50 mm						2					2	
	Ejektion von Verpackungen 20 – 50 mm						3					3	
	Detektion von Food Grade / Non-Food Grade						5					5	
	Digitaler Produktpass möglich						5					3	
	Eignung für dunkle Verpackungsfarben						4					5	
	Störanfälligkeit (Partikeldeformation, Verunreinigungen)						2					2	
	Sortierung von markierten Flakes						0					3	
	Durchsatzleistung im Vergleich zum Stand der Technik						5					4	
	Rückstandsfreie Entfernung der Markierung						4					5	
	Kosten	Kosten* Aufbringung Markierung						4					3
Kosten* Sensorsystem							0					0	
Kosten Lizenzierung / Softwareaktualisierung							1					1	
Sonstiges	Technological Readiness Level (laut Anbieter)						4					4	
	Monopolstellung Anbieter						2					2	
	Kombinationsfähigkeit mit anderen Identifikations-techniken						2					2	

*Kosten umfassen sowohl Investitions- als auch Betriebskosten

Abbildung 29 Stärken-Schwächen-Profil der 2D- und 3D-Codierung von HolyGrail 2.0 (Digimarc). Die einzelnen Kriterien sind qualitativ auf einer Skala von 0 bis 5 bewertet, wobei 5 Punkte das Maximum darstellen. Ausgenommen sind die Kriterien Kosten und Monopolstellung, bei denen jeweils das Maximum für geringere Kosten bzw. geringere Monopolstellung steht. Für eine leichtere Lesbarkeit wurde zusätzlich zur Punkteskala ein Balkensystem mit einem Farbcode eingeführt (leerer Balken = 0, roter Balken = 1, oranger Balken = 2, gelber Balken = 3, grüner Balken = 4, blauer Balken = 5).

3.6.1.3 HolyGrail 2.0 (CurvCode FiliGrade)

Wie bereits im vorherigen Abschnitt erläutert, ist auch CurvCode ein Teil der Initiative HolyGrail 2.0. Während Digimarc sich zunächst auf die 2D-Codierung konzentrierte, hat sich CurvCode auf die 3D-Codierung in Form einer mechanischen Gravur – CurvCode genannt – spezialisiert (vgl. Abbildung 26). Grundlage dafür ist das Projekt „PET-Recycling with watermarks“ welches durch die Europäische Union im Rahmen des Fonds für Regionale Entwicklung „OP-Oost“ gefördert wurde. Die Koalition „Food2Food 2.0“ inkludiert

Vergleichsstudie Identifikationsverfahren – Forum Rezyklat

30 Projektpartner und dient der Kennzeichnung von Post-Consumer-Lebensmittelverpackungen zur Schaffung eines Recyclingkreislaufes für Lebensmittelverpackungen.³⁶

Ziel

Das Ziel von CurvCode ist die Erweiterung der digitalen Wasserzeichentechnologie um mechanische Gravuren sowie das Einbringen von Pixelmodulationen, um eine Markierung zu erhalten. Ziel ist im Besonderen die Trennung von Lebensmittelverpackungen von Nicht-Lebensmittelverpackungen sowie die Erkennung von Multilayer-Materialien.³⁷

Detektionsverfahren

Abbildung 30 zeigt den von CurvCode patentierten CurvCode, welcher auf eine PET-Schale aufgebracht ist. Dieser besteht aus mehreren, aufeinanderfolgenden Auskerbungen, die gemeinsam eine geschwungene Linie ergeben. Mit Hilfe einer Kamera kann dessen Form erkannt und die hinterlegten Informationen abgerufen werden. Nähere Informationen über das Funktionsprinzip liegen nicht vor. Die Erkennung einer Markierung, welche ähnlich wie bei Digimarc aufgrund einer Pixelmodulation herbeigeführt wird, lässt sich analog zu dieser detektieren. Ein Beispiel ist ebenfalls Abbildung 30 zu entnehmen.

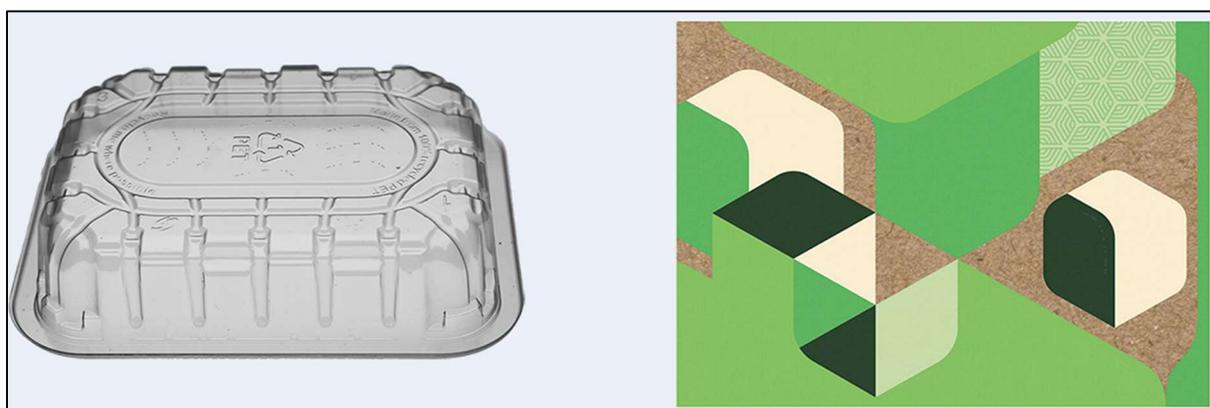


Abbildung 30 Links: Die linienförmig aufgetragenen Punkte bilden das von CurvCode produzierte digitale Wasserzeichen, genannt CurvCode. Zur Redundanz sind auf dieser Beispielverpackung acht CurvCodes aufgebracht. **Rechts:** 2D Pixelmodulation, welche keine weitere Tinte benötigt. Quelle: CurvCode, 2022³⁷.

Stoffstrom

Als Materialien für das Aufbringen von CurvCodes sind laut CurvCode PP, HDPE, LDPE, PET, PET / PE, PS sowie laminierte Papiere geeignet. Das Verfahren ist farzunabhängig,

³⁶ <https://www.CurvCode.com/news-articles/coalitie-food2food-2.0>

³⁷ <https://www.CurvCode.com/watermark-solutions/recycling>

Vergleichsstudie Identifikationsverfahren – Forum Rezyklat

funktioniert also sowohl mit transparenten, weißen, schwarzen und farbigen Verpackungen. Weitere Informationen bezüglich des Aufbringungsverfahrens liegen nicht vor. Es ist davon auszugehen, dass das Verfahren nur auf Hartkunststoffe, jedoch nicht auf flexible Verpackungen anwendbar ist. Ferner liegen keine Informationen über die Mindestgröße von Verpackungen vor. Je nach benötigter Häufigkeit der CurvCodes liegt diese vermutlich oberhalb von etwa 100 mm². Zur genauen Ausgestaltung der 2D Pixelmodulation liegen ebenfalls keine weiteren Informationen vor.

Bewertung

Die Bewertung der Lösung von CurvCode ist aufgrund des Informationsmangels schwierig. Nach eigenen Angaben sind bereits Verpackungen mit einem CurvCode in den Niederlanden im Handel³⁸. Dementsprechend wäre eine Einordnung in TRL 8 (system complete and qualified) möglich. Zuletzt wurde die Lösung von CurvCode im März 2021 von zwei niederländischen Universitäten mit TRL 6 (technology demonstrated in relevant environment) bewertet.³⁹

Ferner beherrscht CurvCode nach eigenen Angaben auch die Einbindung von digitalen Wasserzeichen durch Modifikation der Bedruckung, ähnlich wie Digimarc⁴⁰. Nähere Informationen über die Performanz dieser Lösung stehen nicht zur Verfügung.

Durch den starken Fokus auf Lebensmittelverpackungen ist unklar, ob tatsächlich produktspezifische Informationen pro Code gespeichert werden können oder ob die Auskerbungen selbst als alleiniges Sortierkriterium (zur Erkennung als Lebensmittelverpackung und / oder Multilayer) zu sehen ist. Grundlage für diese Einschätzung ist die Tatsache, dass auf allen öffentlich verfügbaren CurvCode-Abbildungen die gleiche Codierungsabfolge erkennbar ist. Kosten für die Markierung und Aufrüstung eines bestehenden Sortiergerätes werden bisher nicht angegeben.

Aufgrund der wenigen Informationen zur 2D-Lösung von CurvCode, werden in Abbildung 31 lediglich die Stärken und Schwächen des CurvCodes (3D-Lösung) qualitativ bewertet.

³⁸ <https://www.CurvCode.com/news-articles/first-plastic-tray-with-curvcode>

³⁹ <https://www.curvcode.com/solution/>

⁴⁰ <https://www.CurvCode.com/watermark-solutions/copy-detection>

Detektion / Identifikation / Stoffstrom	Lösung beinhaltet Sortierung	■	■	■	■	■	■	5
	Identifikation von PET, PE, PP, PS	■	■	■	■	■	■	5
	Anzahl zusätzlicher Merkmalsklassen	■	■	■	■	■	■	4
	Detektion von Verpackungen 50 – 100 mm	■	■	■	■	■	■	4
	Detektion von Verpackungen 20 – 50 mm	■	■	■	■	■	■	1
	Ejektion von Verpackungen 20 – 50 mm	■	■	■	■	■	■	3
	Detektion von Food Grade / Non-Food Grade	■	■	■	■	■	■	5
	Digitaler Produktpass möglich	■	■	■	■	■	■	3
	Eignung für dunkle Verpackungsfarben	■	■	■	■	■	■	5
	Störanfälligkeit (Partikeldeformation, Verunreinigungen)	■	■	■	■	■	■	1
	Sortierung von markierten Flakes	■	■	■	■	■	■	0
	Durchsatzleistung im Vergleich zum Stand der Technik	■	■	■	■	■	■	4
	Rückstandsfreie Entfernung der Markierung	■	■	■	■	■	■	5
	Kosten	Kosten* Aufbringung Markierung	■	■	■	■	■	■
Kosten* Sensorsystem		■	■	■	■	■	■	2
Kosten Lizenzierung / Softwareaktualisierung		■	■	■	■	■	■	1
Sonstiges	Technological Readiness Level (laut Anbieter)	■	■	■	■	■	■	4
	Monopolstellung Anbieter	■	■	■	■	■	■	2
	Kombinationsfähigkeit mit anderen Identifikationstechniken	■	■	■	■	■	■	2

*Kosten umfassen sowohl Investitions- als auch Betriebskosten

Abbildung 31 Stärken-Schwächen-Profil von HolyGrail 2.0 (CurvCode, CurvCode). Die einzelnen Kriterien sind qualitativ auf einer Skala von 0 bis 5 bewertet, wobei 5 Punkte das Maximum darstellen. Ausgenommen sind die Kriterien Kosten und Monopolstellung, bei denen jeweils das Maximum für geringere Kosten bzw. geringere Monopolstellung steht. Für eine leichtere Lesbarkeit wurde zusätzlich zur Punkteskala ein Balkensystem mit einem Farbcode eingeführt (leerer Balken = 0, roter Balken = 1, oranger Balken = 2, gelber Balken = 3, grüner Balken = 4, blauer Balken = 5).

3.7 R-Cycle

R-Cycle ist eine von Verpackungs- und Sortiergeräteherstellern ins Leben gerufene Initiative zur Schaffung eines öffentlich zugänglichen Standards für die Dokumentation von Verpackungseigenschaften. Ziel ist das Speichern von produktions- und recyclingrelevanten Daten in einem digitalen Produktpass. Dieser sollen für alle Akteure entlang der Wertschöpfungskette von Kunststoffverpackungen zu Verfügung stehen.⁴¹

Dazu werden alle recyclingrelevanten Informationen von Verpackungen auf Produktebene während der Herstellung, Weiterverarbeitung und Befüllung erhoben. Basierend auf dem von GS1 standardisierten EPCIS-Protokoll werden diese erfasst und in einer Datenbank gespeichert. Durch diesen Prozess behält die verwaltende Instanz Kontrolle über die eigenen

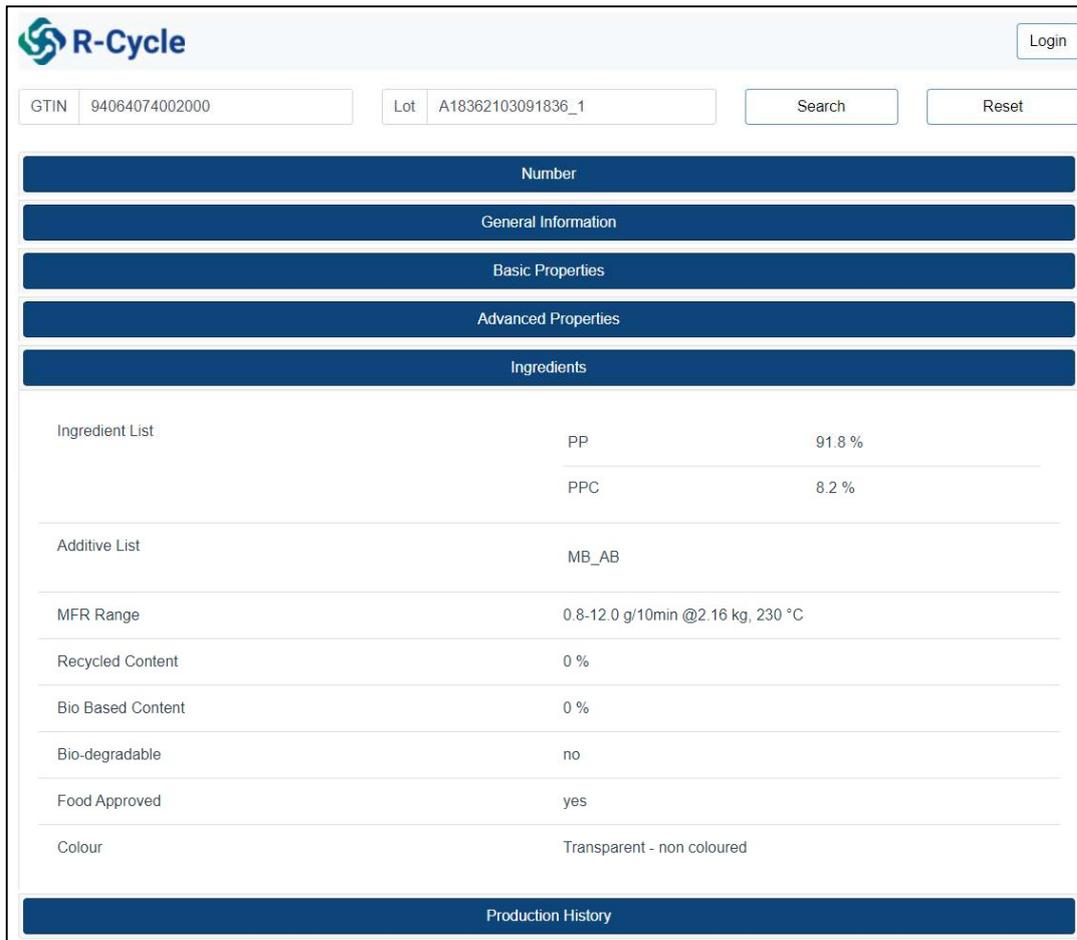
⁴¹ <https://www.r-cycle.org/>

Vergleichsstudie Identifikationsverfahren – Forum Rezyklat

Daten und kann bestimmten Akteuren individuellen Voll- oder Teilzugriff auf diese geben (vgl. Abbildung 32). Somit ist R-Cycle *kein* Markierungsverfahren, sondern vielmehr ein offener Datenstandard, der auf andere Markierungsverfahren angewiesen ist und unter verschiedenen Markierungslösungen Daten-Kompatibilität erlaubt. Für R-Cycle geeignete Markierungsverfahren sind insbesondere solche, die eine produktspezifische Identifizierung ermöglichen.

Eigenen Angaben zufolge ist das System von R-Cycle lauffähig und funktionstüchtig und anwendbar. Dies wurde bereits durch mehrere Pilotprojekte mit Industriepartnern dokumentiert. Hierbei wurden insbesondere verschiedene Herstellungsverfahren und Verpackungstypen beleuchtet⁴².

⁴² <https://www.r-cycle.org/pilotprojekte/>



R-Cycle Login

GTIN: 94064074002000 Lot: A18362103091836_1 Search Reset

Number

General Information

Basic Properties

Advanced Properties

Ingredients

Ingredient List	PP	91.8 %
	PPC	8.2 %
Additive List	MB_AB	
MFR Range	0.8-12.0 g/10min @2.16 kg, 230 °C	
Recycled Content	0 %	
Bio Based Content	0 %	
Bio-degradable	no	
Food Approved	yes	
Colour	Transparent - non coloured	

Production History

Abbildung 32 Beispielhafter digitaler Produktpass von R-Cycle aus welchem recyclingrelevante Daten wie Polymerzusammensetzung, Schmelzflussindex oder Lebensmittelzulassung hervorgehen. Quelle: R-Cycle, 2022⁴³.

3.8 Circularise

Das Unternehmen Circularise mit Sitz in Den Haag bietet ähnlich wie R-Cycle, eine Infrastruktur-Lösung für einen Digitalen Produktpass an. Dieser soll die gesamte Wertschöpfungs- und Recyclingkette abbilden. Neben der Infrastruktur für die Datenbankverwaltung wird ein Programm zur Stoffbilanzierung namens MassBalancer angeboten (vgl. Abbildung 33). Dieses erlaubt die Nachverfolgung einzelner Materialströme und den Handel von „Sustainable Credits“ nach dem ISCC Zertifikat-Gutschriften. MassBalancer wird bereits von Unternehmen wie Borealis und Philips zur primären und

⁴³ <https://www.r-cycle.org/intelligente-blasform-verpackung-identifizierbare-digitales-wasserzeichen-flasche-kanister/>

Vergleichsstudie Identifikationsverfahren – Forum Rezyklat

sekundären Stoffstromüberwachung von Batches verwendet.⁴⁴ Zur Kennzeichnung der Produkte bzw. Materialströme werden Technologien wie Barcodes, QR-Codes, RFIDs, NFC, DNA und chemische Marker von Drittanbietern genutzt. Somit stellt Circularise wie R-Cycle *kein* Markierungsverfahren dar, sondern ausschließlich eine Datenverwaltungslösung.

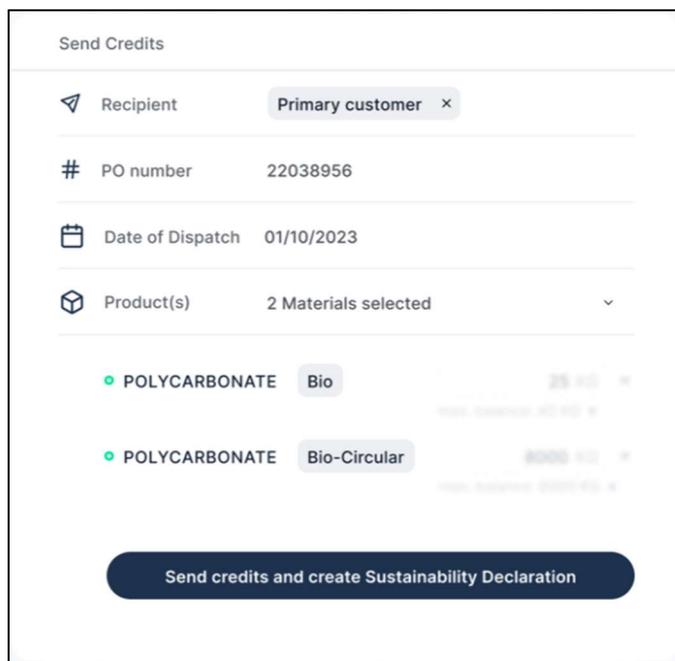


Abbildung 33 Graphische Oberfläche des MassBalancer von Circularise. Aus diesem gehen materialbezogene Daten wie Empfänger*innen, Identifikationsnummern, Lieferdaten, Produktbezeichnung, Herkunft und die Möglichkeit des Transfers gut geschriebener Credits hervor.

⁴⁴ <https://www.circularise.com/massbalancer>

4 AP2: LVP-Sortieranlage in Deutschland

Die Ziele des Arbeitspakets 2 sind, die Erstellung einer Übersicht der LVP-Sortieranlagen, die aktuell in Deutschland betrieben werden, die Ermittlung der aktuellen Sortierkapazitäten und der technischen Ausrüstung der einzelnen Anlagen sowie die Ermittlung des Potenzials und des Interesses der Betreiber die Anlagen nachzurüsten.

4.1 Methodik und Daten

In Rahmen dieses Arbeitspakets sollen existierende und betriebene LVP-Sortieranlagen in Deutschland und deren technischer Stand zusammengestellt und bewertet werden. Grundlage hierfür sind Literatur, Angaben der Emissionsaufsichtsbehörden und technische Angaben der Betreiber der bestehenden LVP-Sortieranlagen in Deutschland. Ausgangspunkt der Recherchen ist die vom Umweltbundesamt (UBA) herausgegebene Liste der LVP-Sortieranlagen in Deutschland. Die gewählte Vorgehensweise für das Arbeitspaket 2 ist zusammenfassend in Abbildung 34 dargestellt.



Abbildung 34 Vorgehensweise des AP2

Die Erhebung und Auswertung der verfügbaren Literatur umfassten Suchläufe und Recherchen in verschiedenen Datenbanken und bei Verlagen, wie z. B. Google Scholar oder Elsevier, zu einschlägigen Schlagworten. Da wissenschaftliche Veröffentlichungen zum Teil mit erheblichem Zeitverzug publiziert werden, wurden zusätzlich Daten aus aktuellen Statistiken und die Ergebnisse von spezifischen Abfragen bei Genehmigungsbehörden ausgewertet. Die direkte Befragung der Anlagenbetreiber geschah, um die Aktualität der ermittelten Daten zu bewerten und die Rahmendatensätze der Anlagen (z. B. Adresse, Kapazität, Betreiber) zu überprüfen. Diese komplementären Methoden wurden eingesetzt, um sicherzustellen, dass alle relevanten Informationen erfasst, verifiziert und bewertet werden können.

Grundlage der Erhebungen ist eine Liste aller Sortieranlagen in Deutschland des Umweltbundesamts (UBA) aus 2019. Alle benannten Anlagenbetreiber in dieser Liste wurden kontaktiert (Screening) und zum Stand ihrer Anlagen befragt. Ergab die Befragung, dass

Vergleichsstudie Identifikationsverfahren – Forum Rezyklat

Anlagen nicht mehr in der LVP-Sortierung aktiv sind, wurden diese nach dem ersten Kontakt aus der Liste entfernt. Informationen über neu errichtete LVP-Sortieranlagen nach 2019 wurden wie oben beschrieben recherchiert, beschrieben und der Aufstellung der Studie entsprechend zugefügt.

Im Rahmen einer zweiten Befragung der Anlagenbetreiber*innen sollten die spezifische Gestaltung der Sortieranlagen erfasst, die unterschiedlichen Techniken, Prozessabläufe und Leistungen dokumentiert und mögliche Nachrüstungspotenzial und -Aufwendungen erhoben bzw. bewertet werden. Diese Befragung wurde mithilfe eines Fragebogens, welcher im Falle von fernmündlichen oder persönlichen Kontakten auch als Interviewleitfadens eingesetzt wurde, durchgeführt (Tabelle 3). Die Teilnehmenden konnten durch offene Fragen zusätzliche Aspekte in die Studie einbringen.

Der Fragebogen untergliedert sich in die Bereiche allgemeine Informationen, Ausstattung, Siebschnitte, Sortierfraktionen. Der Kreis der Befragten umfasste die Leitungen der Anlagen aus der erstellten Anlagenliste.

Tabelle 3 Fragebogen für die zweite Befragung der Betreiber*innen

1. Allgemeine Informationen

Name der Anlage
 Theoretische Kapazität / Genehmigung (Mg/a)
 Fläche der Anlage in m²
 (nur Maschinenhalle nach der Einspeisung, zzgl.
 Annahmehalle)
 Ist ein Verfahrensfliessbild verfügbar?

2. Ausstattung

Anzahl Shredder/Sackaufreißer/sonst. Aggregate zur
 Aufgabe (Stk.)
 Siebtrommel (Stk.)
 Ballistischer Separator (Stk.)
 Feinsieb/Schwingsieb (Stk.)
 Windsichter (Stk.)
 NIR-Sortierautomat (Stk.)
 Sortierautomat für schwarze Objekte (Stk.)
 Handsortierer (Person)
 Ballenpresse (Stk.)
 Zwischenlager für Sortierprodukte vor der Ballenpresse
 (Stk.)
 Andere kunststoffsorrierrelevante Anlagen (Stk.)
 (z. B. Sortierroboter, bitte angeben)

3. Sortierfraktion

Welche der folgenden Sortierfraktionen werden in 2021 und 2022 produziert

Name	Ja (X)/Nein	Bemerkungen
310 Kunststofffolien		
Folien-Farbe		
320 Gem. Kunststoffflaschen		
321 PO-Kunststoffflaschen		
322 Hohlkörper		
323 Gem. PO-Artikel		
323-2 PO-Flex		
PP-Flex		
324 PP		
PP-Weiß/Transparent		
PP-Farbe		
325 PET-Transparent		
328 (1-3) Misch-PET		
329 PE		
PE-Weiß/Transluzent		
PE-Farbe		
331 PS		
340 EPS		
350/352 Mischkunststoffe		
351 (1-4) Formstabile Kunststoffe		
351-5 Schwarzkunststoffe		

4. Bereitschaft/Interesse zusätzliche Materialströme zu erzeugen? (bitte kurz erläutern)

4.2 Ergebnisse - Bestehende LVP-Sortieranlagen

Aktuell werden in Deutschland 39 LVP-Sortieranlagen mit einer Gesamtkapazität von 3,3 Mio. Mg/a betrieben (Abbildung 35). Dieses Ergebnis aktualisiert die UBA-Recherchen von 2019, wonach zwar mehr Anlagen (43 Anlagen), aber eine geringere Gesamtkapazität von nur 2,7 Mio. Mg/a in Deutschland verzeichnet wurden (Dehoust et al. 2021). Die Verteilung der Sortieranlagen auf die Bundesländer ist in Abbildung 35 dargestellt, die Verteilung nach Kapazitätsgruppen zeigt Abbildung 36.

Die Sortieranlagen wurden im Rahmen dieser Studie nach ihrer Kapazität in vier Gruppen eingeteilt (folgend Kapazitätsgruppe (KG)). Die erste KG sind die kleinen Sortieranlagen mit einer Kapazität von weniger als 60.000 Mg/a, die zweite KG umfasst Anlagen mit einer Kapazität zwischen 60.000 und 99.000 Mg/a; die dritte KG beinhaltet die Sortieranlagen mit einer Kapazität von 100.000 bis 149.000 Mg/a; die vierte KG sind die großen Sortieranlagen mit einer Kapazität von über 150.000 Mg/a. Die Unterteilung in Kapazitätsgruppen ist in Tabelle 4 zusammengefasst.

Tabelle 4 Unterteilung der LVP-Sortieranlagen in verschiedene Kapazitätsgruppen

Kapazitätsgruppe (KG) Nr.	Kapazitätsbereich (Mg/a)
Kapazitätsgruppe 1	0 - 59.000
Kapazitätsgruppe 2	60.000 - 99.000
Kapazitätsgruppe 3	100.000 – 149.000
Kapazitätsgruppe 4	>150.000

Vergleichsstudie Identifikationsverfahren – Forum Rezyklat

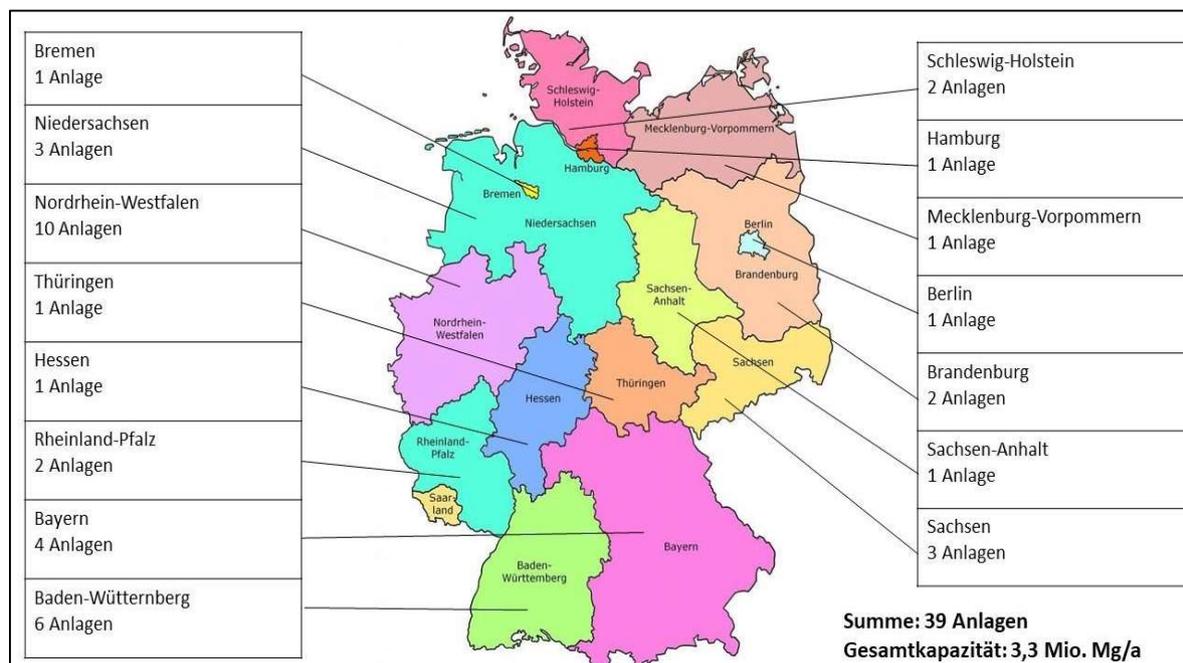


Abbildung 35 LVP-Sortieranlagen in Deutschland und die Verteilung in den Bundesländern

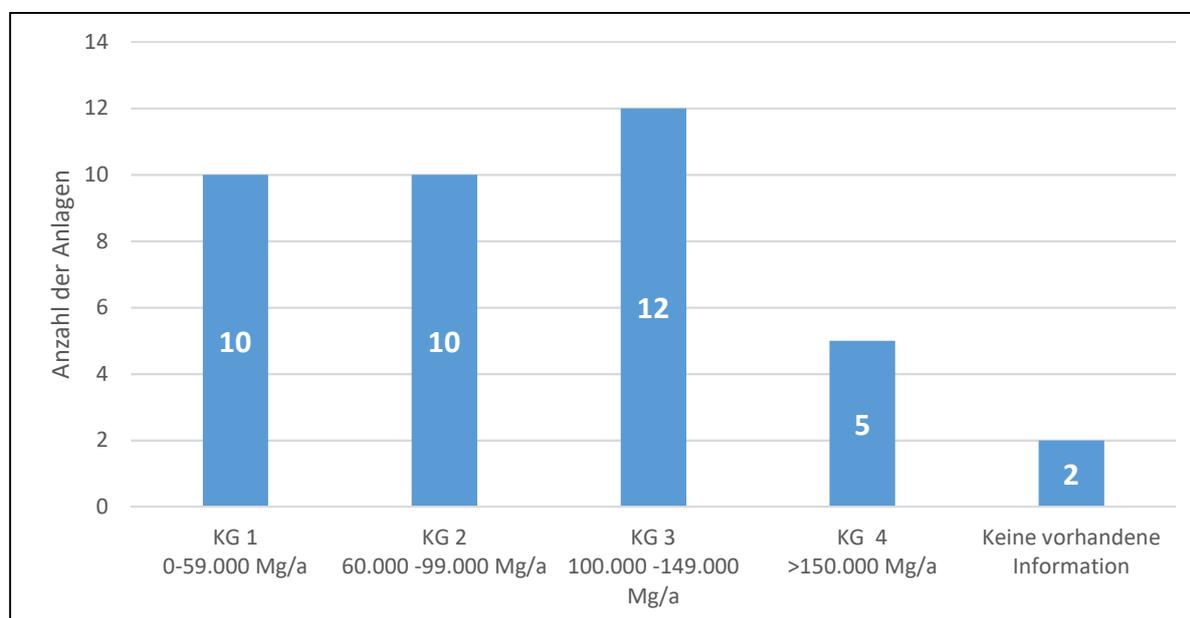


Abbildung 36 Verteilung aller LVP-Sortieranlagen in Deutschland über die verschiedenen Kapazitätsgruppen

Alle 39 Anlagen wurden ein zweites Mal kontaktiert und erhielten den oben beschriebenen Fragebogen. 28 Anlagenbetreiber haben den Fragebogen direkt beantwortet und zurückgesandt. Diese Anlagen repräsentieren eine Gesamtsortierkapazität von 2,5 Mio. Mg/a

Vergleichsstudie Identifikationsverfahren – Forum Rezyklat

und decken damit 76 % der Sortierkapazität Deutschlands ab. Die Verteilung der Rückantworten auf die einzelnen Kapazitätsgruppen, ist in Abbildung 37 aufgeführt.

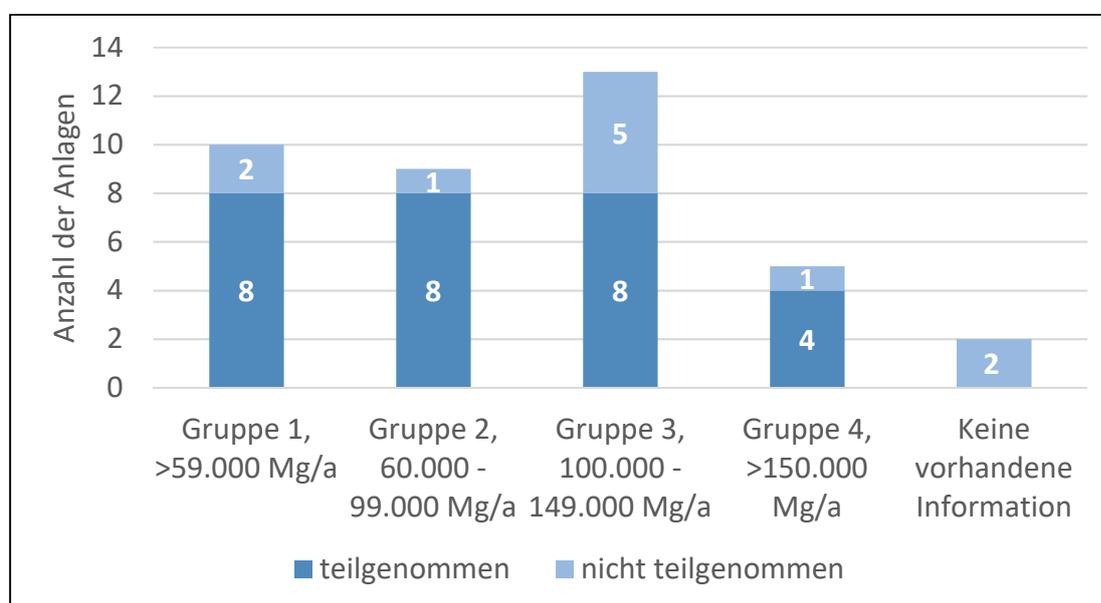


Abbildung 37 Rückmeldungen der LVP-Sortieranlagen in den jeweiligen Kapazitätsgruppen

Auch in Bezug auf die Kapazitätsgruppen der LVP-Sortieranlagen konnte ein repräsentatives Ergebnis erzielt werden, wie die Abbildung 37 zeigt.

Die Ablehnung der Beantwortung von 12 Anlagenbetreibern wurde zum Beispiel mit dem Schutz von Geschäftsgeheimnissen und Know-how (sechs Anlagen) begründet. Weitere vier Anlagen lehnten die Teilnahme an der Umfrage mit Bezug auf die allgemeine Regelung im Unternehmen ab. Die Übersicht der Ablehnungsgründe ist in der folgenden Abbildung 38 zusammengestellt.

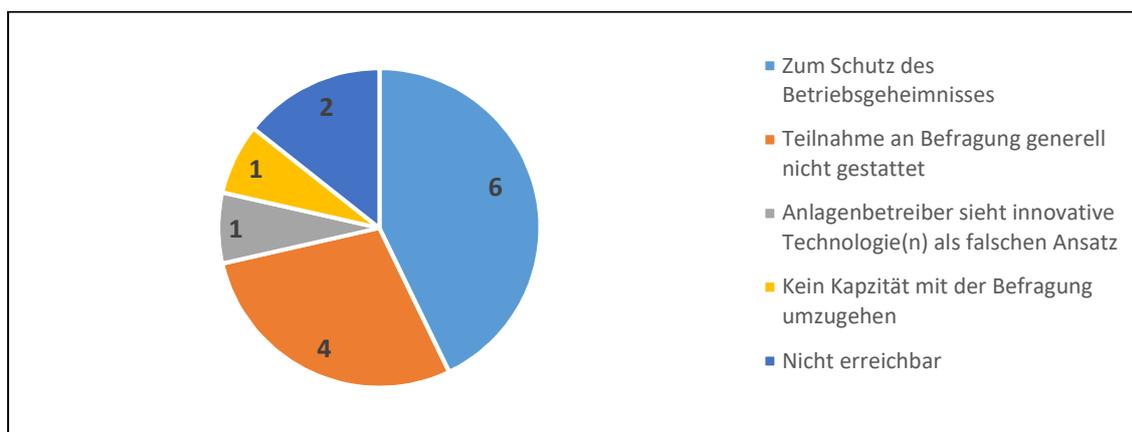


Abbildung 38 Gründe für die Ablehnung der Befragung und Anzahl der jeweiligen Antworten

4.2.1 Sonderanlagen

Zusätzlich ergab die Befragung der vom UBA gelisteten Anlagen, dass eine Aktualisierung geboten ist. Vier der UBA-gelisteten Anlagen werden inzwischen als sogenannte Sonderanlagen eingestuft. Dies betrifft Anlagen, welche LVP-Material als Eingangsmaterial verarbeiten, aber nicht dem üblichen Prozess einer LVP-Sortieranlage folgen (Kapitel 2.1).

Zwei der befragten Anlagen werden von den Betreibenden als sogenannte "Wertstoffkonzentrationsanlagen" eingestuft. Diese führen keine KA-Sortierung durch, sondern separieren Fraktionen aus konzentrierten 3D Kunststoffobjekten als Produkt für weitere Sortieranlagen.

Zwei andere Anlagen nutzen Schwimm-Sink-Verfahren zur Trennung von gemischten Kunststoffabfällen (Dichtentrennanlagen). Die Prozesse der Wertstoffkonzentrationsanlagen und der Dichtentrennanlagen werden im Folgenden zusammenfassend dargestellt.

4.2.1.1 Wertstoffkonzentrationsanlage

Die Kapazität der zwei Wertstoffkonzentrationsanlagen beträgt 5,6 % der Gesamtkapazität aller an der Befragung beteiligten Anlagen. Der spezifische Sortierprozess dieser Anlagen umfasst Sacköffner, Siebtrommeln, Windsichter, Magneten und Wirbelstromabscheider. Das Verfahrensbild dieses Anlagentyps ist in Abbildung 39 skizziert.

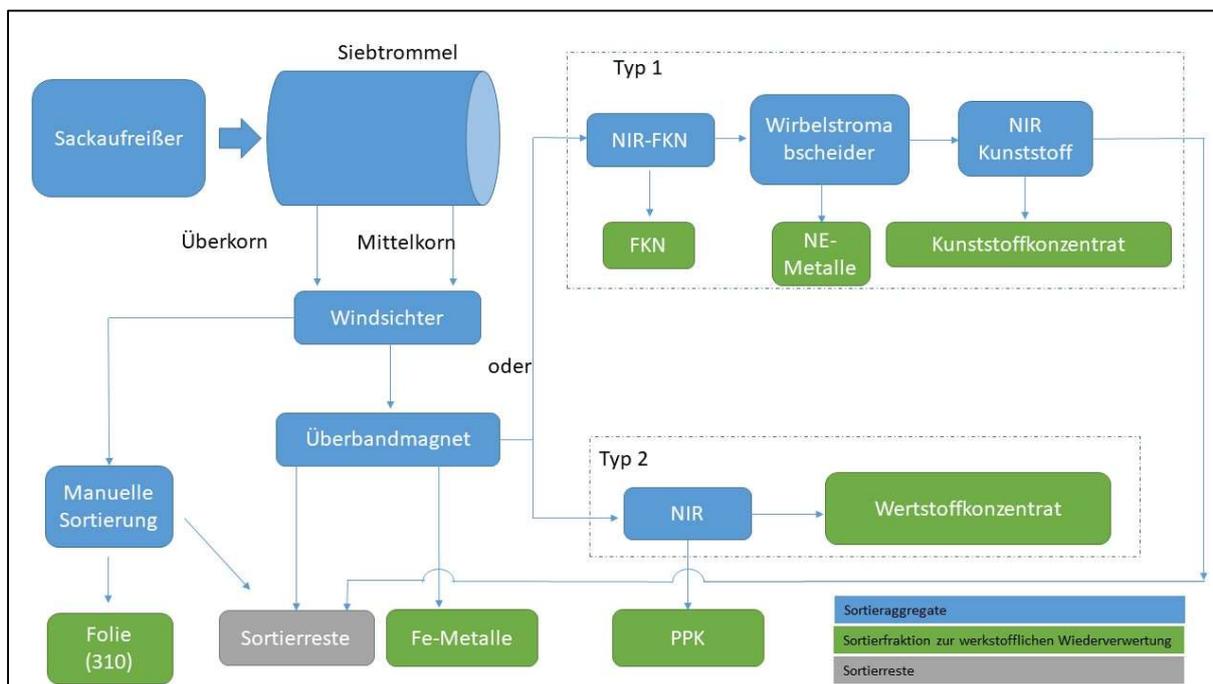


Abbildung 39 Schematische Darstellung des Verfahrens von "Wertstoffkonzentrationsanlagen" (ohne Feinfraktion)

4.2.1.2 Dichtentrennanlage

Die Kapazität der zwei Dichtentrennanlagen beträgt 8,2 % der Gesamtkapazität aller an der Befragung beteiligten Anlagen. Die beiden Anlagen sind die einzigen Anlagen in Deutschland, welche die Prinzipien der Dichtentrennung auf Objektenebene für LVP als Inputmaterial anwenden. Der Prozess ist beispielhaft in Abbildung 40 dargestellt.

Nach der Vorzerkleinerung wird das Fe-Metall zunächst mit einem Magneten entfernt. FKN und Großpapier werden mit einer NIR-Sortierstufe abgetrennt. In der ersten Waschstufe wird das restliche Papier inkl. Etiketten und NE-Metallen entfernt. Danach durchläuft die Kunststofffraktion mehrere Waschstufen und Dichtentrennstufen. Am Ende entstehen Kunststoff-Flakes, welche direkt zu Regranulat extrudiert werden.

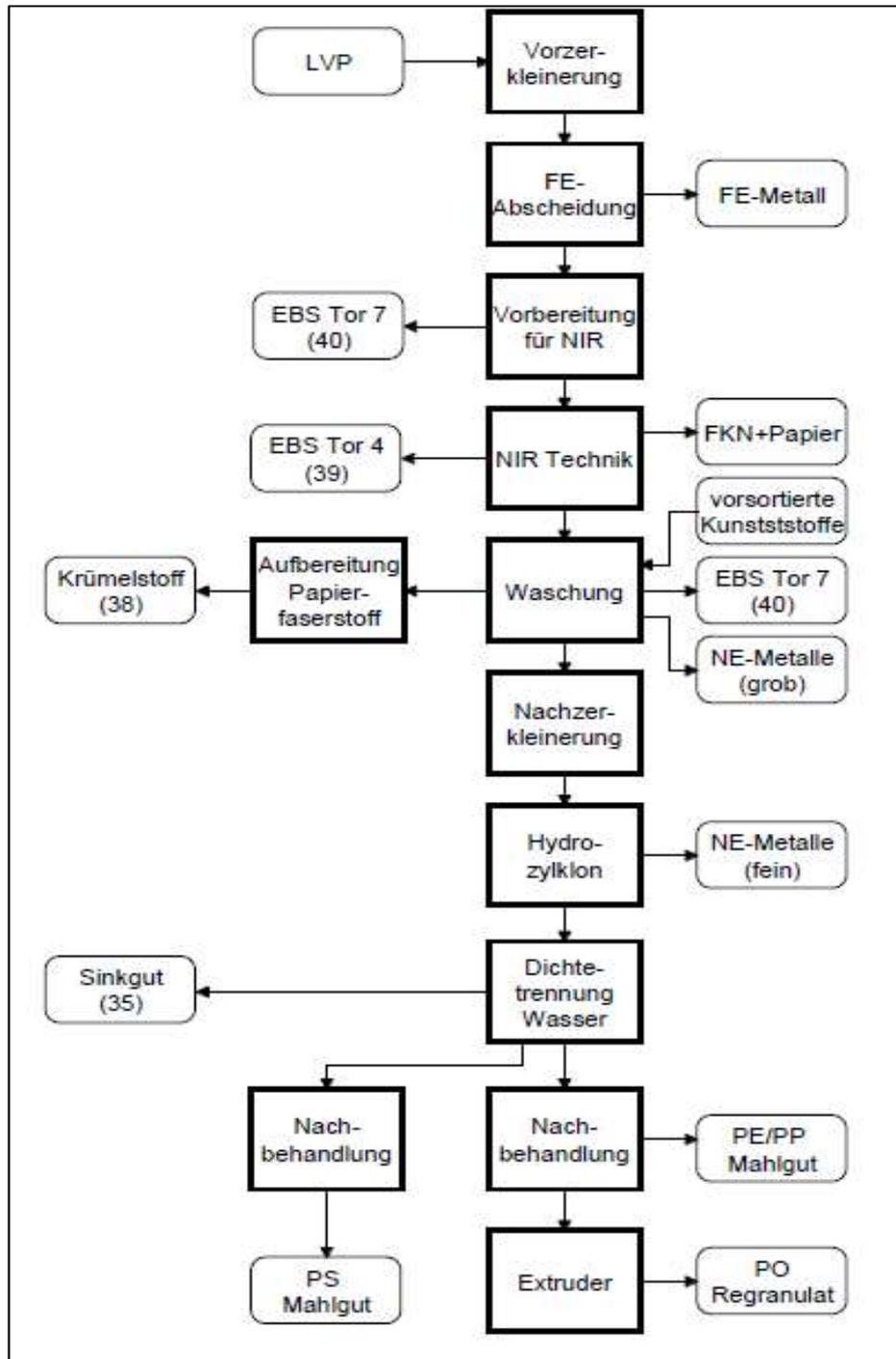


Abbildung 40 Prozessdarstellung einer Dichtentrennanlage (Freitag 2022)

4.3 Sortierleistung und Sortierprodukte der bestehenden Anlagen

4.3.1 Sortierleistung verschiedener Sortierfraktionen

Aus den Befragungsergebnissen wird die installierte Sortierkapazität nach Sortierfraktionen, wie in Formel 2 dargestellt, berechnet.

$$SK_p = \frac{\sum K_p}{\sum K_T} \times 100\% \quad (2)$$

Wobei

SK: Spezifische Sortierkapazität von der Gesamtkapazität in %;

P: Sortierfraktion (z. B.310, 323...);

K_p: Gesamtkapazität der für die Sortierfraktion P sortieren in Mg/a;

K_t: Gesamtkapazität aller LVP-Sortieranlagen, die an der Befragung teilgenommen haben, in Mg/a

Abbildung 41 zeigt die installierte spezifische Sortierkapazität der einzelnen Sortierfraktionen in Deutschland mit einem Anteil von mehr als 10 % an der Gesamtleistung.

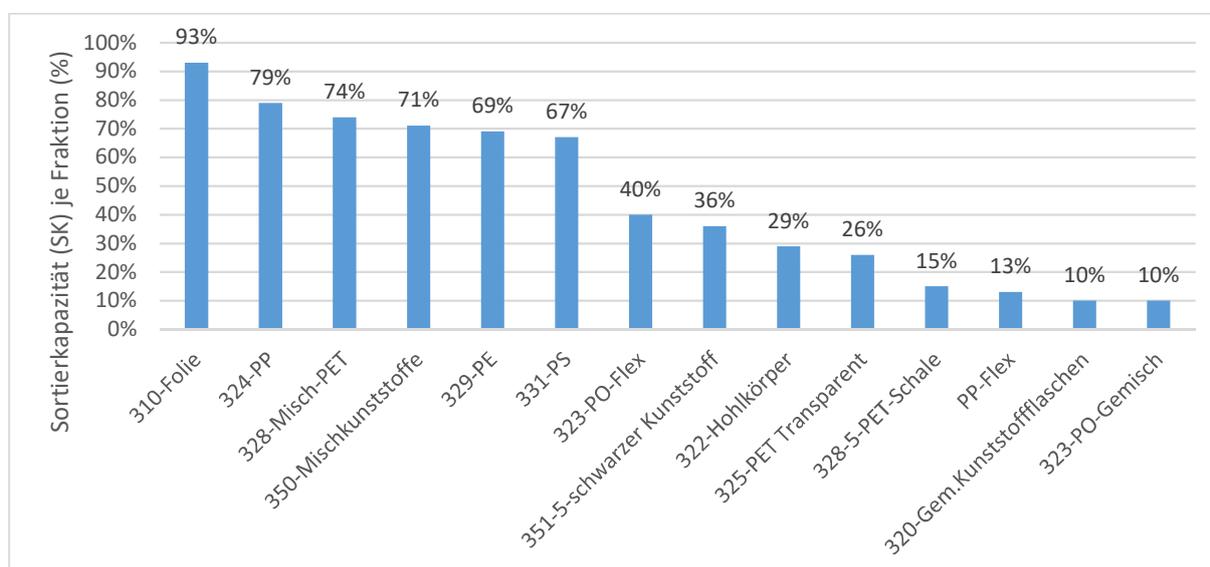


Abbildung 41 Sortierkapazität (SK) je Fraktion von der Gesamtkapazität (alle Fraktionen mit SK ≥ 10 %)

Die Abbildung 41 zeigt, welche Fraktionen in mehr als 50 % der installierten Kapazität sortiert werden, darunter 310 Folie (93 %), 324 PP (79 %), 328 Mischung aus PET-Flaschen und -Schalen (74 %), 350 Mischkunststoffe (71 %), 329 PE (69 %) und 331 PS (67 %).

Vergleichsstudie Identifikationsverfahren – Forum Rezyklat

Weitere Fraktionen werden in weniger als 50 % Kapazität, aber bei über 10 % der installierten Kapazitäten erzeugt, darunter 323-PO-Flex (40 %), 351-5 schwarzer Kunststoff (36 %), 322 Hohlkörper (29 %), 325-PET transparent (26 %), 328-5 PET-Schale (15 %), PP-Flex (13 %), 320 Gem. Kunststoffflaschen (10 %) und 323 PO-Gemisch (10 %). Mit Ausnahme von 322 Hohlkörper erfordern sämtliche dieser Fraktionen zusätzliche Sortierschritte.

Sortierfraktionen, die weniger als 10 % der installierten Kapazität ausmachen, stammen aus individuellen Verfahren einzelner Anlagen. Kleinere Anlagen verfügen nicht immer über die entsprechenden Sortierschritte, mit denen die vier Ziel-Kunststoffarten (PET, PE, PP und PS) dieser Studie vollständig abgetrennt werden können. Stattdessen werden verschiedene Kunststoffmischungen zur weiteren Sortierung zusammengestellt. Eine detaillierte Darstellung dieser Fraktionen ist in Tabelle 5 gegeben.

Tabelle 5 Sortierverfahren und Wertbestimmung der Sonder-Sortierfraktionen (< 10 %)

Sortierfraktion	SK	Anzahl der Anlagen	Erzeugt durch
Folien-Farbe	8 %	2	Nebenprodukt der Folienfarbsortierung
351 Formstabile Kunststoffe	5 %	3	Anlage Kapazitätsgruppen 1 - 2, die nicht alle 4 Kunststoffart (PET, PE, PP, PS) komplett sortieren können
PP-Flex	5 %	1	Nebenprodukt der Foliensortierung
PP Weiß/ Transparent	5 %	1	Farbsortierung
PP-Farbe	5 %	1	Nebenprodukt der Farbsortierung
PE-Weiß	5 %	1	Farbsortierung
PE-Farbe	5 %	1	Nebenprodukt der Farbsortierung
Wertstoffkonzentrat	2 %	1	Wertstoffkonzentrationsanlage
352 Mischkunststoffe	2 %	2	Wertstoffkonzentrationsanlage

4.3.2 Anzahl der Sortierfraktionen nach Sortierkapazität der Anlagen

In Abhängigkeit von der Größe, d.h. Sortierkapazität, der Anlagen werden unterschiedliche Anzahlen verschiedener Fraktionen produziert. Abbildung 42 zeigt die Ergebnisse in Bezug auf die Abhängigkeit von Sortierkapazität der Anlage und Anzahl der KA-Sortierfraktionen.

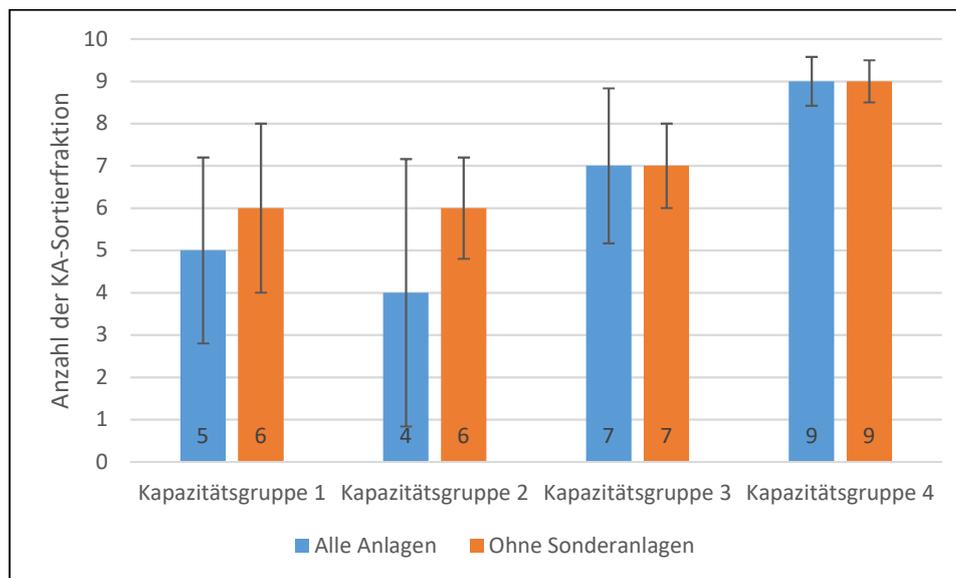


Abbildung 42 Anzahl der Kunststoffarten-Sortierfraktionen je Kapazitätsgruppe

Die Sortieranlagen der KG 1 trennen in der Regel in 5 ± 2 kunststoffbezogene Sortierfraktionen. Die KG 2 erzeugt 4 ± 4 kunststoffbezogene Sortierfraktionen. Die Anzahl der Sortierfraktionen steigt mit der Kapazität der Sortieranlagen. Die KG 3 und 4 erzeugen 7 ± 2 und 9 ± 1 Sortierfraktionen (s. Abbildung 42).

Die hohe Standardabweichung der Ergebnisse der KG 1 und 2 ist darauf zurückzuführen, dass jeweils eine Anlage ein Kunststoffkonzentrat exklusiv herstellt (Wertstoffkonzentrationsanlage). In der KG 2 verzerren zusätzlich die beiden Dichtentrennanlagen (Kap.4.2.1) das Ergebnis. In der KG 3 befindet sich die Einzige unter den 39 Anlagen mit Farbsortierung (Transparenz/Weiß gegen Farbe) für Folien, PE und PP Fraktionen.

Wenn die Sonderanlagen aus der Betrachtung herausgenommen werden, erzeugen die kleinen und mittelgroßen KG 1 und 2 sechs bis acht Sortierfraktionen; die größeren und die großen Anlagen in den KG 3 und KG 4 jeweils sieben bis neun Sortierfraktionen.

Der Zusammenhang zwischen der Anlagenkapazität und der Anzahl der Sortierfraktionen zeigt, dass eine Anlage mit der Kapazität größer als 150.000 Mg/a die Erzeugung von mehr Sortierfraktionen begünstigt. Die Abweichungen zeigen jedoch auch, dass die Variation der Anzahl der Sortierfraktionen technisch unabhängig von der Anlagenkapazität sein kann.

4.4 Sortierverfahren und Aggregation

Die Daten dieses Abschnitts wurden in den Teilen 2 und 3 des Fragebogens (s. Tabelle 1) erhoben. Zu Beginn werden deshalb noch einmal alle Sortiertechniken, inkl. Siebtrommeln, Windsichter und ballistische Separatoren, zusammen als „Up-stream-Prozess“ vorgestellt. Der

Vergleichsstudie Identifikationsverfahren – Forum Rezyklat

nachfolgende Abschnitt konzentriert sich dann auf die Kunststoffartensortierung mit NIR-Sortieraggregaten. Im letzten Teil wird ein Überblick über den aktuellen Stand der Anwendung von innovativen Sortiertechnologien in den bestehenden Anlagen gegeben.

Die Befragung ergab, dass die Verfahrensreihenfolge und die spezifischen Technologien zur Sortierung der verschiedenen Kunststofffraktionen oft als Geschäftsgeheimnisse der Unternehmen betrachtet werden. Aus den vorliegenden Verfahrensfliessbildern konnten jedoch in vielen Fällen die Anzahl von NIR-Sortiermaschinen und Details zu den Prozessabläufen ermittelt werden. Die Ergebnisse zeigen hier, dass es kein universelles Ablaufschema für die Kunststoffsortierung gibt. Gleichzeitig gilt, dass nur die NIR-Sortierung für KA, FKN und PPK eingesetzt wird. Die Anzahl der NIR-Sortierfraktionen korreliert mit der Anzahl der NIR-Sortiermaschinen. Die Anlagen der KG 1 setzen im Durchschnitt eine NIR-Sortiermaschine pro Sortierfraktion ein, während Anlagen der KG 2 in der Regel zwei NIR-Sortieraggregate pro Sortierfraktion nutzen, was mit der zunehmenden Komplexität des Sortierprozesses begründet ist. Die Komplexität bedingt, dass NIR-Sortieraggregate auch zur Trennung von Kunststoff- und Nicht-Kunststoff-Verpackungen eingesetzt werden, wobei nicht unmittelbar eine weitere Sortierfraktion erzeugt wird (s. Abbildung 43).

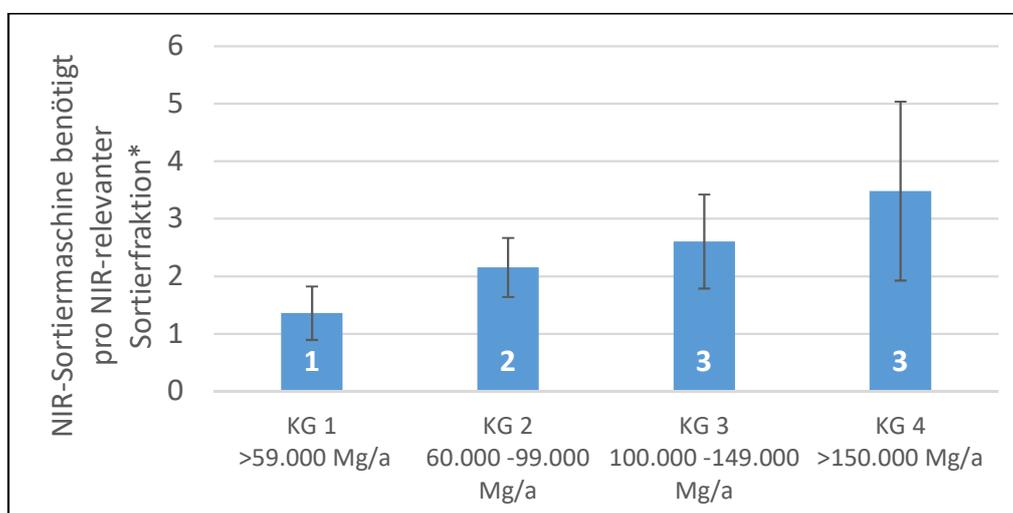


Abbildung 43 Anzahl der benötigten NIR-Sortiermaschinen zur Erzeugung einer NIR-relevanten Fraktion in den verschiedenen Kapazitätsgruppen (*NIR-relevante Sortierfraktion: KA-Sortierfraktion, FKN, PPK)

Bei den großen Anlagen mit hoher Sortierkapazität der KG 3 und 4 erzeugen zwei bis fünf NIR-Sortieraggregate eine Sortierfraktion. Ein weiterer Grund dafür ist, dass aufgrund des großen Durchsatzes einige Fraktionen, insbesondere FKN und Folien, in parallelen Linien sortiert werden (Jansen et al. 2015). Ein anderer Grund ist die Installation von NIR-Stationen

Vergleichsstudie Identifikationsverfahren – Forum Rezyklat

zur „Reinigung“ der sortierten Fraktion im Up-stream (Feil et al. 2017). Hierbei werden nach der ersten „positiven“ Kunststoff-Sortierung die Fremdstoffe mittels „negativer Sortierung“ aussortiert, um eine möglichst reine Kunststofffraktion mit hoher Qualität zu erzeugen. Außerdem ist eine der Anlagen in der Kapazitätsgruppe 3 mit einer ergänzenden Farbsortierung für PE-, PP- und Folienfraktionen ausgestattet, was zu einem deutlich höheren Einsatz an NIR-Sortieraggregaten führt.

4.5 Einsatz neuer Sortiertechnologien

Die durch künstliche Intelligenz gestützte Objekterkennung ist bereits in einigen Sortieranlagen im Einsatz. Dabei wird diese KI-basierte Sortierung auf zwei Arten realisiert:

- 1) integriert in die NIR-Sortiermaschine,
- 2) individuell eingebaut mit Sortierroboter.

Die Objekterkennung wird zum Beispiel bei der Trennung von PET-Schalen von PET-Flaschen sowie der Identifikation und Abtrennung von Silikonkartuschen aus der PE-Fraktion eingesetzt. Zudem dient sie der Reinigung des PP-Materialstroms, um weitere Nicht-PP-Objekte auszusortieren.

Die Anwendung der innovativen Sortiertechnologie in den aktuell betriebenen LVP-Sortieranlagen ist in Abbildung 44 dargestellt.

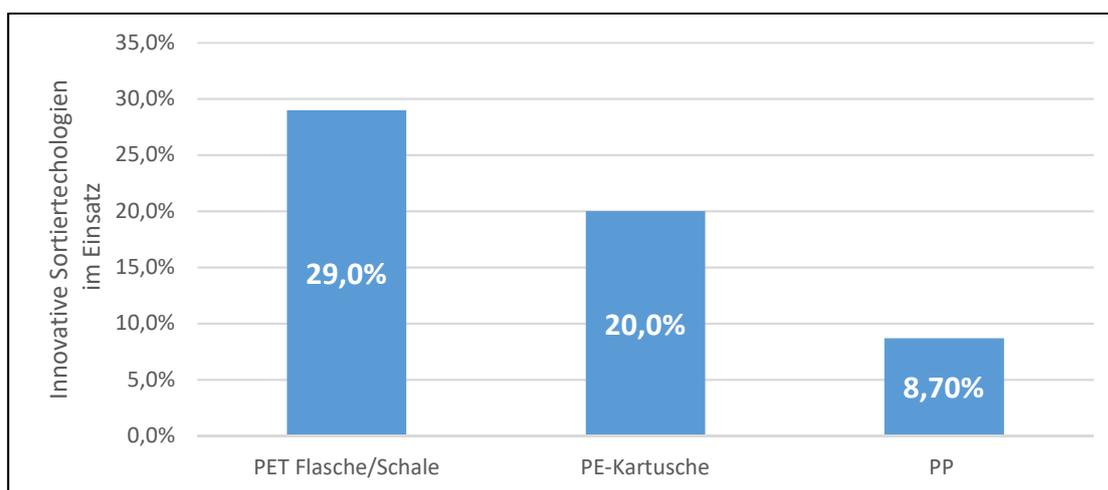


Abbildung 44 Sortierkapazität, die mit innovativer Sortiertechnik ausgerüstet ist

Ein Drittel der gesamten Kapazität hat die Objekterkennung im Einsatz. Die auf diese Art zusätzlich erzeugten Sortierfraktionen sind PET (29 %) PE (20 %) und PP (8,7 %).

4.6 Nachrüstungsoptionen

Im Folgenden werden die Ergebnisse der Befragung zur Nachrüstung mit den in Kapitel 3 beschriebenen innovativen Sortiertechnologien zusammengefasst. Es wurde sowohl das grundsätzliche Interesse der Betreibenden abgefragt als auch das Nachrüstungspotenzial in Bezug auf verschiedene Fraktionen erhoben.

4.6.1 Interesse zur Nachrüstung

Von den befragten Sortieranlagen haben acht Anlagen, beziehungsweise 39 % der Gesamtkapazität in Deutschland, grundsätzlich Interesse an einer Nachrüstung ihrer Sortieranlagen. Spezielle Angaben zu einzelnen Sortierfraktionen oder Techniken wurden nicht gemacht. Nur eine Sortieranlage (2 % der Gesamtkapazität) hat speziell an der Sortierung von PET-Flaschen und PET-Gemischen Interesse geäußert. 28 % der Gesamtkapazität brachten eine neutrale Einstellung gegenüber den innovativen Sortiertechnologien zum Ausdruck. 17 % der Gesamtkapazität sprechen sich gegen Nachrüstung aus, da kein ausreichender Lagerplatz für die Sortierprodukte existiert.

Für 13 % der Gesamtkapazität, haben die neuen Sortiertechnologien für das aktuelle Business-Model keine Relevanz (z. B. bei Firmen, mit eigener Recyclinganlage, welche MPO-Rezyklat produziert). Das letzte Drittel der Gesamtkapazität spricht sich gegen eine Nachrüstung aus. Das Meinungsbild der Anlagenbetreibenden ist in Abbildung 45 dargestellt.

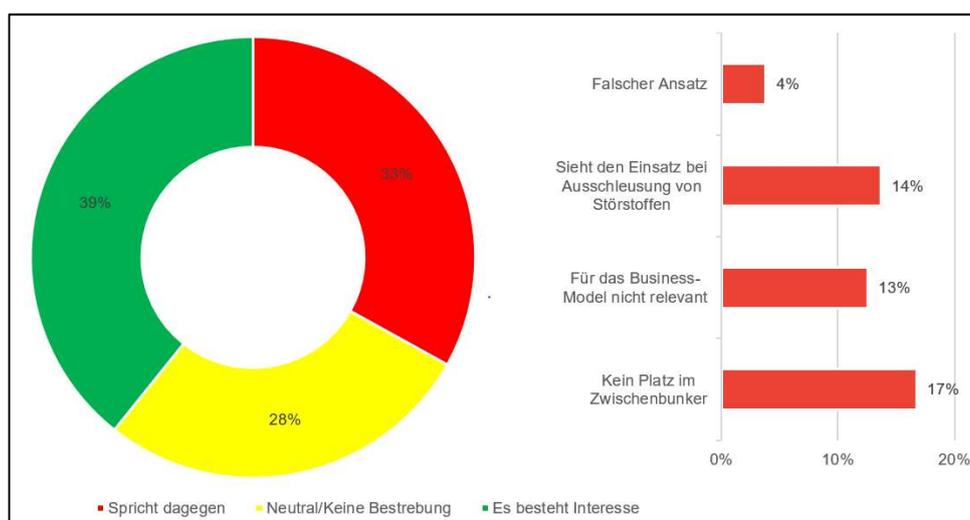


Abbildung 45 Meinungsbilder der Anlagenbetreiber*innen

Ein Unternehmen lehnte zwar die Teilnahme an der Umfrage ab, gab aber dennoch seine Stellungnahme zum Thema "Anwendung der innovativen Sortiertechnologien" ab, welches im Folgenden mit der Erlaubnis des Unternehmens, wie folgt zitiert wird:

„In diesem Fall erfolgt ein zusätzlicher Separationsschritt durch die NIR-Separatoren ohne eine vorherige Normierung (unterschiedliche Ansätze: auf Basis digitaler Wasserzeichen, fluoreszierender Marker, etc.) und, wesentlich bedeutsamer in diesem Kontext, ohne Berücksichtigung der nachgeschalteten werkstofflichen Verwertungsmöglichkeiten.

Diese Verfahrensansätze folgen nicht umfassend den Ansätzen der Circular Economy (CE), betrachtet sie doch leider nur einen kleinen Teil der CE. Dies ist nach unserem Verständnis als Sortier- und Kunststoffverwertungsbetrieb nicht ausreichend und deshalb auch nicht geeignet, um technologische Weiterentwicklungen im Sinne der CE zu beurteilen.“

4.6.2 Nachrüstungspotenzial verschiedener Sortierfraktionen

Aus den Ergebnissen der Umfrage lassen sich die folgenden Bedarfe und Ansätze zur Nachrüstung für die relevanten Kunststofffraktionen ableiten:

- Einführung bzw. Ausbau der PS-Fraktionssortierung
- Einführung der Sortierung von schwarzen Kunststoffverpackungen
- Innovative Sortierung von PET (Separation von PET-Flaschen und PET-Schalen)
- Innovative Sortierung von PE, Schwerpunkt auf der Eliminierung von Silikon-Kartuschen aus dem PE-Strom 329)
- Farbsortierung von PE und PP

Das erhobene Nachrüstungspotenzial ist zusammenfassend in Abbildung 46 dargestellt.

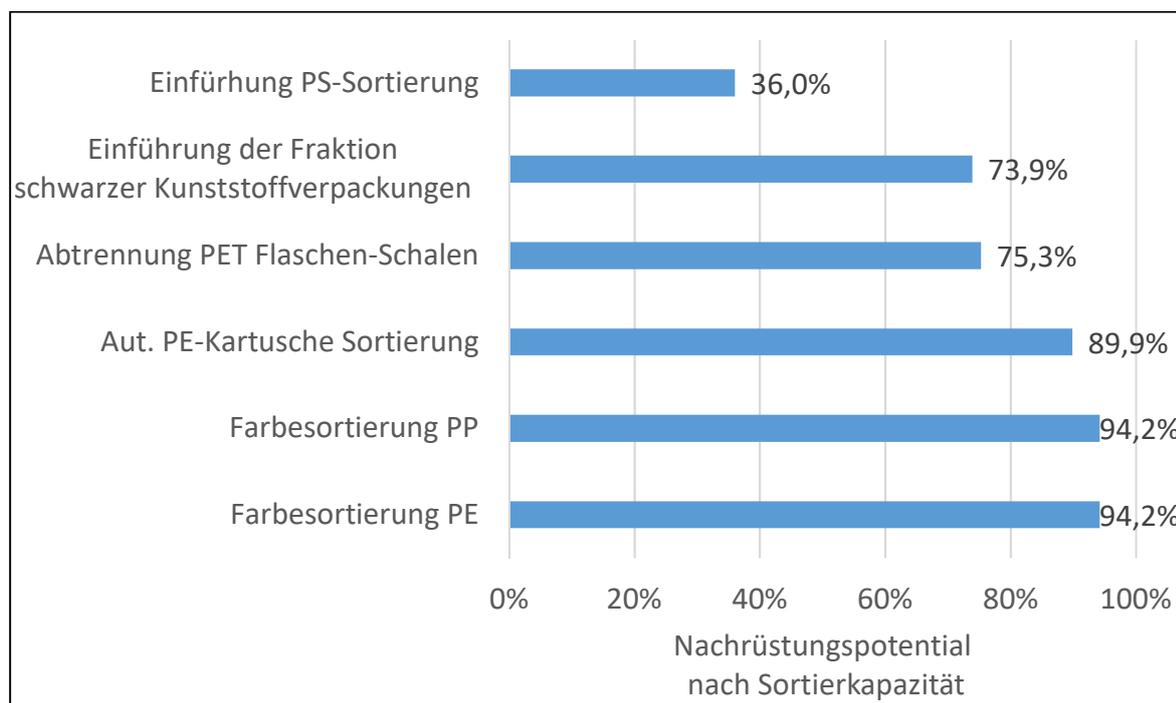


Abbildung 46 Potenzial der Nachrüstungsmaßnahmen nach Kapazität

Ein Drittel der Gesamtkapazität ist bisher nicht mit einer PS-Fraktionsortierung ausgestattet.

Die Sortierung von schwarzem Kunststoff wird als Potenzial bei zwei Drittel der Gesamtkapazität gesehen, jedoch nur unter der Bedingung, dass die Nachfrage nach schwarzem Kunststoff ausreichend vorhanden ist. Ansonsten wird die Nachrüstung als unwirtschaftlich angesehen.

Die innovative Sortierung von PET und PE wird von mehr als zwei Drittel der Anlagen als potenzielle Nachrüstung.

Nur eine Anlage mit 5,8 % der Gesamtkapazität ist mit der Farbsortierung für PE und PP ausgestattet, die bereits als ausgereifte Sortiertechnik auf dem Markt ist und sowohl auf Objekt- als auch auf Flake-Ebene eingesetzt wird.

4.6.3 Platzverfügbarkeit für Nachrüstung

Für eine zusätzliche Installation von innovativer Sortiertechnik ist die räumliche Ausstattung der LVP-Sortieranlagen ein wesentlicher Aspekt. Neben den zusätzlichen Aggregaten müssen Stellflächen für Förderbänder, Container oder Abwurfbereiche für Fraktionen und Lagerflächen für Ballen oder lose Ware vorgesehen werden. Im Fragebogen wurde daher auch die Fläche der Anlagenhalle ohne das Ein- und Auslagerungslager erfasst. Zusätzliche Betrachtungen erfolgten auf der Basis von Luftbildaufnahmen bzw. Google Earth. Mittels dieser Daten wurde

Vergleichsstudie Identifikationsverfahren – Forum Rezyklat

Flächenbedarfe für Kapazitäten/Sortierfraktionen berechnet und Optionen für eine Nachrüstung der Anlagen ermittelt.

Abbildung 47 zeigt den Bezug von Anlagenfläche und Kapazität. Die Sortieranlagen, welche sich oberhalb der Kurve befinden, können als Sortieranlagen mit ausreichend Platz für eine mögliche Aufrüstung angesehen werden; die Punkte unter der Kurve repräsentieren Anlagen, die aufgrund mangelnder Fläche nur eine begrenzte Aufrüstung zulassen. Es ist jedoch auch möglich, in einer Sortieranlage zusätzliche Maschinen in vertikaler Richtung zu installieren. Dies kann mit der angewandten Methode nicht erfasst werden.

Eine Übersicht der Anlagen mit Nachrüstungspotenzial in jeder KG ist in Tabelle 6 gegeben.

Tabelle 6 Eine Übersicht der Anlagen mit Platzverfügbarkeit zur Nachrüstung jeder KG

	Anzahl der Anlage	Anteil in der Gesamtkapazität (%)
KG 1, > 59.000 Mg/a	3	5 %
KG 2, 60.000 -99.000 Mg/a	4	14 %
KG 3, 100.000 -149.000 Mg/a	3	15 %
KG 4, > 150.000 Mg/a	1	10 %

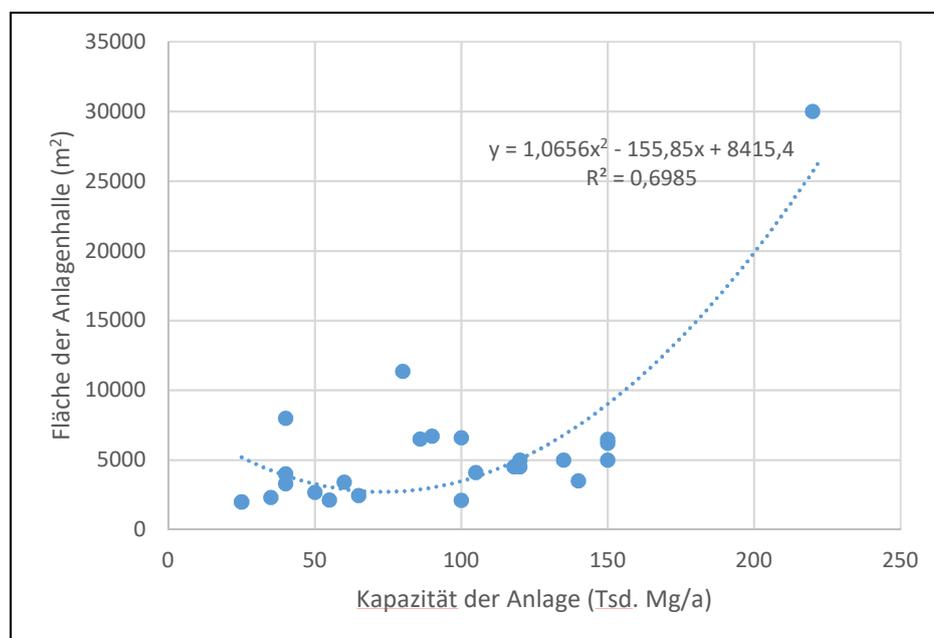


Abbildung 47 Korrelation zwischen der Fläche der LVP-Sortieranlage (Maschinenhalle) und der Kapazität

Die Abschätzung zeigt, dass vermutlich nur ein kleinerer Teil der Anlagen über ausreichend Platz für weitere Aggregate und Outputfraktionen verfügt. In mehr als zwei Drittel der Anlagen ist der verfügbare Raum ausgeschöpft und für weitere Techniken muss zusätzlicher Platz bzw. zusätzliche Hallenfläche geschaffen werden.

5 AP3: Konzept zur Identifikation relevanter Stoffströme und Gestaltung einer Versuchscharge für die Hauptstudie

Die Verpackungsindustrie ist der größte Verbraucher von Kunststoffen in Deutschland (Conversio GmbH 2020). Entsprechend kam es von 1991 (1,64 Mio. t) bis 2020 (3,21 Mio. t) fast zu einer Verdopplung der Kunststoffverpackungsabfälle, obwohl die einzelnen Kunststoffverpackungen in diesem Zeitraum im Durchschnitt um 25 % leichter wurden (Burger et al. 2021; Industrievereinigung Kunststoffverpackungen e.V. 2018; Conversio GmbH 2022). Dies liegt u.a. daran, dass über 50 % des Kunststoffabfallaufkommens auf kurzlebige Verpackungen zurückzuführen ist (Mellen und Becker 2018). Dementsprechend werden Kunststoffverpackungen in der Öffentlichkeit als eines der größten Umweltprobleme wahrgenommen (Dilkes-Hoffman et al. 2019). In Deutschland fordert das im Jahr 2019 in Kraft getretene Verpackungsgesetz (VerpackG) ab 2022 die Erreichung einer werkstofflichen Recyclingquote von 63 % auf die in Verkehr gebrachten Verpackungsmengen (Wissenschaftlichen Dienste des Deutschen Bundestages (WDDDB) 2018). Auf europäischer Ebene hat die EU im Jahr 2018 die "Europäische Strategie für Kunststoffe in einer Kreislaufwirtschaft" vorgestellt. Diese sieht vor, dass alle in der EU in Verkehr gebrachten Kunststoffverpackungen bis 2030 entweder wiederverwendbar oder kostengünstig recycelbar sein sollen (European Commission 2018). Weiterhin wird auf europäischer Ebene derzeit die neue Verpackungsverordnung "Packaging & Packaging Waste Regulation (PPWR)" erarbeitet, welche zum Jahresende 2023 verabschiedet werden soll (European Commission 2018). Mit diesen Ansätzen sollen u.a. den derzeit vorherrschenden linearen Fluss (offener Kreislauf) von Kunststoffen entlang der Wertschöpfungskette von der Produktion bis zur Verwendung und Entsorgung durchbrechen (Blomsma und Brennan 2017), da dies ein Ursprung für CO₂-Emissionen und Umweltverschmutzung ist (Johansen et al. 2022). Schätzungen zufolge gehen 95 % des Kunststoff-Materialwertes von Kunststoffverpackungen nach der ersten Gebrauchsphase verloren (Ellen MacArthur Foundation 2016). Dies ist darauf zurückzuführen, dass gemischte Kunststoffabfallströme durch mechanisches Recycling wiederaufbereitet werden, was zu einer Abnahme der Molekularmasse führt und somit die Zahl der möglichen Wiederaufbereitungsprozesse begrenzt (Roux und Varrone 2021). Recycelte Kunststoffe

können daher teils nur in minderwertigeren Anwendungen wieder eingesetzt werden (Ragaert et al. 2017a; Faraca und Astrup 2019). Eine derart intensive Nutzung endlicher Ressourcen für ein lineares Wirtschaftsmodell von Produktion, Verwendung und Entsorgung erweist sich als nicht nachhaltig (Ellen MacArthur Foundation 2017). Die Einführung einer verbesserten Kreislaufwirtschaft im Bereich der Kunststoffe wird dazu beitragen die Substitutionsquote von Kunststoffneumaterial in Produkten und Verpackungen zu erhöhen sowie Verbrennung in Deutschland zu reduzieren (Johansen et al. 2022). Bevor jedoch eine echte Kreislaufwirtschaft auf der Grundlage eines Gleichgewichts zwischen wirtschaftlichen, ökologischen und sozialen Auswirkungen erreicht werden kann (Sassanelli et al. 2021). Die Charakterisierung von Verpackungsabfällen spielt hierbei eine entscheidende Rolle, da diese den Schlüssel zur Wiederaufbereitung hochwertiger Endprodukte darstellt (Garcia und Robertson 2017). Derzeit führt der Mangel an Daten zu Herausforderungen bei der Wahl der am besten geeigneten Strategie zur Schließung von Material- und Produktkreisläufen (Acerbi et al. 2021). Dies wird besonders deutlich, seit die Digitalisierung Einzug in die Abfallwirtschaft gehalten hat und Wissen in Form von Daten über Art und Zusammensetzung der einzelnen LVP-Abfälle in den Fokus gerückt ist.

5.1 Literaturrecherche und -auswertung

Zur Erfassung des Wissensstandes bereits veröffentlichter Informationen bzgl. Verpackungseigenschaften von LVP-Abfällen wurde eine Literaturrecherche zum Anfall von LVP-Verpackungsabfällen innerhalb Deutschlands durchgeführt. Der Zeitraum wurde für die Jahre 2017 bis 2022 festgelegt. Die Ergebnisse sind in zusammengefasster Form in Tabelle 7 dargestellt. Insgesamt wurden acht relevante Quellen mit Informationen zu LVP-Verpackungsabfällen recherchiert. Die Literaturrecherche zeigt, dass im Bereich der LVP-Verpackungsabfälle sowohl eine geringe Datenmenge als auch -tiefe zur öffentlichen Verfügung stehen.

Vergleichsstudie Identifikationsverfahren – Forum Rezyklat

Tabelle 7 Ergebnisse der Literaturrecherche zu anfallenden LVP-Abfällen in Deutschland

Titel der Studie	Aufkommen und Verwertung von Verpackungsabfällen in Deutschland im Jahr 2020	Stoffstrombild der Kunststoff in Deutschland 2022	Abfallbilanz	Recyclingquoten 2020	Art und Verbleib der Etiketten von LVP-Flaschen	Recycling und Recyclingfähigkeit bei Verpackungen	Flaschen für die Forschung	Tiefencharakterisierung von Leichtverpackungen
Herausgeber	Umweltbundesamt	Conversio GmbH	Destatis	Zentrale Stelle Verpackungsregister	Duales System Deutschland	/	Hochschule Pforzheim	Hochschule Pforzheim
Erhebungsjahr	2020	2021	2020	2020	10.2019	12.2017	06.2018	2019
Quelle	Burger et al. 2022	Conversio GmbH 2022	Statistisches Bundesamt 2022	Zentrale Stelle Verpackungsregister 2021	Lang-Koetz et al. 2021; Schmidt et al. 2021	Christiani 2017; Christiani und Beckamp 2020	Woidasky et al. 2020a; Woidasky et al. 2020b	Schmidt et al. 2021; Schmidt et al. 2022; Woidasky et al. 2021
Erfassung von LVP nach (Gesamt-) Masse	Ja	Ja	Ja	Ja	Ja	Ja	Ja	Ja
Erfassung von LVP nach Anzahl	Nein	Nein	Nein	Nein	Nein	Nein	Ja	Ja
Erfassung der Verpackungs-Dimensionen	Nein	Nein	Nein	Nein	Nein	Nein	Nein	Ja
Erfassung von Packmittel-Arten (Flasche, Beutel...)	Nein	Nein	Nein	Nein	Nein	Ja	Ja	Ja
Erfassung von Packmittel-Werkstoff (PET, Aluminium...)	Nein	Nein	Nein	Nein	Nein	Ja	Ja	Ja
Lebensmittel- / Nicht Lebensmittel Zuordnung	Nein	Nein	Nein	Nein	Nein	Nein	Nein	Ja
Erfassung von Packmittelfarben (Transparent, Opak...)	Nein	Nein	Nein	Nein	Nein	Nein	Ja	Ja
Erfassung, ob Etikett vorhanden (z.B. Sleeve, Banderole)	Nein	Nein	Nein	Nein	Ja	Nein	Nein	Ja
Erfassung, ob Verschluss vorhanden (z.B. Schraubdeckel)	Nein	Nein	Nein	Nein	Nein	Nein	Nein	Ja

Vergleichsstudie Identifikationsverfahren – Forum Rezyklat

Der Umweltbundesamt-Bericht „Aufkommen und Verwertung von Verpackungsabfällen in Deutschland im Jahr 2020“ (Burger et al. 2022), beschränkt sich im Detailgrad trotz großer Datenbasis und umfangreicher Analysen von anfallenden Verpackungsabfällen in Deutschland auf die absoluten Gesamtmengen der Kategorien Kunststoffe, Glas, Aluminium, Weißblech, Papier und Verbundstoffe. Die verwendete Datengrundlage ist hierbei eine Kombination aus der Verpackungsproduktion der Bundesstatistik und Daten von Verbänden, der Entsorgungswirtschaft, der Umweltstatistik und detaillierten Einzelstudien. Hinsichtlich der Veränderung der Zusammensetzung (Serviceverpackungen, Funktionalisierung von Packstoffen, funktionelle Verschlüsse, usw.) von Verpackungen werden lediglich qualitative Aussagen auf Basis von Expertengesprächen gemacht. Es finden sich keine weitreichenderen Auswertungen wie Packstoffanteile, Verpackungsarten, Maße, Multilayer-Anteile usw. der entsorgten Verpackungen.

Der Umweltbundesamt-Bericht „Aufkommen und Verwertung von Verpackungsabfällen in Deutschland im Jahr 2020“ (Burger et al. 2022), beschränkt sich im Detailgrad trotz großer Datenbasis und umfangreicher Analysen von anfallenden Verpackungsabfällen in Deutschland auf die absoluten Gesamtmengen der Kategorien Kunststoffe, Glas, Aluminium, Weißblech, Papier und Verbundstoffe. Die verwendete Datengrundlage ist hierbei eine Kombination aus der Verpackungsproduktion der Bundesstatistik und Daten von Verbänden, der Entsorgungswirtschaft, der Umweltstatistik und detaillierten Einzelstudien. Hinsichtlich der Veränderung der Zusammensetzung (Serviceverpackungen, Funktionalisierung von Packstoffen, funktionelle Verschlüsse, usw.) von Verpackungen werden lediglich qualitative Aussagen auf Basis von Expertengesprächen gemacht. Es finden sich keine weitreichenderen Auswertungen wie Packstoffanteile, Verpackungsarten, Maße, Multilayer-Anteile usw. der entsorgten Verpackungen.

In der zweijährlich von Conversio durchgeführten Branchenanalyse „Stoffstrombild Kunststoffe in Deutschland 2021“ (Conversio GmbH 2022), die eine Erhöhung der Transparenz der Kunststoffherzeugung, -verarbeitung, und -verwertung zum Ziel hat, findet sich zum Themenfeld Kunststoffherzeugung und -verarbeitung eine detaillierte Aufschlüsselung der Produktionsmengen nach einzelnen Packstoffen und eine Zuordnung zu den Branchen Verpackung, Bau, Fahrzeuge, Elektronik und Sonstiges. Bei der Verwertung werden die Kunststoffe jedoch nicht mehr nach Packstoffen, sondern lediglich in Post-Consumer und Post-Industrial zusammengefasst dargestellt und in die energetische und stoffliche Verwertung unterteilt. Die verwendete Datengrundlage stammt aus Befragungen von Unternehmen und Branchenexperten.

Vergleichsstudie Identifikationsverfahren – Forum Rezyklat

Die Abfallbilanz „Abfallaufkommen/-verbleib, Abfallintensität, Abfallaufkommen nach Wirtschaftszweigen“ (Statistisches Bundesamt 2022) für das Jahr 2020 stellt das inländische Abfallaufkommen für Deutschland nach Abfallkategorien und Verwertungs- bzw. Beseitigungspfaden dar und weist Verwertungs- und Recyclingquoten auf Bundesebene aus. Der Kunststoffabfall-Anfall wird hierbei als Gesamtabfallaufkommen sowohl nach unterschiedlichen Branchen wie z.B. Baugewerbe oder Energieversorgung als auch als „gemischte Verpackungen / Wertstoffe“ aus der haushaltsnahen Sammlung dargestellt und entstammt von Daten aus Behandlungs- und Entsorgungsanlagen.

Die Zentrale Stelle Verpackungsregister (ZSVR) (Zentrale Stelle Verpackungsregister 2021) bezieht ihre Daten durch die Betreuung der Datenbanken von Verpackungsherstellern und der dualen Systeme. Im Webaufttritt der ZSVR finden sich jedoch lediglich Gesamtverwertungsmengen von LVP von privaten Endverbrauchern auf Bundesebene.

Im Rahmen des Bundesministerium für Bildung und Forschung-Forschungsprojekts „MaReK“ (Markerbasiertes Sortier- und Recyclingsystem für Kunststoffverpackungen) (Lang-Koetz et al. 2021; Schmidt et al. 2021) wurden Output-Untersuchungen zur Art und zum Verbleib von Etiketten der LVP-Flaschenfraktion durchgeführt. Hierzu wurde im Oktober 2019 an einer Sortieranlage für Post-Consumer LVP vier Stichproben von Flaschenartikel aus gepresster Ballenware mit einer Gesamtmasse von ca. 342 kg aus den Sortierprodukten PET, PP und HDPE entnommen und auf deren Etikettierung untersucht.

Christiani und Beckamp (2020) führen in ihrer Studie „Recycling und Recyclingfähigkeit bei Verpackungen“ eine Hochrechnung für die Bundesweite Sammelmenge auf Basis von 154 t charakterisierten LVP-Abfällen durch. Ziel der Studie ist es, die Recyclingfähigkeit von LVP-Abfällen zu bewerten und den gesetzlich geforderten Recyclingquoten des VerpackG gegenüberzustellen. Die Datenerfassung und Hochrechnung erfolgt in hoher Granularität, sodass die Autoren genaue Informationen über die Kunststofffraktionen, wie diese ebenfalls in LVP-Sortieranlagen anfallen, bereitstellen. Darüber hinaus stehen jedoch keine weiteren Informationen wie bspw. über Farben oder Füllgut-Typ zur Verfügung.

Die Abfallbilanz „Abfallaufkommen/-verbleib, Abfallintensität, Abfallaufkommen nach Wirtschaftszweigen“ (Statistisches Bundesamt 2022) für das Jahr 2020 stellt das inländische Abfallaufkommen für Deutschland nach Abfallkategorien und Verwertungs- bzw. Beseitigungspfaden dar und weist Verwertungs- und Recyclingquoten auf Bundesebene aus. Der Kunststoffabfall-Anfall wird hierbei als Gesamtabfallaufkommen sowohl nach unterschiedlichen Branchen wie z.B. Baugewerbe oder Energieversorgung als auch als

Vergleichsstudie Identifikationsverfahren – Forum Rezyklat

„gemischte Verpackungen / Wertstoffe“ aus der haushaltsnahen Sammlung dargestellt und entstammt von Daten aus Behandlungs- und Entsorgungsanlagen.

Die Zentrale Stelle Verpackungsregister (ZSVR) (Zentrale Stelle Verpackungsregister 2021) bezieht ihre Daten durch die Betreuung der Datenbanken von Verpackungsherstellern und der dualen Systeme. Im Webaufttritt der ZSVR finden sich jedoch lediglich Gesamtverwertungsmengen von LVP von privaten Endverbrauchern auf Bundesebene.

Im Rahmen des Bundesministerium für Bildung und Forschung-Forschungsprojekts „MaReK“ (Markerbasiertes Sortier- und Recyclingsystem für Kunststoffverpackungen) (Lang-Koetz et al. 2021; Schmidt et al. 2021) wurden Output-Untersuchungen zur Art und zum Verbleib von Etiketten der LVP-Flaschenfraktion durchgeführt. Hierzu wurde im Oktober 2019 an einer Sortieranlage für Post-Consumer LVP vier Stichproben von Flaschenartikel aus gepresster Ballenware mit einer Gesamtmasse von ca. 342 kg aus den Sortierprodukten PET, PP und HDPE entnommen und auf deren Etikettierung untersucht.

Im Juni 2018 wurde an der Hochschule Pforzheim die Vorstudie „Flaschen für die Forschung“ zur verwertungsorientierten Charakterisierung von Flaschen der LVP-Fraktion aus Endverbraucher-Haushalten durchgeführt (Woidasky et al. 2020a; Woidasky et al. 2020b). Insgesamt wurden 236 Flaschen gesammelt und auf deren Inhalt, den verwendeten Werkstoff sowie die Farbe und Transparenz untersucht. Die Untersuchung umfasst eine Masse von 9,8 kg, wovon 8,4 kg auf die Flaschen selbst und 1,4 kg auf die Flaschenverschlüsse entfallen.

Die Studie „Tiefencharakterisierung von Leichtverpackungen“ der Hochschule Pforzheim hatte das Ziel eine belastbare LVP-Datenbasis des Inputstroms zu gewinnen. Insgesamt sammelten deutschlandweit 216 Haushalte über zwei Wochen in einem Zeitraum von Juli bis August 2019 ihre LVP-Abfälle in einem zur Verfügung gestellten HDPE-Sack mit 80L Füllvolumen und sendeten diesen zur LVP-Charakterisierung an die Hochschule Pforzheim. Die gesammelten 27.394 Teile bzw. 207 kg an LVP-Abfällen wurden einer umfangreichen Tiefencharakterisierung unterzogen. Hierzu wurden neben den Massen und der Anzahl, Packmittel und dessen Werkstoffe, die Etiketten- und Verschlussvarianten, die Farben, Füllgut-Typen und die Lagerungsanforderungen, Verunreinigungsgrade sowie Größen der Verpackungen erfasst und alle Objekte zusätzlich fotografiert. Die Ergebnisse der Sortierstudie werden detailliert in Kapitel 5.2 dargestellt.

Gegenüberstellung der Studienergebnisse

Die Literaturrecherche beinhaltet drei Quellen mit expliziten Daten zur Kunststoffzusammensetzung von LVP aus Deutschland, die unterschiedlichen Phasen des

Vergleichsstudie Identifikationsverfahren – Forum Rezyklat

Produktlebenszyklus von LVP abbilden. Die Studie “Stoffstrombild der Kunststoffe in Deutschland 2021“ (Conversio GmbH 2022) bildet den Kunststoffverbrauch der kunststoffverarbeitenden Industrie ab und zeigt auf, wie viele Tonnen je Kunststoffart in den Markt eingebracht werden. Die Studie “Tiefencharakterisierung von Leichtverpackungen“ der Hochschule Pforzheim (Schmidt et al. 2021) erfasst den LVP-Verpackungsabfall in Privathaushalten und kann somit einen Hinweis auf Art und Zusammensetzung der Input-Massenströme von LVP-Sortieranlagen geben. Die dritte Studie “Recycling und Recyclingfähigkeit bei Verpackungen“ von Christiani und Beckamp (2020) bildet den Output einer Sortieranlage für LVP ab.

In der Verpackungsproduktion (Conversio GmbH 2022) in Deutschland wurden im Jahr 2021 mit über 90 % die Hauptpolymere LDPE (30,1 %), PP (21,7 %), HDPE (21,3 %), PET (16,2 %) und PS mit (2,3 %) eingesetzt. Folglich bilden diese Materialien den maßgeblichen Anteil am Input (69,6 %) (Schmidt et al. 2021) und Output (65,4 %) (Christiani und Beckamp 2020) der Wertstoffsartieranlagen. Der Vergleich der Sortieranlagen-Input- und Output-Studien zeigt eine gute Übereinstimmung mit nur geringen Massenanteilsdifferenzen (< 4 %) für die Fraktionen PET (3,6 %), HDPE (2,7 %), PS (2,2 %), Weißblech (2,0 %), Papier/Pappe (1,3 %), Aluminium (1,1 %) und Aluminium-Verpackungen und -Verbundstoffe einschließlich stoffgleicher Verpackungen (0,5 %). Größere Unterschiede (> 4 %) sind bei FKN (12,1 %), anderen Kunststoffen (10,6 %), PP (7,4 %), anderen Polyolefinen (4,8 %) und LDPE (4,1 %) zu beobachten. Darüber hinaus ist zu beachten, dass die Sortierstudie der Hochschule Pforzheim lediglich entsorgte LVP-der Studienteilnehmer beinhalten. Etwaige Verpackungen, die in die Pfandroute abgeflossen sind, sind nicht enthalten.

Darüber hinaus ist zu beachten, dass durch die Ausdehnung der Bepfandung auf Einweg-Getränkeflaschen aus Kunststoff und Getränkedosen aus jeglichem Material (Weißblech und Aluminium) ab dem Jahr 2022 und ab 2024 auf Milch- und Milcherzeugnisse dazu führt, dass diese nicht mehr im LVP-Sammelgemisch enthalten sind. Eine Prognose, welche Mengen ab 2022 und 2024 aus dem LVP-Sammelgemisch in die Pfandroute abfließen, gibt Abbildung 48. Hieraus kann entnommen werden, dass ab 2022 107.000 Mg und ab 2024 39.000 Mg in die Pfandroute abfließen. Dies entspricht einem Rückgang der gesamten LVP-Sammelmenge von ca. 4,6 Gew.-%.

Vergleichsstudie Identifikationsverfahren – Forum Rezyklat

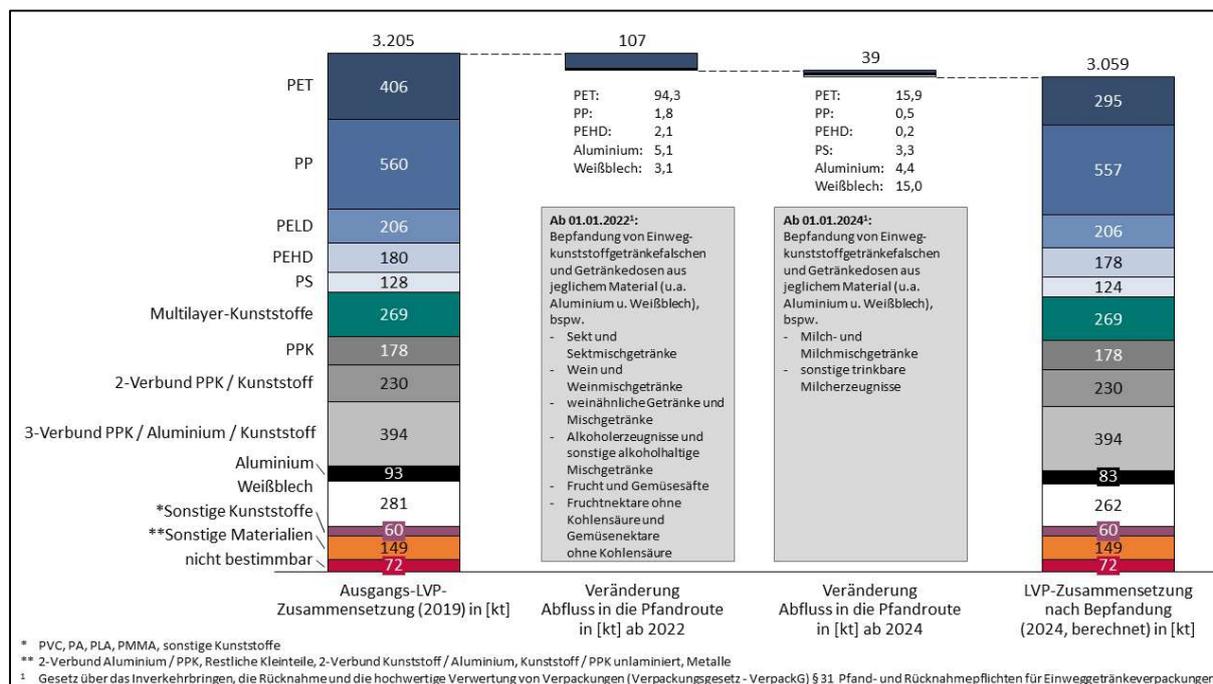


Abbildung 48 Auswirkungen Verpackungs-Stoffstrom unter besonderer Berücksichtigung kreislaufwirtschaftlicher Aspekte (Woidasky et al. 2023)

Die prozentualen Masseanteile der Kunststofffraktionen für die Verpackungsproduktion und den Sortieranlageninput bzw. -output, sind in Tabelle 8 dargestellt. Die Unterschiede zwischen den Masseanteilen in diesen Studien sind auf zwei Ursachen zurückzuführen. Zum einen liegt der Forschungsschwerpunkt der Studie "Tiefencharakterisierung von Leichtverpackungen" auf LVP aus Haushalten, sodass andere Verpackungsbereiche, wie z. B. Industrieverpackungen, vernachlässigt werden, zum anderen gelangen nicht alle produzierten Verpackungen in die Sortierung, bzw. nur mit erheblicher zeitlicher Verzögerung. Bei der Sortierung ist die Identifizierung der Polymere selbst unter Forschungsbedingungen eine Herausforderung, wie die Ergebnisse der Sortieranlagenoutputs in Tabelle 8 zeigen. Hier machen Mischfraktionen wie "andere Kunststoffe", "andere Polyolefine" oder nicht identifizierbare Fraktionen zusammen ca. 41 % der Gesamtmasse aus. In der Studie "Tiefencharakterisierung von Leichtverpackungen" (Sortieranlagen-Input) betrug der nicht identifizierbare Anteil lediglich 3,9 %.

Tabelle 8 Informationen über den Materialfluss und die Materialverteilung für Leichtverpackungen in Deutschland (Schmidt et al. 2021)

Material	Verpackungsproduktion: "Stoffstrombild der Kunststoffe in Deutschland 2021" (4.378 kt) (Conversio GmbH 2022)	Sortieranlagen-Input: "Tiefencharakterisierung von Leichtver- packungen" (2019, 207 kg) (Schmidt et al. 2021)	Sortieranlagen Output: "Recycling und Recyclingfähigkeit bei Verpackungen (2017, 154 t) (Christiani und Beckamp 2020)
	Masseanteil [%]	Masseanteil [%]	Masseanteil [%]
Nicht identifizierbar/Rest	-	3,9	25,8
PP	21,7	17,4	10,0
PPK und Verbunde	-	6,6	5,3
FKN	-	18,1	6,0
PET	16,2	12,4	8,8
Weißblech	-	8,5	10,5
Multilayer (Polymer)	-	12,5	-
HDPE	21,3	4,9	2,2
LDPE	30,1	6,9	11,0
PS	2,3	3,8	1,5
Aluminium	-	2,5	1,5
Aluminiumverpackung und Verbund	-	1,7	2,1
PA	0,8	0,2	-
PVC	4,6	0,5	-
Andere Kunststoffe	3,0	0,0	10,6
Andere Polyolefine	-	-	4,8
Total	100,0	100,0	100,0

5.2 LVP-Daten-Auswertung

Im Rahmen der Tiefencharakterisierung von LVP aus der Haushaltssammlung wurden insgesamt 27.394 Einzelteile mit einer Gesamtmasse von etwa 207 kg untersucht. Die Auswertung der Ergebnisse findet sowohl anzahl- als auch massenbezogen statt. Für die Ermittlung der Packstoffe wurde der Recyclingcode, falls auf der Verpackung vorhanden herangezogen. Weiter wurden mittels Infrarot-Spektrometer die Verpackungsinnen und -außenseite untersucht, was die Ermittlung von Multilayer-Verpackungen ermöglichte (Schmidt et al. 2022; Woidasky et al. 2023).

Bei den verwendeten Packstoff-Werkstoffen (Woidasky et al. 2021) wurden nach Masse die Polymere PP (17 %) und PET (12 %) am häufigsten eingesetzt. Des Weiteren werden die Verbundwerkstoffe Polymere-Multilayer (12 %) und 3-Verbund PPK / Aluminium / Kunststoff (11 %) häufig für LVP verwendet. In der anzahlbezogenen Auswertung sind etwa 25 % aller Verpackungen aus PP, 18 % Polymere-Multilayer und 9 % aus PET. Der Verbundstoff 3-Verbund PPK / Aluminium / Kunststoff macht anzahlbezogen lediglich 3 % aller Verpackungen aus.

Vergleichsstudie Identifikationsverfahren – Forum Rezyklat

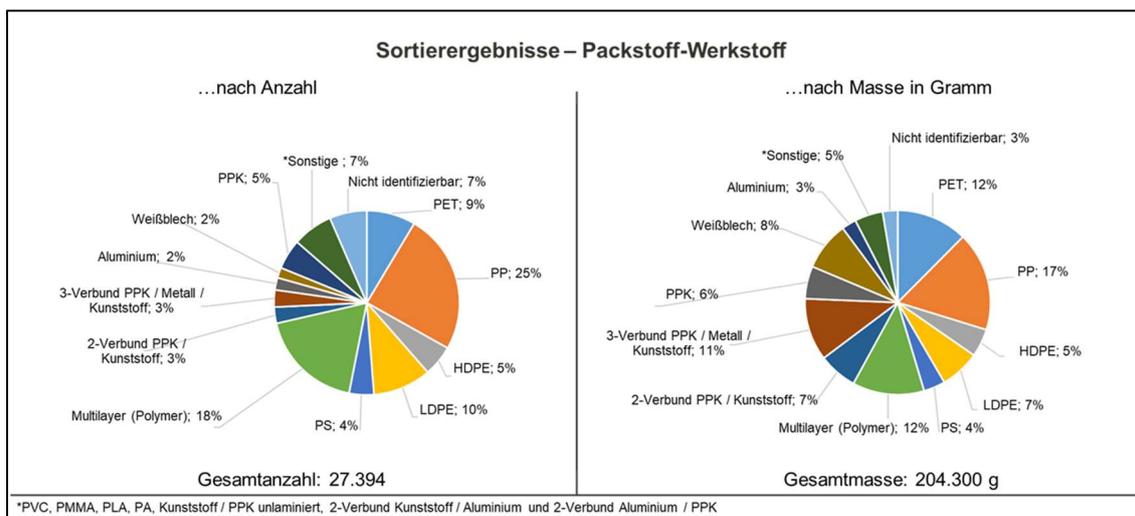


Abbildung 49 Sortierergebnisse für Packstoff-Werkstoff (Schmidt et al. 2021)

Die Auswertung der Packmittel (Abbildung 50) zeigt, dass FKN (18 %), Beutel (16 %) und Schalen (14 %) die massereichsten Verpackungsarten darstellen, wohingegen die Verteilung nach Anzahl ein anderes Bild zeigt. Hierbei haben Beutel (34 %) deutlich vor Folien (12 %) und Schalen (10 %) den größten Anteil. Die massereichste Fraktion der FKN-Verpackungen kommt beispielsweise lediglich auf einen anzahlbezogenen Anteil von 5 %.

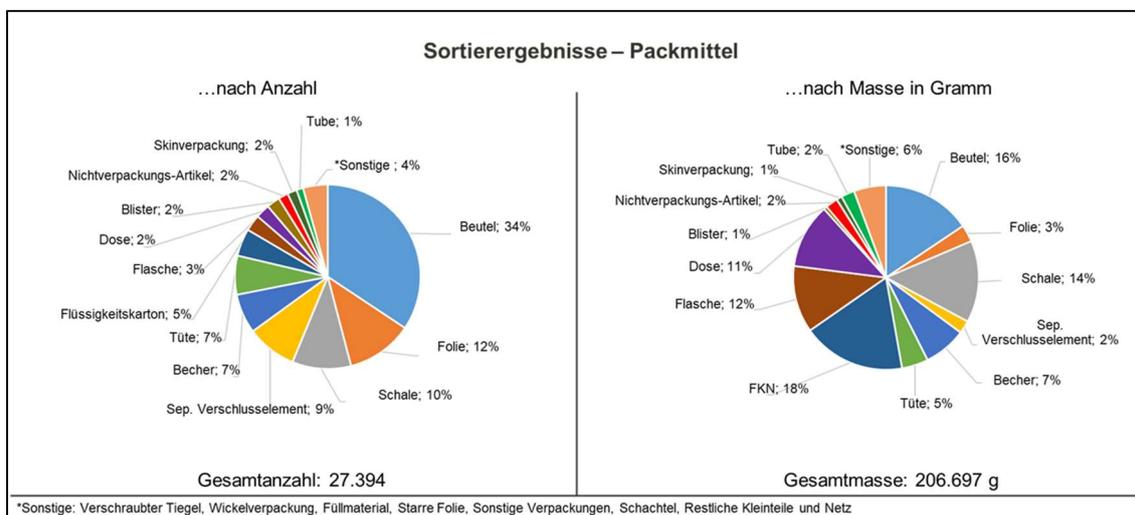


Abbildung 50 Sortierergebnisse für Packmittel (Woidasky et al. 2021)

Sowohl nach Masse als auch nach Anzahl werden der Großteil der Verpackungen für Lebensmittel-Einsatz (71 % / 68 %) verwendet (Abbildung 51). Der kleinere Anteil wird in Nicht-Lebensmittel-Verpackungen (29 % / 32 %) eingesetzt.

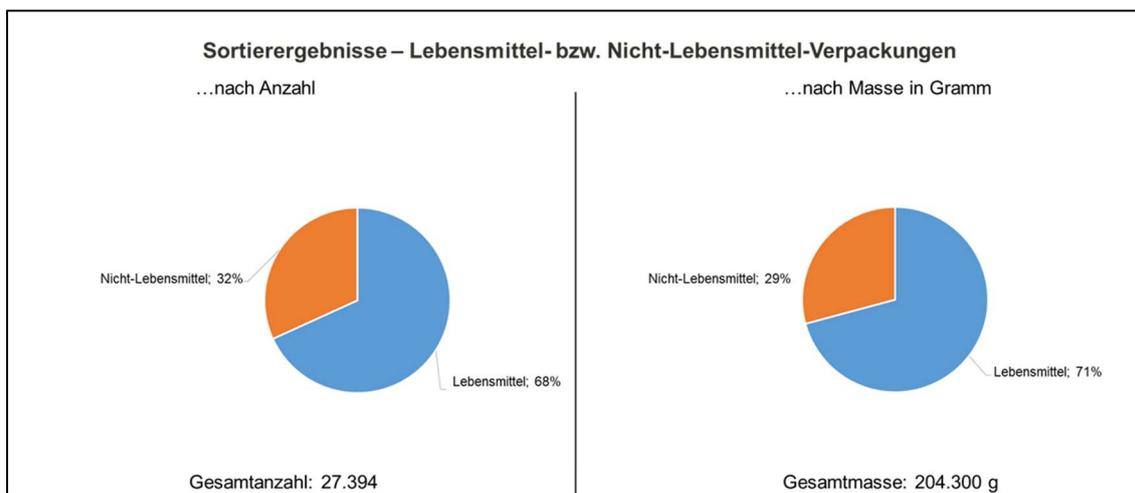


Abbildung 51 Sortierergebnisse für Lebensmittel- bzw. Nicht-Lebensmittel-Füllgüter (Woidasky et al. 2021)

Überwiegend wurden die Packstoff-Farben (Abbildung 52) transparent-weiß (33 %) und opak-bunt (38 %) für Verpackungen eingesetzt, lediglich 2 % der Verpackungen sind schwarz oder tiefdunkel. Eine Aufschlüsselung nach Anzahl zeigt, dass auch hier überwiegend transparent-weiße (44 %) und opak-bunte (28 %) Verpackungen eingesetzt werden. Schwarze und tiefdunkle Verpackungen besitzen lediglich einen anzahlbezogenen Anteil von 1 %.

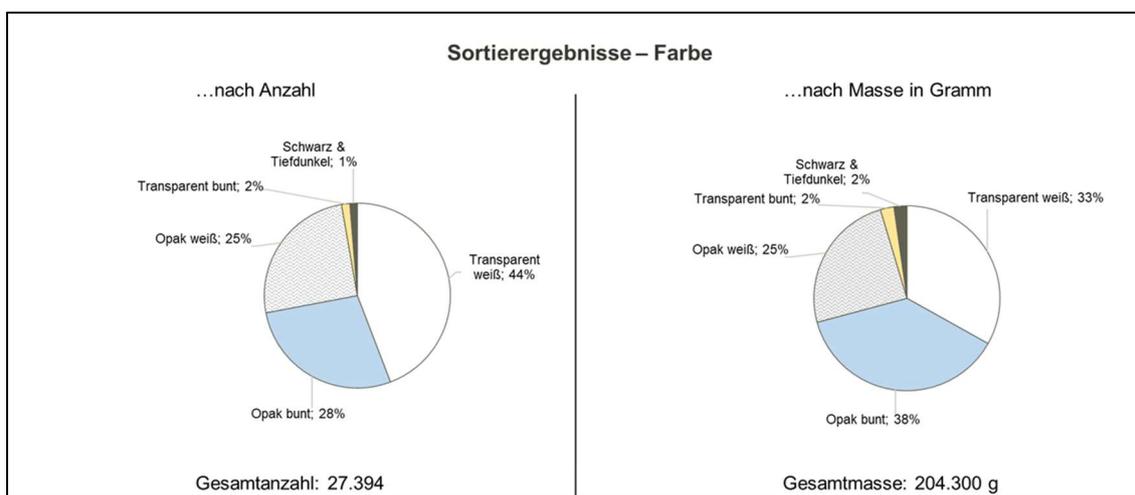


Abbildung 52 Sortierergebnisse für Packstoff-Farbe (Schmidt et al. 2021)

Bei der Untersuchung der Größe bzw. der Fläche (Abbildung 53) der Verpackung zeigt sich sowohl nach Masse als auch nach Anzahl, dass 88 % bzw. 86 % der Verpackungen kleiner als ein DIN-A4, aber größer als 50 x 50 mm (Siebschnitt) sind. Die zweitgrößte Fraktion nach Masse (8 %) und Anzahl (8 %) sind größer als ein DIN-A4 und kleiner als DIN-A3.

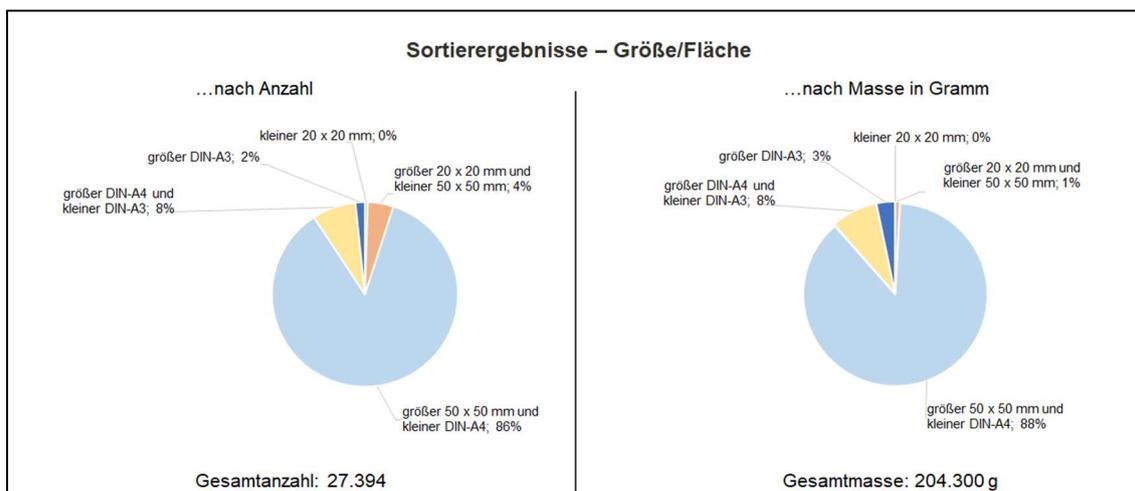


Abbildung 53 Sortierergebnisse für Größe/Fläche der Verpackungen inkl. Zusatzerhebung der Fraktion 20 - 50 mm (Lang-Koetz et al. 2021)

Die Auswertung nach dem Vorhandensein von Etiketten und Bedruckungen (Abbildung 54) zeigt, dass über die Hälfte aller Verpackungen eine Direktbedruckung (Masse: 53 %, Anzahl: 55 %) und mehr als ein Viertel ein physisches Etikett (incl. Sleeve und Banderole, Masse: 36 %, Anzahl: 25 %) aufweisen. Kein Etikett bzw. keine Bedruckung ist bei 11 % (nach Masse, 20 % nach Anzahl) vorgesehen oder nicht mehr vorhanden.

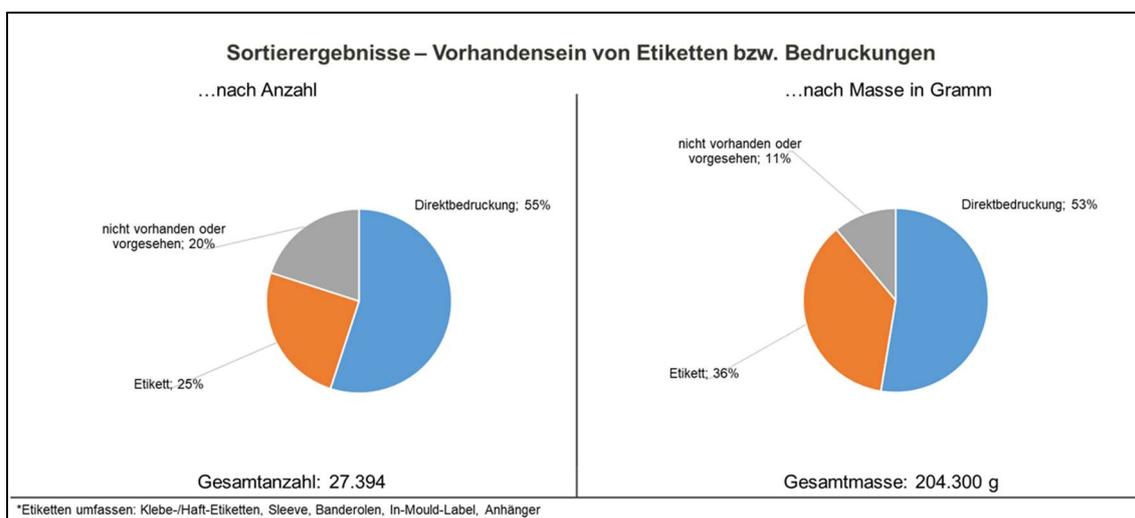


Abbildung 54 Vorhandensein für das Vorhandensein von Etiketten bzw. Bedruckung (Schmidt et al. 2021)

Die Untersuchung nach dem Vorhandensein von Verschlüssen (Abbildung 55) zeigt, dass die Verpackungen zu 61 % nach Masse mit einem Verschluss ausgestattet sind, wohingegen die anzahlbezogene Auswertung hier nur zu einem Anteil von 34 % führt. Dies führt respektive zu einem massebezogenen Anteil von 39 % und einem anzahlbezogenen Anteil von 66 % für Verpackungen ohne Verschluss.

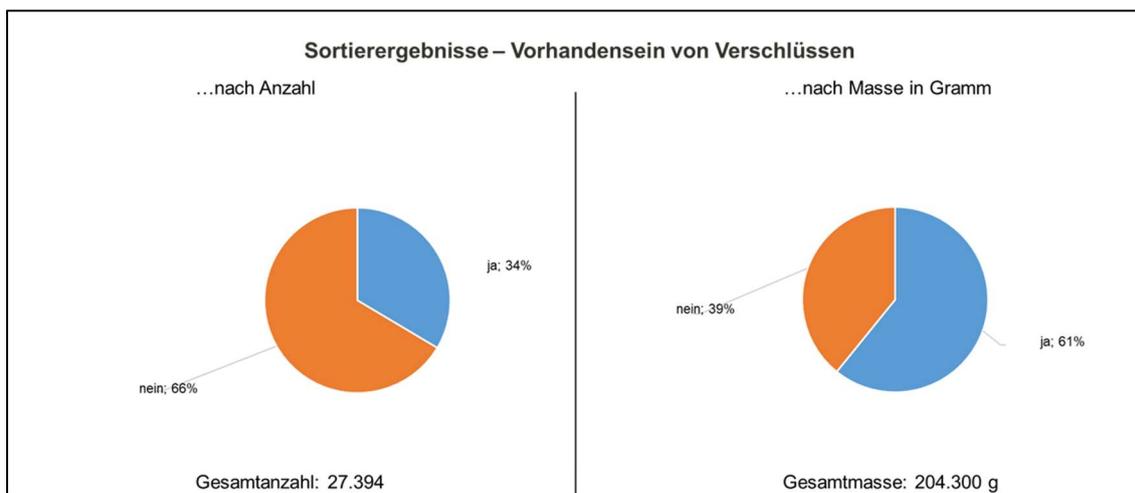


Abbildung 55 Sortierergebnisse für das Vorhandensein von Verschlüssen (Darstellung Hochschule Pforzheim) (Woidasky et al. 2021)

Neben der Auswertung der einzelnen Verpackungseigenschaften führt die Kombination dieser, dargestellt in den Abbildung 56 bis Abbildung 61, zu einem weiteren Informationsgewinn. Insbesondere die Zuordnung der Packstoff-Werkstoffe zu den weiteren Verpackungseigenschaften ermöglichen ein tieferes Verständnis des LVP-Abfallstroms. Abbildung 56 bis Abbildung 61 geben einen Überblick darüber, welche Verpackungseigenschaften für den jeweiligen Packstoff-Werkstoff charakteristisch sind. So wird beispielsweise der Verbundstoff „3-Verbund PPK / Aluminium / Kunststoff“ ausschließlich für Lebensmittel-Verpackungen eingesetzt, wohingegen HDPE überwiegend für Nicht-Lebensmittel-Verpackungen verwendet wird.

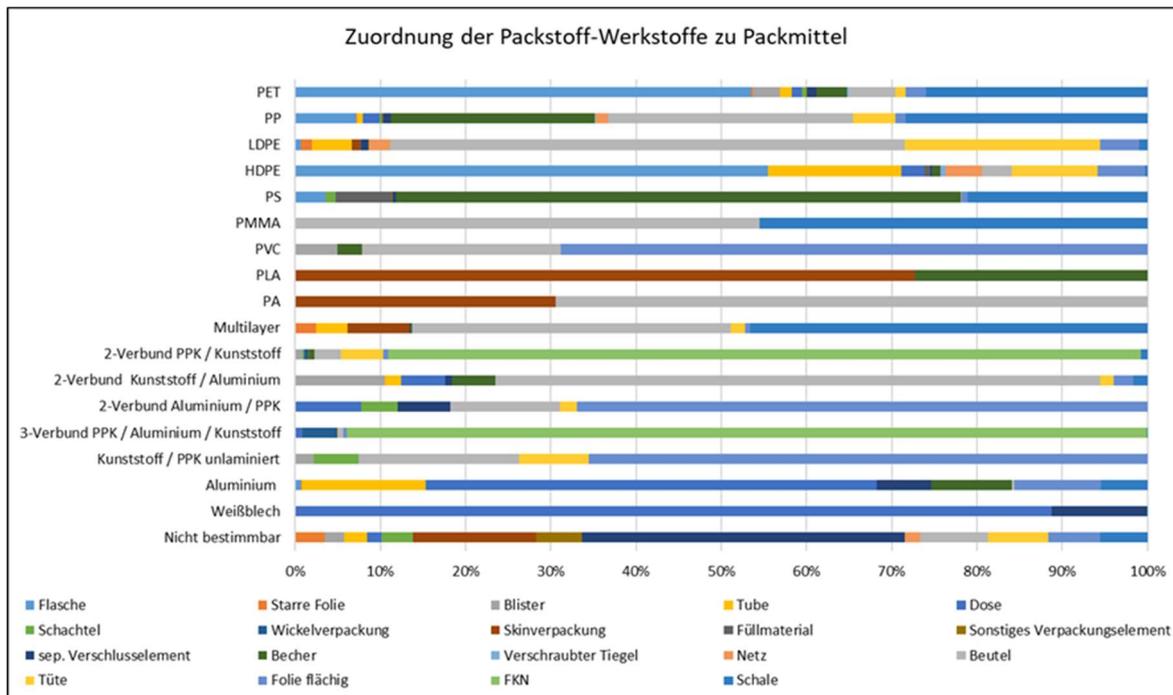


Abbildung 56 Zuordnung der Packstoff-Werkstoffe zu Packmittel (basierend auf: Schmidt et al. 2021; Woidasky et al. 2021)

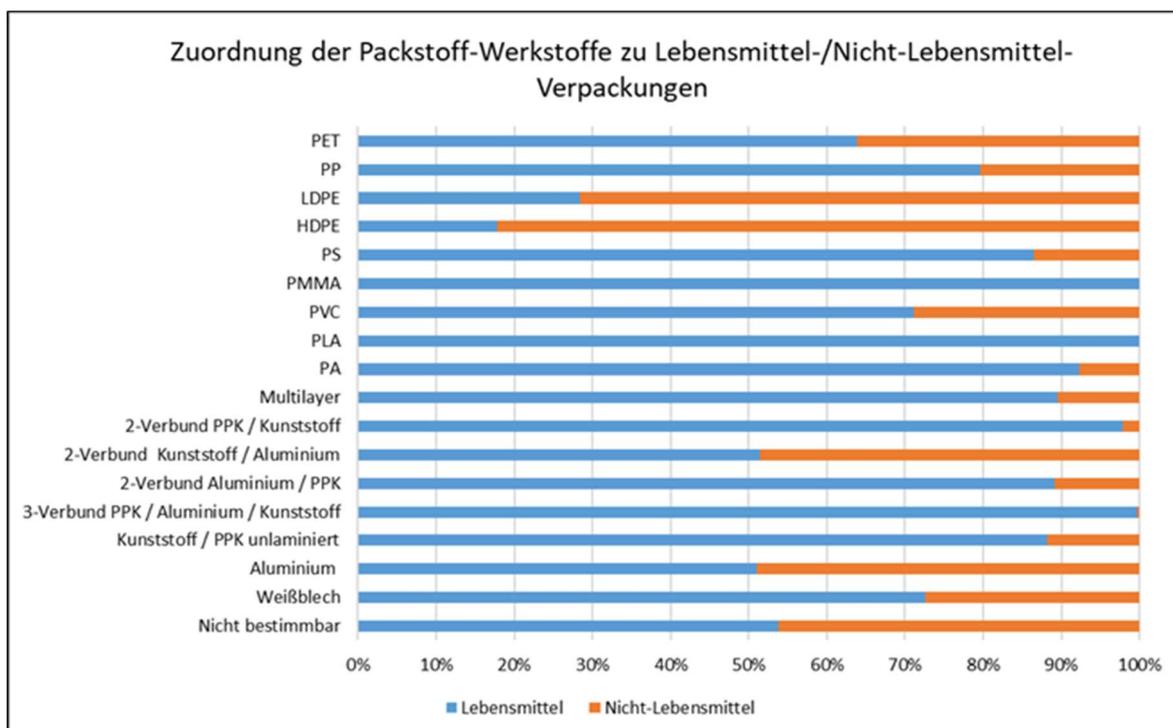


Abbildung 57 Zuordnung der Packstoff-Werkstoffe zu Lebensmittel-/Nicht-Lebensmittel-Füllgütern (basierend auf: Schmidt et al. 2021; Woidasky et al. 2021)

Vergleichsstudie Identifikationsverfahren – Forum Rezyklat

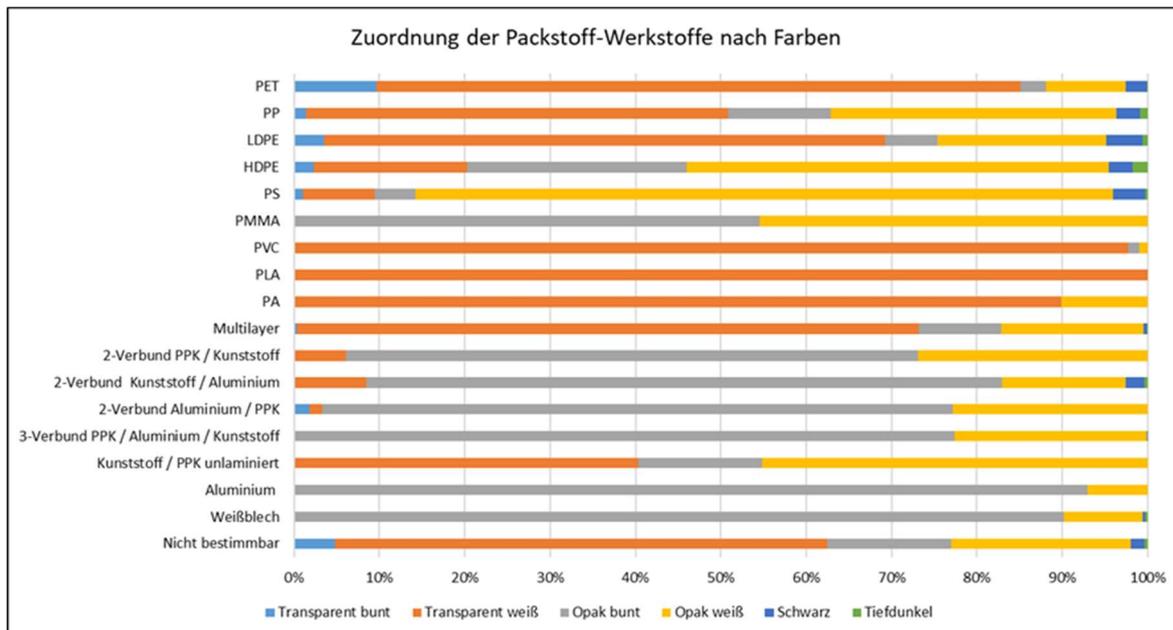


Abbildung 58 Zuordnung der Packstoff-Werkstoffe zu Farbe (basierend auf: Schmidt et al. 2021)

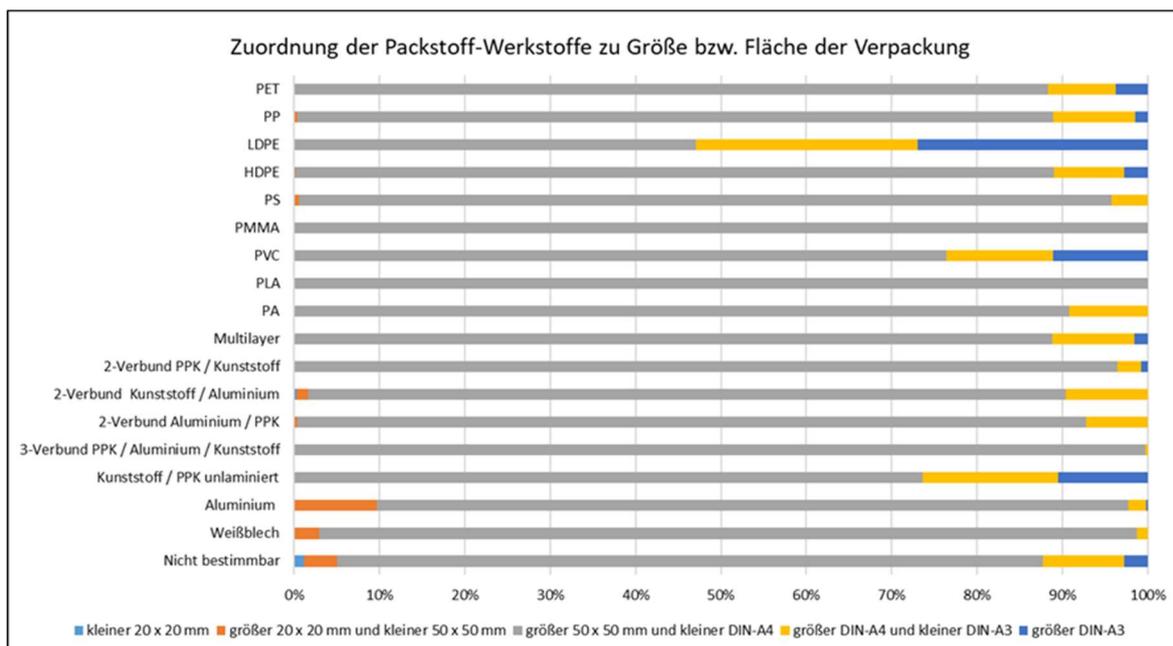


Abbildung 59 Zuordnung der Packstoff-Werkstoffe zu Größe bzw. Fläche der Verpackung (basierend auf: Schmidt et al. 2021; Lang-Koetz et al. 2021)

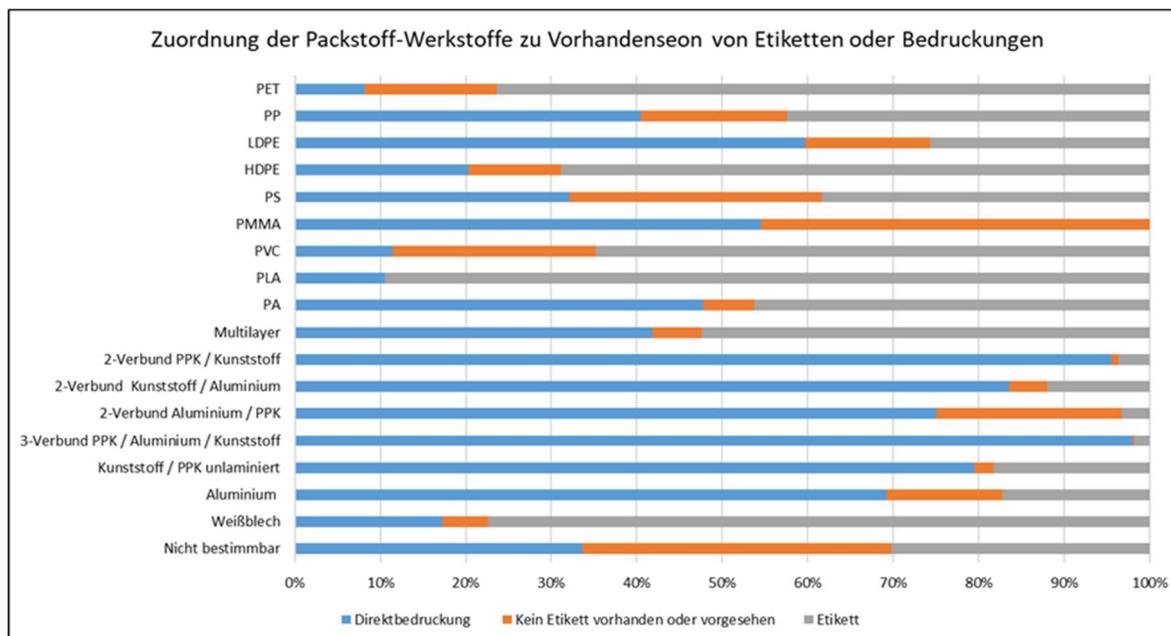


Abbildung 60 Zuordnung der Packstoff-Werkstoffe zu Vorhandensein von Etiketten oder Bedruckungen (basierend auf: Schmidt et al. 2021)

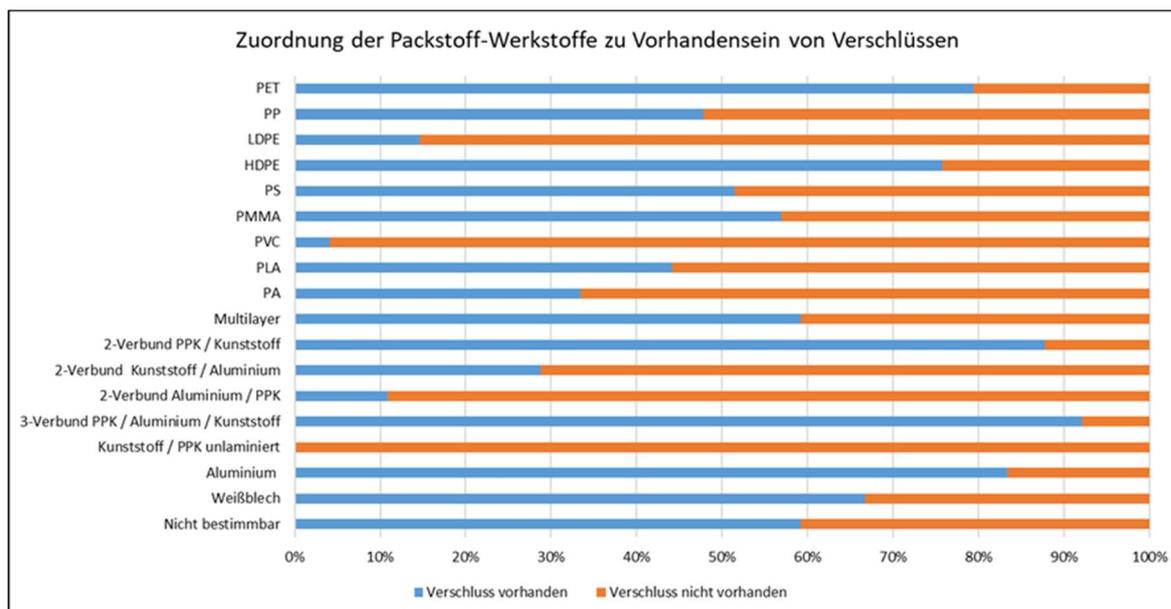


Abbildung 61 Zuordnung von Packstoff-Werkstoff zu Vorhandensein von Verschlüssen (basierend auf: Schmidt et al. 2021)

5.3 Erarbeitung einer Versuchscharge

5.3.1 Repräsentative Versuchscharge

Das Ziel dieses Arbeitspaketes ist die Zusammenstellung einer Versuchscharge für Versuchs- und Modellierungszwecke basierend auf der Tiefencharakterisierung von LVP der Hochschule Pforzheim (Schmidt et al. 2021), welche bereits im AP 3.2 vorgestellt wurde. Insgesamt werden sieben inhärente Verpackungsattribute bestehend aus Packmittel, Werkstoff, Farbe,

Vergleichsstudie Identifikationsverfahren – Forum Rezyklat

Vorhandensein von Etiketten / Bedruckungen, Lebensmittel -/ Nicht Lebensmittel-Füllgüter, Maße und Vorhandensein von Verschlüssen zur Auswahl und Beschreibung der Versuchscharge herangezogen. Die Auswertung erfolgt massebasiert.

Werden alle dargestellten Verpackungsattribute zur Abbildung des gesamten Datensatzes herangezogen, so ergeben sich insgesamt 1.502 mögliche Kombinationen an LVP. Um die Anzahl an möglichen Kombinationen von Verpackungsattributen zu reduzieren, wird eine ABC-Analyse angewendet. Als Klassengrenzen werden 60 % für die A-Kategorie, 30 % für die B-Kategorie und 10 % für die C-Kategorie festgelegt. Die Massereichsten 60 % des vorliegenden Datensatzes werden demnach der A-Kategorie zugeordnet. Eine ABC-Analyse der sieben Verpackungsattribute nach Masse ist in Tabelle 9 dargestellt. In Tabelle 9 sind ebenfalls Fehlwürfe wie Nichtverpackungs-Artikel oder Verpackungen aus PPK aufgeführt, welche in der weitergehenden ABC-Analyse nicht berücksichtigt werden. Die durchgeführte ABC-Analyse basiert somit auf einer Datengrundlage von 186.269 g bzw. 19.392 Einzelobjekten.

Für die Zusammenstellung der Versuchscharge kann die ABC-Analyse auf verschiedenen Arten angewendet werden. Diese werden nachfolgend kurz beschrieben:

Vorgehen 1 – A-Analyse

Es werden lediglich die Attributausprägungen (z.B. HDPE, PET, PS) eines Verpackungsattributes (z.B. Packstoff, Packmittel, Farbe) für die Erstellung der Versuchscharge ausgewählt, welche der Kategorie A zugeordnet werden (siehe Tabelle 9, Zeile „A (60 %)“. Eine Kombination aller Verpackungsattribute führt zu 81 möglichen Verpackungs-Kombinationen, die 25,5 Masse-% der Masse des gesamten Wissenschaftssackes abdecken (53.075 g, 4398 Objekte, Datengrundlage für die Auswertung: 186.269 g).

Vorgehen 2 – AB-Analyse

Die AB-Analyse ist eine Erweiterung der A-Analyse um die B-Kategorie. Die Erweiterung um die Attributausprägungen der B-Kategorie führt zu insgesamt 462 Verpackungs-Kombinationen. Diese bilden 71,3 Masse-% des Wissenschaftssackes ab (132.838 g, 10.578 Objekte, Datengrundlage für die Auswertung: 186.269 g).

Vorgehen 3 – ABC-Analyse

Eine Verwendung aller Daten führt zu 1502 Kombination (100 Masse-% des Wissenschaftssacks). Eine anschließende ABC-Analyse von allen 1502 Kombination ordnet der Kategorie A – 51 Kombinationen, der Kategorie B – 306, und der Kategorie C – 1145 Kombinationen, zu. Diese 51 Kombinationen der A-Kategorie decken 59,9 Masse-% des Wissenschaftssackes ab (111.468 g, 7530 Objekte, Datengrundlage für die Auswertung: 186.269 g).

Es wird empfohlen, die repräsentative Probencharge nach dem Vorgehen 3 – ABC-Analyse durchzuführen, da hier mit 51 verschiedenen Verpackungstypen bereits 60 Masse-% der zugrundeliegenden LVP-Sortierstudie abgebildet werden können. Die Zusammensetzung einer solchen Versuchscharge wird in Tabelle 10 dargestellt.

Vergleichsstudie Identifikationsverfahren – Forum Rezyklat

Tabelle 9 ABC-Analyse der sieben Verpackungsattribute, Fehlwürfe sind durchgestrichen dargestellt. (Schmidt et al. 2021; Lang-Koetz et al. 2021; Woidasky et al. 2021)

	Packstoff-Werkstoff	Lebensmittel- / Nicht- Lebensmittel-Füllgüter	Packmittel	Farbe	Größe/Fläche	Vorhandensein von Etiketten/ Bedruckungen	Vorhandensein von Verschlüssen
A (60 %)	PP (17 %) PET (12 %) 3-Verbund PPK / Aluminium / Kunststoff (11 %) Multilayer (12 %) Weißblech (8 %)	Lebensmittel (71 %)	FKN (18 %) Beutel (16 %) Schale, Tray (14 %) Flasche (12 %)	Opak bunt (38 %) Transparent weiß (33 %)	<A4 (210 x 297 mm; für Direktbedruckung flächige Folien) (89 %)	(50 %) Etikett (38 %)	Verschluss vorhanden (61 %)
B (30 %)	2-Verbund PPK / Kunststoff (7 %) LDPE (7 %) HDPE (5 %) PS (4 %)	Nicht-Lebensmittel (29 %)	Dose (11 %) Becher (7 %) Tüte (5 %) Folie flächig (3 %)	Opak weiß (25 %)	<A3(297 x 420 mm; für flächige Folien) (7 %)	Nicht vorhanden oder vorgesehen (12 %)	Verschluss nicht vorhanden (39 %)
C (10 %)	Aluminium (3 %) Nicht identifizierbar (3 %) 2-Verbund Kunststoff / Aluminium (< 1 %) 2-Verbund Aluminium / PPK (< 1 %) PVC (< 1 %) Kunststoff / PPK unlaminiert (< 1 %) PA (< 1 %) PLA (< 1 %) PMMA (< 1 %)		Tube (2 %) Sep. Verschlusselement (2 %) Skinverpackung (1 %) Blister (1 %) Netz (< 1 %) Wickelverpackung (< 1 %) Starre Folie (< 1 %) Füllmaterial (< 1 %) Schachtel (< 1 %) Sonstige Verpackungselemente (< 1 %) Verschraubter Tiegel (< 1 %)		>A3 (3 %) <= 50x50 mm (1 %) <= 20x20 mm (Siebschnitt Eingangstrommelsieb) (< 1 %)		

Vergleichsstudie Identifikationsverfahren – Forum Rezyklat

Tabelle 10 Beispielhafte Versuchscharge für eine repräsentative Probenauswahl

Nr.	Packmittel	Packstoff-Werkstoff	Farbe	Vorhandensein von Etiketten/Bedruckungen	Lebensmittel- / Nicht-Lebensmittel-Füllgüter	Größe/Fläche	Vorhandensein von Verschlüssen	Prozentualer Masseanteil des Datensatzes	Prozentualer Massenanteil in der Versuchscharge
1	Becher	PP	Opak weiß	Direktbedruckung	Lebensmittel	<A4	kein Verschluss	0,40 %	0,66 %
2	Becher	PP	Opak weiß	Direktbedruckung	Lebensmittel	<A4	Verschluss	1,22 %	2,05 %
3	Becher	PP	Opak weiß	Etikett	Lebensmittel	<A4	Verschluss	0,93 %	1,55 %
4	Becher	PP	Transparent weiß	Etikett	Lebensmittel	<A4	Verschluss	0,41 %	0,68 %
5	Becher	PS	Opak weiß	Direktbedruckung	Lebensmittel	<A4	kein Verschluss	0,46 %	0,77 %
6	Becher	PS	Opak weiß	Direktbedruckung	Lebensmittel	<A4	Verschluss	0,56 %	0,94 %
7	Becher	PS	Opak weiß	Etikett	Lebensmittel	<A4	Verschluss	0,56 %	0,93 %
8	Beutel	2-Verbund Kunststoff / Aluminium	Opak bunt	Direktbedruckung	Lebensmittel	<A4	kein Verschluss	0,54 %	0,90 %
9	Beutel	2-Verbund Kunststoff / Aluminium	Opak bunt	Direktbedruckung	Nicht-Lebensmittel	<A4	kein Verschluss	0,41 %	0,68 %
10	Beutel	LDPE	Transparent weiß	Direktbedruckung	Nicht-Lebensmittel	<A4	kein Verschluss	0,36 %	0,61 %
11	Beutel	LDPE	Transparent weiß	Direktbedruckung	Nicht-Lebensmittel	<A3	kein Verschluss	0,44 %	0,74 %
12	Beutel	LDPE	Transparent weiß	Direktbedruckung	Nicht-Lebensmittel	>A3	kein Verschluss	0,59 %	0,98 %
13	Beutel	Multilayer	Opak weiß	Direktbedruckung	Lebensmittel	<A4	kein Verschluss	0,46 %	0,76 %
14	Beutel	Multilayer	Transparent weiß	Direktbedruckung	Lebensmittel	<A4	kein Verschluss	0,66 %	1,10 %
15	Beutel	Multilayer	Transparent weiß	Etikett	Lebensmittel	<A4	kein Verschluss	0,36 %	0,61 %
16	Beutel	PP	Opak bunt	Direktbedruckung	Lebensmittel	<A4	kein Verschluss	0,57 %	0,96 %
17	Beutel	PP	Opak weiß	Direktbedruckung	Lebensmittel	<A4	kein Verschluss	0,57 %	0,96 %

Vergleichsstudie Identifikationsverfahren – Forum Rezyklat

Nr.	Packmittel	Packstoff-Werkstoff	Farbe	Vorhandensein von Etiketten/Bedruckungen	Lebensmittel- / Nicht-Lebensmittel-Füllgüter	Größe/Fläche	Vorhandensein von Verschlüssen	Prozentualer Masseanteil des Datensatzes	Prozentualer Massenanteil in der Versuchscharge
18	Beutel	PP	Transparent weiß	Direktbedruckung	Lebensmittel	<A4	kein Verschluss	1,43 %	2,38 %
19	Beutel	PP	Transparent weiß	Direktbedruckung	Lebensmittel	<A3	kein Verschluss	0,36 %	0,61 %
20	Beutel	PP	Transparent weiß	Etikett	Lebensmittel	<A4	kein Verschluss	0,67 %	1,12 %
21	Dose	Aluminium	Opak bunt	Direktbedruckung	Nicht-Lebensmittel	<A4	Verschluss	0,83 %	1,40 %
22	Dose	Weißblech	Opak bunt	Direktbedruckung	Lebensmittel	<A4	Verschluss	0,68 %	1,13 %
23	Dose	Weißblech	Opak bunt	Etikett	Lebensmittel	<A4	kein Verschluss	1,36 %	2,26 %
24	Dose	Weißblech	Opak bunt	Etikett	Lebensmittel	<A4	Verschluss	3,95 %	6,59 %
25	Dose	Weißblech	Opak bunt	Etikett	Nicht-Lebensmittel	<A4	kein Verschluss	1,79 %	2,99 %
26	Dose	Weißblech	Opak bunt	Etikett	Nicht-Lebensmittel	<A4	Verschluss	0,37 %	0,62 %
27	Dose	Weißblech	Opak weiß	Etikett	Lebensmittel	<A4	Verschluss	0,71 %	1,18 %
28	Flasche	HDPE	Opak bunt	Etikett	Nicht-Lebensmittel	<A4	Verschluss	0,83 %	1,39 %
29	Flasche	HDPE	Opak weiß	Etikett	Nicht-Lebensmittel	<A4	Verschluss	1,67 %	2,79 %
30	Flasche	PET	Opak weiß	Etikett	Lebensmittel	<A4	Verschluss	0,55 %	0,92 %
31	Flasche	PET	Opak weiß	Etikett	Nicht-Lebensmittel	<A4	Verschluss	0,36 %	0,59 %
32	Flasche	PET	Transparent bunt	Etikett	Lebensmittel	<A4	Verschluss	0,66 %	1,10 %
33	Flasche	PET	Transparent bunt	Etikett	Nicht-Lebensmittel	<A4	Verschluss	0,39 %	0,66 %
34	Flasche	PET	Transparent weiß	Etikett	Lebensmittel	<A4	Verschluss	2,89 %	4,82 %

Vergleichsstudie Identifikationsverfahren – Forum Rezyklat

Nr.	Packmittel	Packstoff-Werkstoff	Farbe	Vorhandensein von Etiketten/Bedruckungen	Lebensmittel- / Nicht-Lebensmittel-Füllgüter	Größe/Fläche	Vorhandensein von Verschlüssen	Prozentualer Masseanteil des Datensatzes	Prozentualer Massenanteil in der Versuchscharge
35	Flasche	PET	Transparent weiß	Etikett	Nicht-Lebensmittel	<A4	Verschluss	1,72 %	2,87 %
36	Flasche	PP	Transparent weiß	Etikett	Nicht-Lebensmittel	<A4	Verschluss	0,57 %	0,95 %
37	Flüssigkeitskarton	2-Verbund PPK / Kunststoff	Opak bunt	Direktbedruckung	Lebensmittel	<A4	Verschluss	4,79 %	8,01 %
38	Flüssigkeitskarton	2-Verbund PPK / Kunststoff	Opak weiß	Direktbedruckung	Lebensmittel	<A4	Verschluss	1,91 %	3,19 %
39	Flüssigkeitskarton	3-Verbund PPK / Aluminium / Kunststoff	Opak bunt	Direktbedruckung	Lebensmittel	<A4	kein Verschluss	0,55 %	0,93 %
40	Flüssigkeitskarton	3-Verbund PPK / Aluminium / Kunststoff	Opak bunt	Direktbedruckung	Lebensmittel	<A4	Verschluss	9,19 %	15,35 %
41	Flüssigkeitskarton	3-Verbund PPK / Aluminium / Kunststoff	Opak weiß	Direktbedruckung	Lebensmittel	<A4	Verschluss	2,75 %	4,60 %
42	Schale	Multilayer	Transparent weiß	Etikett	Lebensmittel	<A4	Verschluss	2,77 %	4,62 %
43	Schale	PET	Transparent weiß	Etikett	Lebensmittel	<A4	Verschluss	1,83 %	3,06 %
44	Schale	PET	Transparent weiß	Keine	Lebensmittel	<A4	kein Verschluss	0,44 %	0,73 %
45	Schale	PP	Opak weiß	Etikett	Lebensmittel	<A4	Verschluss	0,84 %	1,41 %
46	Schale	PP	Transparent weiß	Etikett	Lebensmittel	<A4	Verschluss	1,05 %	1,75 %
47	Schale	PP	Transparent weiß	Keine	Lebensmittel	<A4	kein Verschluss	0,71 %	1,18 %
48	separates Verschlusselement	Weißblech	Opak bunt	Keine	Nicht-Lebensmittel	<A4	Verschluss	0,35 %	0,59 %
49	Tube	Aluminium	Opak bunt	Direktbedruckung	Lebensmittel	<A4	Verschluss	0,41 %	0,68 %
50	Tube	HDPE	Opak weiß	Direktbedruckung	Nicht-Lebensmittel	<A4	Verschluss	0,55 %	0,92 %
51	Wickelverpackung	3-Verbund PPK / Aluminium / Kunststoff	Opak bunt	Direktbedruckung	Lebensmittel	<A4	Verschluss	0,42 %	0,69 %
Summe								59,84 %	100,00 %

5.3.2 “Pain-Point”-Versuchscharge

Grundlage der Ausarbeitung sind die kreislauschädlichen bzw. die verwertungsbehindernden Verpackungseigenschaften aus der Literatur. Insgesamt wurden 27 Verwertungsprobleme identifiziert, welche in Tabelle 11 dargestellt und in die neun Überkategorien Etikettierung, Multilayer, Verbundwerkstoff, Fremd- und Störstoffe, Trennung Kunststofftyp, Dichte, Verpackungseigenschaften, Klassifizierung als Lebensmittel- bzw. Nicht-Lebensmittelverpackung sowie Verunreinigungen (mangelnde Restentleerung) und Verschmutzungen (Anhaftungen an den Verpackungen durch gegenseitige Kontamination) gruppiert werden können. Die Verwertungsprobleme werden ihren Haupt-Ursachen Verpackungsgestaltung, Identifikationsprobleme oder den Handhabungsverfahren zugeordnet. Die Verwertungsprobleme werden im ZSVR-Mindeststandard (Zentrale Stelle Verpackungsregister 2022) mit Blick auf die Verpackungsgestaltung in Verbindung mit den derzeitigen Sortierkriterien operationalisiert. Die Verpackungen verändern sich auf Basis der im ZSVR-Mindeststandard definierten Kriterien. Diese wurden innerhalb der “Pain-Point”-Probencharge berücksichtigt. Er gibt Mindestkriterien unter Berücksichtigung der Praxis der Sortierung und Verwertung vor. Da der ZSVR-Mindeststandard lediglich Mindestkriterien unter Berücksichtigung der Praxis der Sortierung und Verwertung vorgibt, wurden weitere verwertungsproblematische Aspekte aus der Literatur berücksichtigt.

Vergleichsstudie Identifikationsverfahren – Forum Rezyklat

Tabelle 11 (Ungelöste) Unverträglichkeiten der LVP-Sortierung sowie Sortier-Herausforderungen

Überkategorie	Verwertungsproblem / x = adressierbar durch	Quelle	Gestaltung der Verpackung	Identifikationsverfahren	Handhabungsverfahren
Etikettierung	Nicht wasserlösliche Klebstoffapplikationen i. V. m. nassfesten Etiketten	Dehoust et al. 2021; Lubongo und Alexandridis 2022	x	x	
	Etikettierung (Etikett aus Fremdmaterial bedeckt > 50 % der Gesamfläche der Verpackung) verhindert NIR- Erkennung	CEFLEX 2020; Neubauer et al. 2021; Wotruba und Feil 2022; Ragaert et al. 2017b	x	x	
	Fullsleeve-Etikettierung (Ausnahme: Fullsleeves von PET-Hohlkörpern – clear oder light blue –bei Verwendung von OPS-, PET- oder PO-Sleeves)	Dehoust et al. 2021; Neubauer et al. 2021; Zentrale Stelle Verpackungsregister 2018	x	x	
Multilayer	Einsatz von dem Recycling unverträglichen Barrierschichten (PA, PVDC, ...)	Dehoust et al. 2021; CEFLEX 2020; Neubauer et al. 2021	x	x	
	Mehrschichtige Verpackungen	Horodytska et al. 2018; Ragaert et al. 2017b	x	x	
	Trennung von PET- und PET-PE-Schalen	Maga et al. 2019; Dilkes-Hoffman et al. 2019		x	
Verbundwerkstoff	Kunststoff-beschichtete Fasermaterialien	Neubauer et al. 2021	x	x	
	Silikonkomponenten, nicht trennbar	Dehoust et al. 2021	x	x	
Fremd- und Störstoffe	Unverträgliche Komponenten im PET-Strom (PET-G; POM)	Dehoust et al. 2021	x	x	
	Übertragung der Verantwortung an Konsumenten zur Trennung von Verpackungskomponenten bestehend aus unterschiedlichen Materialien (z.B. Alu-Deckel u. Papier-Banderole von PS-Becher)	CEFLEX 2020	x		
Trennung Kunststofftyp	PE-X-Komponenten	Dehoust et al. 2021	x	x	
	EPS-Sortierung	Dehoust et al. 2021	x	x	x
	PA-Additivierung (PET-A-Copolymer)	Dehoust et al. 2021	x	x	
	Identifikation Kunststofftypen (z. B. PET-A/G; PP-H/C.)	Dehoust et al. 2021		x	
Dichte	Trennung geschäumter/nicht geschäumter Elastomer-Komponenten	Dehoust et al. 2021	x	x	
	Nicht-Polyolefine mit Dichte < 1 g/cm ³	Dehoust et al. 2021; CEFLEX 2020	x	x	
	Elastomer-Komponenten > 1 g/cm ³	Dehoust et al. 2021	x	x	
	PE und PP mit Dichte > 0,995 g/cm ³ (gefüllte Polymere)	Dehoust et al. 2021	x	x	

Vergleichsstudie Identifikationsverfahren – Forum Rezyklat

Überkategorie	Verwertungsproblem / x = adressierbar durch	Quelle	Gestaltung der Verpackung	Identifikationsverfahren	Handhabungsverfahren
Verpackungseigenschaften	Sortierung kleiner Geometrien (< 20 x 20 mm)	CEFLEX 2020	x		x
	Schwarze Kunststoffe (Rußbasiert)	Lubongo und Alexandridis 2022; CEFLEX 2020, 2020; Wotruba und Feil 2022; Lange 2021; Ragaert et al. 2017b	x	x	
	Flexible Folien < DIN-A5 (geringe Dichte & niedrige Schüttdichte)	Horodytska et al. 2018; Nonclercq 2016			x
	Erkennung völlig unbedruckter Produkte	Termin Forum Rezyklat 11.10.22			x
	Zylindrische (rollfähige) Geometrien	Termin Forum Rezyklat 11.10.22	x		x
Lebensmittelzulassung	Erkennung Lebensmittel / Nicht-Lebensmittel-Verpackung	Neubauer et al. 2021; CEFLEX 2020; Radusin et al. 2020		x	
Verunreinigungen und Verschmutzungen	Fehlerhafte NIR-Erkennung durch ineinander- / übereinanderliegende und nasse Verpackungen	Neubauer et al. 2021; CEFLEX 2020; Ragaert et al. 2017b; Wotruba und Feil 2022		x	
	Verpackungen mit großen Mengen an Restfüllgehalten (Design verhindert Restentleerung)	Orth et al. 2022; CEFLEX 2020	x		

Vergleichsstudie Identifikationsverfahren – Forum Rezyklat

Die Empfehlung für eine Versuchscharge berücksichtigt diese Anforderungen in Verbindung mit den für eine Kreislaufführung eingesetzten Verwertungstechniken. Dadurch wird es möglich, Klassen von Eigenschaften zu bilden, die die Sortierfähigkeit und Verwertung von Verpackungen verringert. Diese sind jeweils spezifisch für Verpackungen aus den Hauptpolymeren (LDPE-Folien, ansonsten formstabile Verpackungen aus PE, PP, PS, PET):

1. Nicht ablösbare Klebeetiketten
2. Unverträgliche Polymeranteile bzw. Silikon (v.a. nicht mit Hauptpolymer mischbare Komponenten)
3. Dichtemodifizierte Polymeranteile (unrichtige Zuordnung zu Schwimm-/Sinkfraktionen)
4. Nicht-Polymer-Anteile (Metalle, Fasern [diese auch mit Relevanz als Etikettenmaterial])
5. Großflächige Sleeves (nicht aus Hauptpolymer) sowie
6. großflächiger Druck (v.a. bei PET).

In Kombination mit heutigen Sortiertechnologien (Optische Verfahren/NIR) kann so ein sehr eingeschränkter Satz identifizierbarer, kreislaufbehindernder Zusatzeigenschaften geprüft werden. Es wird empfohlen, für jedes Hauptpolymer eine spezifische, nicht rollfähige Geometrie für die Versuche zu wählen. Somit können Verwertungsprobleme, welche den Handhabungsverfahren zuzuordnen sind, exkludiert werden.

Der Vorschlag umfasst insgesamt 32 Verpackungsvarianten einschließlich jeweils einer vollständig kreislauffähigen Referenzverpackung mit und ohne Etikett je Hauptpolymer (Tabelle 12). Die Probenvarianten je Hauptpolymer umfassen jeweils mindestens zwei weitere Verpackungstypen mit Etiketten. Sofern nicht explizit genannt werden die Verpackungstypen nicht mit einem Etikett ausgestattet. Die im Mindeststandard genannte Fraktion "PO" wird durch die spezifischeren Fraktionen "PE" und "PP" berücksichtigt.

Vergleichsstudie Identifikationsverfahren – Forum Rezyklat

Tabelle 12 Empfehlung für Eigenschaftskombinationen einer Sortier-Versuchscharge; gleichartige Eigenschaften sind gleichartig farblich hinterlegt.*

Folie, LDPE	PE formstabil	PP formstabil	PS formstabil	PET-Flaschen und sonst. formstab. Transparente Verp.
6 Varianten	6 Varianten	7 Varianten	5 Varianten	8 Varianten
Referenz ohne Etikett	Referenz ohne Etikett	Referenz ohne Etikett	Referenz ohne Etikett	Referenz ohne Etikett
Referenz mit Etikett ^{a)}	Referenz mit Etikett ^{a)}	Referenz mit Etikett ^{a)}	Referenz mit Etikett ^{a)}	Referenz mit Etikett ^{a)}
Folie Lebensmittelqualität (mit Etikett ^{a)})	PE-Formstabile Kunststoff (FSK) food grade (mit Etikett ^{a)})	PP-FSK Lebensmittelqualität (mit Etikett ^{a)})	PS-FSK Lebensmittelqualität (mit Etikett ^{a)})	PET Lebensmittelqualität (mit Etikett ^{a)})
Folie mit nicht ablösbarem Etikett ^{a)}	PE-FSK mit nicht ablösbarem Etikett ^{a)}	PP-FSK mit nicht ablösbarem Etikett ^{a)}	PS-FSK mit nicht ablösbarem Etikett ^{a)}	PET mit nicht ablösbarem Klebeetikett ^{a)}
Folie mit unverträgl. Polymeranteil	PE-FSK mit unverträgl. Polymeranteil einschl. Silikon	PP-FSK mit unverträgl. Polymeranteil einschl. Silikon	PS-FSK mit unverträgl. Polymeranteil einschl. Silikon	PET mit unverträgl. Polymeranteil einschl. Silikon
Folie mit nicht-Polymer-Anteil	PE-FSK mit dichtemodifiziertem unverträgl. Polymeranteil	PP-FSK mit dichtemodifiziertem unverträgl. Polymeranteil		PET mit nicht-Polymer-Anteil (nicht magnet. Metall)
		PP-FSK mit Fullsleve aus nicht-PP-Polymer		PET mit Sleeve/Etikett aus nicht-PET-Polymer ^{b)}
				PET mit großflächigem Druck

^{a)} Verwertungsproblematik Etiketten: Großflächige Etikettierung (> 50 % der Oberfläche) mit Fremdmaterial

^{b)} Beachten der funktionierenden Ausnahmen für Fullsleeve-Etikettierung: Fullsleeves von PET-Hohlkörpern – clear oder light blue – bei Verwendung von OPS-, PET- oder PO-Sleeves

*Faseranteil wird nicht explizit im Anhang 3 des Mindeststandards genannt, wurde aber aufgrund aktueller technischer Entwicklungen berücksichtigt

Als Sortierstrategien sind grundsätzlich die Positivsortierung (d. h. die zielgerichtete Entnahme der Wertstoffe bzw. werthaltiger Produkte aus dem Materialstrom) oder die Negativsortierung (d. h. die zielgerichtete Entnahme der Störstoffe aus dem Materialstrom) denkbar. Einen Sonderfall stellt die partikelorientierte Vollsartierung dar, bei der der Materialstrom in Partikel vereinzelt und dann jedes Partikel (Produkt) individuell untersucht, gehandhabt und Verwertungswegen zugeordnet wird. Sie unterscheidet sich durch diese partikelindividuelle Handhabung und Untersuchung von der klassischen aufbereitungstechnischen Anreicherung von Wertstoffen aus bzw. in Materialströmen.

Die Definition einer Mustercharge zur Überprüfung der Leistungsfähigkeit von Identifikations- und Sortierverfahren kann lediglich die Herausforderungen des Eingangs-Materialstromes in die Leichtverpackungs-Sortierung durch die Probenauswahl abbilden. Für die experimentelle Umsetzung ist zusätzlich noch die Definition von Zielfractionen und deren Eigenschaften (die sich sinnvollerweise von den heutigen LVP-Sortieranforderungen und -Produktqualitäten unterscheiden sollten, um eine tatsächliche Verbesserung der Verwertungssituation zu

ermöglichen) erforderlich. Auf dieser Grundlage müssen dann die jeweiligen Verfahrens- oder Technologieanbieter eine angemessene Sortierstrategie entwickeln und umsetzen. Mit dieser Sortierstrategie werden durch die Verfahrens- oder Technologieanbieter gleichzeitig zeitliche und finanzielle Aufwände ihres Verfahrens zur LVP-Sortierung bzw. Herstellung spezifikationsgerechter Sortierfraktionen festgelegt. Eine Vorab-Festlegung der Sortierstrategie ist daher nicht sinnvoll.

6 Diskussion

Abschließend werden die Ergebnisse zusammenfassend bewertet und Empfehlungen aus dem Vergleich der Sortiertechniken, für die Zusammenstellung der Versuchscharge und die Durchführung des nachfolgend geplanten Real-Life-Tests abgeleitet.

Für die Erstellung der vorliegenden Studie wurden alle bestehenden Sortieranlagen in Deutschland identifiziert und mit der überwiegenden Mehrheit der Betreiberunternehmen ein intensiver Austausch geführt. Die Sortierunternehmen sind sehr an einem Austausch, d.h. der Kollaboration über die gesamte Wertkette Kreislaufwirtschaft, interessiert und verfolgen die Entwicklungen bei den Produzent*innen und Technikanbietenden sehr eng.

Die Erfahrungen aus den zurückliegenden Jahren führen aber auch zu einer abwartenden Haltung der Sortierunternehmen und wenig Bereitschaft als „First-Mover“ in den Invest für neue Technik zu gehen. Zusätzlich schränken bei vielen Anlagen räumliche Restriktionen die Ausbaumöglichkeiten ein. Dies gilt vor allem für die Lagerhaltung zusätzlicher Fraktionen und die innerbetriebliche Logistik. Die Implementierung der untersuchten Identifikationstechniken allein, führt dagegen nur zu einem geringen zusätzlichen Platzbedarf.

6.1 Vergleich der innovativen Identifikationstechnik

Grundsätzlich unterscheiden sich alle betrachteten Identifikationstechniken sowohl in verfahrensspezifischen Merkmalen als auch in Bezug auf Ziel und Motivation der bei einer Implementierung verbundenen Akteure voneinander.

Dennoch zeigen die Ergebnisse, dass alle Verfahren zur Identifikation der Polymere PET, PE, PP und PS geeignet sind, wobei die überwiegende Anzahl der Verfahren hierfür auf die NIR-Spektroskopie zurückgreift. Ferner ermöglichen alle vorgestellten innovativen Sortiertechniken – bis auf das Verfahren des Unternehmens Polytag – eine Sortierung von LVP-Abfällen aus Kunststoff.

Im Vergleich zum Stand der Technik (NIR-Spektroskopie, Dichtentrennung) ermöglichen die betrachteten Verfahren eine Sortierung von LVP anhand zusätzlicher Merkmalsklassen und

Vergleichsstudie Identifikationsverfahren – Forum Rezyklat

ermöglichen dadurch eine größere Sortiertiefe. Je nach Verfahren können grundlegende, inhärente Materialeigenschaften (bspw. Kunststoff), zusätzliche Eigenschaften (bspw. Lebensmittelverpackung, Multilayer) oder auch die Identifikation von Verpackungen anhand ihrer Artikelnummer identifiziert werden. So ermöglichen alle Verfahren außer der dichte-basierten Sortierzentrifuge und der reinen NIR-Spektroskopie die Trennung von Lebensmittel- oder Nicht-Lebensmittelverpackung. Vor allem die beiden Anbieter Nextloopp und CurvCode verfolgen in Ihrer Entwicklung dieses Trennziel.

Die Unternehmen Polysecure (TBS complete) und Digimarc können allgemein für das Sortieren von LVP eingesetzt werden. Die Lösungen von ZenRobotics, Recycleye, Polysecure (TBS light), Tailorlux und Gabriel-Chemie erlauben zusätzlich die Sortierung von Nicht-LVP (bspw. Industrieprodukten, Elektrogeräte oder Baurestmassen).

Ein weiteres Unterscheidungsmerkmal zwischen den Technologien stellt das Erfordernis einer Vorbehandlung der Packmittel dar. Sowohl NIR-Spektroskopie, Dichtetrennung und Objekterkennung benötigen für eine Identifikation einer Kunststoff-LVP keine vorgeschaltete Behandlung derselben. Dementsprechend ermöglichen diese Verfahren eine vergleichsweise geringe Anzahl zusätzlicher Merkmalsklassen.

Dem steht die Identifikation durch eine Markierung gegenüber, die entweder durch eine gezielte Manipulation des Werkstoffes (Fluoreszenz-Markierung, Fluoreszenz-Identifikator) oder der Verpackungsoberfläche (Digitale Wasserzeichen) erreicht wird. Viele dieser Markierungsverfahren sind mit den gängigen Polymeren und LVP-Arten kompatibel. Allerdings ist der Fokus einiger Anbieter auf bestimmte Stoffströme gerichtet: So konzentriert sich Nextloopp auf LVP aus PP, Polytag auf PET-LVP und CurvCode auf LVP aus PP, HDPE, LDPE, PET, PET und laminierte Papiere. Hiermit verbunden sind ebenfalls unterschiedliche Ansätze der Anbieter hinsichtlich der Verankerung innerhalb des Lebenszyklus von LVP und verpacktem Produkt. Während eine solche Verbindung mit Stand der Technik (NIR-Spektroskopie, Dichtesortierung) nicht möglich ist, können Verfahren wie Polysecure (TBS complete) und Digitale Wasserzeichen Verpackungen entlang der Wertschöpfungskette begleiten.

Ein spezieller Anwendungsfall mit dem sich die meisten betrachteten Verfahren beschäftigen, ist die Trennung von Lebensmittelverpackungen und Nicht-Lebensmittelverpackungen. Prinzipiell sind alle vorgestellten Verfahren (Objekterkennung, Fluoreszenz-Markierung und Digitale Wasserzeichen) hierfür geeignet.

Eine weitere Unterscheidung der Techniken kann basierend auf dem Materialaustrag getroffen werden. Nextloopp, Polysecure (TBS light), Gabriel-Chemie, Digimarc sowie CurvCode sortieren die Verpackungen mittels Druckluft (vgl. Abschnitt 2.2). ZenRobotics und Recycleye setzen

Vergleichsstudie Identifikationsverfahren – Forum Rezyklat

hingegen auf Portalroboter und das Sortiermodul SORT4CIRCLE® von Polysecure trennt mit Hilfe von Klappen. Im Gegensatz zu den zuvor genannten Verfahren sortiert Vogt-Plastic nicht auf Artikel- sondern auf Flakeebene. Die jeweiligen Austragsprinzipien unterscheiden sich insbesondere in ihrer Geschwindigkeit und Präzision, wobei prinzipiell druckluftbasierte Systeme höhere Materialdurchsätze ermöglichen und Roboter zur Nachsortierung und / oder Qualitätssicherung geeignet sind. Somit unterscheiden sich die Anbieter auch in den Einsatzszenarien ihrer Produkte.

Prinzipiell können alle Markierungsverfahren, bei denen die Markierungssubstanz in die Polymermatrix eingebracht wird, sowohl zur Markierung der eigentlichen Verpackung als auch des verwendeten Etiketts benutzt werden. Allerdings erlauben Nextloopp und Polytag nur die Aufbringung auf Etiketten.

Im Rahmen der Diskussion um innovativer Sortiertechnologien sollte berücksichtigt werden, dass bereits jetzt Sortieranlagen nach dem Stand der Technik aufgrund von wirtschaftlichen Gründen unterhalb ihrer Möglichkeiten verbleiben (Wagner et al. 2018). Eine Möglichkeit dem Kostendruck gegenzusteuern ist die Erhöhung des Anlagendurchsatzes.

Die Ergebnisse des Vergleichs der Sortiertechniken sind in Abbildung 62 (qualitativen Bewertungen) und in Abbildung 63 (Anwendbarkeit) zusammengefasst.

Vergleichsstudie Identifikationsverfahren – Forum Rezyklat

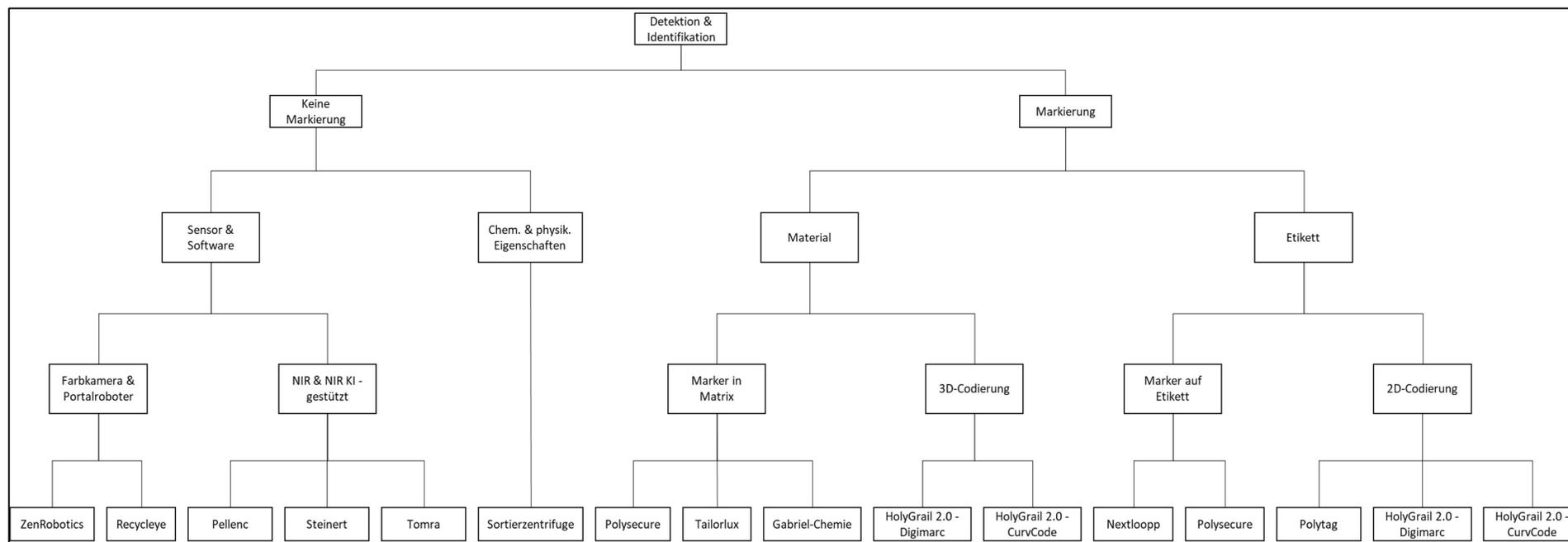


Abbildung 63 Darstellung der betrachteten Lösungen in Form eines Baumdiagramms. Dies verdeutlicht die Unterschiede der einzelnen Lösungen hinsichtlich der jeweiligen Anwendbarkeit

6.2 Weitere Optimierungen der Sortier-Prozesse

Die Ergebnisse der Studie zeigen Verwertungsprobleme bei verschiedenen Sortierfraktionen auf Grund von „kreislaufschädlichen“ Materialien, welche sich bereits im Input der LVP-Sortieranlagen befinden. Um zu untersuchen, ob innovative Sortiertechnologien in der Lage sind, diese Komponenten vor einem mechanischen Recyclingverfahren zu identifizieren und aussortieren, sind die vorgeschlagenen neuen Identifikationstechnologien sowie die potenziellen Installationsstellen in Tabelle 13 aufgeführt.

Grundsätzlich muss jedoch berücksichtigt werden, dass bei der überwiegenden Zahl der existierenden Anlagen die räumlichen Bedingungen den weiteren Ausbau und die technischen Ergänzungen der bestehenden Anlagen einschränken. Vor allem die kleinen und mittelgroßen Anlagen werden bereits heute auf sehr engem Raum betrieben. Zusätzliche Förderstrecken, Stellplätze für Sortierstationen oder Lagerplätze für zusätzliche Fraktionen sind entsprechend schwierig zu realisieren.

Vergleichsstudie Identifikationsverfahren – Forum Rezyklat

Tabelle 13 Anwendung innovativer Sortiertechnologie zur Lösung des Verwertungsproblems mit dem vorgeschlagenen Installationspunkt in LVP – Sortieranlagen (*P-positive Sortierung, N-negative Sortierung)

Überkategorie	Verwertungsproblem	Mögliche Installationsstelle	Innovatives Identifikationsverfahren	Sortierungsmethode (P/N)*
Etikettierung	Nicht wasserlösliche Kleber i. V. m. nassfesten Etiketten	Nicht anwendbar	Nicht anwendbar	
	Etikettierung (Etikett bedeckt >50% der Gesamtfläche der Verpackung) verhindert NIR-Erkennung	NIR-Sortiermaschine f. Hauptkomponenten	Alle	P
	Fullsleeve-Etikettierung (Ausnahme: Fullsleeves von PET-Hohlkörpern – clear oder light blue – bei Verwendung von OPS-, PET- oder PO-Sleeves)	NIR-Sortiermaschine f. Hauptkomponenten	DW-2D, FM, NIR+, SZ	P
Multilayer	Einsatz von Barrierschichten (PA, PVDC, ...)	NIR-Sortiermaschine f. Polymertypen	DW-2D, DW-3D, FM	N
	Mehrschichtige Verpackungen	NIR-Sortiermaschine f. Polymertypen	DW-2D, DW-3D, FM	N
	Trennung von PET- und PET-PE-Schalen	NIR-Sortiermaschine f. PET-Schalen (falls vorhanden) Letzten Laufband vor dem PET-Bunker	DW-2D, DW-3D, FM, NIR+	NIR-Sortiermaschine f. PET-Schalen: P Letzten Laufband vor dem PET-Bunker: N
Verbundwerkstoff	KS-beschichtete Fasermaterialien	NIR-Maschine f. Kunststofftrennung	FM	N
Fremd- und Störstoffe	Silikonkomponenten, nicht trennbar	NIR-Sortiermaschine f. PE Letzten Laufband vor dem PE-Bunker	DW-2D, DW-3D, FM, OD	N
	Unverträgliche Komponenten im PET-Strom (PET-G; POM)	Letzten Laufband vor dem PET-Bunker	DW-2D, DW-3D, FM, NIR+, OD	N
	Übertragung der Verantwortung an Konsumenten zur Trennung von Verpackungskomponenten	Nicht anwendbar	Nicht anwendbar	

Vergleichsstudie Identifikationsverfahren – Forum Rezyklat

Überkategorie	Verwertungsproblem	Mögliche Installationsstelle	Innovatives Identifikationsverfahren	Sortierungsmethode (P/N)*
	bestehend aus unterschiedlichen Materialien (z.B. Alu-Deckel u. Papier-Banderole von PS-Becher)			
Trennung Kunststoffart	PE-X-Komponenten	NIR-Sortiermaschine f. PE Letzten Laufband vor dem PE-Bunker	FM, NIR+	N
	EPS-Sortierung	Nicht erfassbar	FM, NIR+, OD	Solange anwendbar: N
	PET-A-Copolymere	NIR-Sortiermaschine f. PET Letzten Laufband vor dem PE-Bunker	DW-2D, DW-3D, FM, NIR+	N
	Identifikation Kunststofftypen (z. B. PET-A/G; PP-H/C.)	NIR-Sortiermaschine f. Polymerarten Letzten Laufband vor dem PE-Bunker	DW-2D, DW-3D, FM, NIR+	N
Dichte	Trennung geschäumter/nicht geschäumter Elastomer-Komponenten	Nicht relevant soweit identifizierbar durch NIR	DW-2D, FM, NIR+	Solange anwendbar: N
	Nicht-Polyolefine mit Dichte < 1 g/cm ³	Nicht relevant	Alle	N
	Elastomer-Komponenten >1 g/cm ³	Nicht relevant soweit identifizierbar durch NIR	DW-2D, DW-3D, FM, NIR+, OD	N
Verpackungseigenschaften	Direktdruck (umfangreich; mehr als MHD)	NIR-Sortiermaschine f. Hauptkomponenten	DW-2D	P
	Sortierung kleiner Geometrien (< 20mmx20mm)	Nicht anwendbar	SZ	
	Schwarze Kunststoffe (Rußbasiert)	Ende des Gesamtsortierverfahrens	DW-2D, NIR+, KI, SZ	PO-Komponenten: P
	Flexible Folien < DIN A5 (geringe Dichte & niedrige Schüttdichte)	NIR-Sortiermaschine f. Folie	DW-2D, FM, SZ, NIR+, OD	Für Einschicht LDPE: P; Für Einschicht PP: P (soweit PP-Flex Strom vorhanden); Sonst.: N
	Erkennung völlig unbedruckter Produkte	Nicht relevant	DW-3D, FM, NIR+, OD, SZ	

Vergleichsstudie Identifikationsverfahren – Forum Rezyklat

Überkategorie	Verwertungsproblem	Mögliche Installationsstelle	Innovatives Identifikationsverfahren	Sortiermethode (P/N)*
	Zylindrische (rollfähige) Geometrien	Nicht relevant	SZ	
Lebensmittel-zulassung	Erkennung Food/Non-Food		DW-2D, DW-3D, NIR+, FM, OD	P oder N
Verunreinigungen und Verschmutzungen	Fehlerhafte NIR-Erkennung durch ineinander-/übereinanderliegenden und nassen LVP	Nicht relevant	SZ	
	Verpackungen mit großen Mengen an Restfüllgehalten (Design verhindert Restentleerung)	Nicht relevant	DW-2D, DW-3D, FM, NIR+, OD, SZ	

6.3 Skizze des Feldversuchs

Für den Feldversuch sollten zwei Aspekte auf ihre Machbarkeit getestet werden. Der erste Aspekt sollte sich auf die Verbesserung des aktuellen LVP-Sortierprozesses durch die Verwendung innovativer Identifikationstechnologien konzentrieren. Dieser Aspekt kann weiter unterteilt werden in die Reduzierung der Eingangsmenge von der LVP-Anlage zur Abfallverbrennungsanlage (WTE) und die Erhöhung der Reinheit der Sortierballen.

Der zweite Aspekt sollte sich auf die Entwicklung neuer Sortierkriterien mithilfe innovativer Sortiertechnologien konzentrieren. Die neuen Sortierkriterien können entweder nach Anwendung (z.B. Lebensmittelverpackungen, Kosmetikverpackungen) oder Prozessspezifikation (z.B. Spritzguss, Blasformen) unterschieden werden.

6.3.1 Verbesserung des aktuellen LVP-Sortierverfahrens

Für diese Studie wird eine ABC-Testladung als Testmaterial verwendet. In derselben Sortieranlage oder Testcenter werden verschiedene Sortiertechnologien mit derselben Testladung, die den komplexen ABC enthält, getestet. Die Testanlage soll mit folgenden vier Szenarien für den Versuch nachgerüstet werden:

- a. Es wird ein Blankotest durchgeführt (nur Sortierung mit NIR).
- b. Die Sortierung erfolgt unter Verwendung von Objekterkennung
- c. Das Testmaterial wird mit Fluoreszenzmarkern gekennzeichnet und nur durch Fluoreszenzsensoren identifiziert.
- d. Das Testmaterial wird mit digitalen Wasserzeichen gekennzeichnet und nur durch digitale Wasserzeichen identifiziert.

Alle NIR-Sortiermaschinen, von der FKN-Sortierung bis zum Ende des Prozesses, sind in jedem Test mit Sensoren für innovative Identifikation ausgestattet.

Nach der automatischen Sortierung der Versuchscharge wird eine Sortieranalyse des Sortierrests, des Mischkunststoffs (350-Fraktion), der PET-, PE-, PP- und PS-Ballen durchgeführt. Die Analyse des Sortierrests und des gemischten Plastiks konzentriert sich auf den Inhalt der Objekte, die in PET-, PE-, PP- oder PS-Ballen sortiert werden sollten. Die Analyse der PET-, PE-, PP- und PS-Ballen konzentriert sich auf die Reinheit des Ballens im Vergleich zum Blankotest.

Der nächste Schritt beinhaltet die Verarbeitung von PET-, PE-, PP- und PS-Ballen zur Wiederverwertung. Es ist wichtig, die Masse der Ausschüsse während des Recyclingprozesses zu dokumentieren, einschließlich Vorwäsche, Dichtentrennung und Schmelzfiltration im Extruder. Die Menge an Rezyklat, die aus jedem Szenario produziert wird,

Vergleichsstudie Identifikationsverfahren – Forum Rezyklat

sollte verglichen werden. Darüber hinaus sollten Differential-Scanning-Kalorimetrie (DSC) und Fourier-Transform-Infrarot (FTIR)-Analysen an den Rezyklaten durchgeführt werden, um eventuelle Fremdpolymergehalte zu identifizieren.

Nach dem Vergleich verschiedener innovativer Sortiertechnologien kann eine Bewertung ihrer jeweiligen Vor- und Nachteile erzielt werden. Basierend auf dieser Analyse können verschiedene Kombinationen von innovativen Sortiertechnologien mit einer ähnlichen Methodik wie oben erwähnt getestet werden. Darüber hinaus können Upgrade-Lösungen für LVP-Sortieranlagen unterschiedlicher KGs entwickelt werden.

6.3.2 Neue Sortierkriterien

Die neueste EU-Kommissionsverordnung Nr. 2022/1616, die ab Oktober 2022 in Kraft tritt, verbietet weiterhin die Verwendung von Rezyklaten aus der Post-Consumer Sammlung für Lebensmittelverpackungen (Engelmann und Luan 2023). Daher sollte der Fokus der neuen Sortierkriterien auf kosmetische Anwendungen verschoben werden, die ähnlichen Vorschriften wie Lebensmittelverpackungen unterliegen. Derzeit gibt es bereits Nachweise für die Machbarkeit der Verwendung von PCR-Rezyklaten in kosmetischen Verpackungen. Daher sollten PET-, HDPE- und PP-Flaschen als besonders interessant für weitere Untersuchungen angesehen werden.

Um PET-, HDPE- und PP-Materialien für kosmetische Anwendungen effektiv zu sortieren, werden die Materialien aus der Versuchscharge am Ende des LVP-Sortierverfahrens vor dem Eintritt in den Bunker mithilfe von Objekterkennung, Fluoreszenzmarker oder digitalem Wasserzeichen sortiert. Anschließend sollten die sortierten Materialien dem gleichen Recyclingprozess unterzogen werden. Das resultierende Rezyklat sollte gemäß der Verordnung EU 10/2011 analysiert werden. Dabei sollten die in Tabelle 14 aufgeführten Tests enthalten sein.

Tabelle 14 Erforderliche Analyse für Kosmetik-Zulassung (Pereda et al. 2021)

Schädliche Substanzen anhand von Migrationsversuchen
Gesamtmigration in 10 %, 50 % und 95 % Ethanol, Isooctan und 3 % Essigsäure als Simulanzien
Phthalsäureester (10 d, 60 °C) in 95 % Ethanol als Simulans (10 d, 40 °C)
Schwermetalle (Pb, Cd, Cr, Hg)
Spezifische Migration von Metallen in 3 % Essigsäure als Simulans (10 d, 60 °C)
Spezifische Migration von polyzyklischen aromatischen Kohlenwasserstoffen (PAK) in Isooctan als Simulans (10 d, 60 °C)
Spezifische Migration von primären aromatischen Aminen (PAA) in 95 % Ethanol als Simulans (10 d, 60 °C)
Screening und Analyse von nicht beabsichtigten zugesetzten Substanzen (NIAS)
Material-Screening-Studien zu flüchtigen Substanzen (Headspace GC MS, Thermodesorption TD-GC MS)
Migrationsstudien zu halbflüchtigen Substanzen: GC-MS: Migration mit 95 % Ethanol (10 d, 60 °C)
Migrationsstudien zu nicht flüchtigen Substanzen: LC-MS: Migration mit 95 % Ethanol (10 d, 60 °C)

6.3.3 Modellierung und Bewertung

Um die Wirksamkeit der innovativen Identifikationstechnologien in der LVP-Sortierung quantitativ zu bewerten, sollten basierend auf den Ergebnissen des Feldversuchs eine Materialflussanalyse (MFA) und eine Lebenszyklusanalyse (LCA) durchgeführt werden.

In der Modellierungsphase sollten zukünftige Szenarien als Teil einer effektiven und umfassenden Strategie berücksichtigt werden. Die europäische Verpackungs- und Verpackungsabfallverordnung schreibt vor, dass Verpackungen mit weniger als 70 % recyclebarem Inhalt in Zukunft verboten sein sollten, um das Ziel einer Kreislaufwirtschaft zu erreichen. In Deutschland wird das Verpackungsgesetz im §21 ein neues Finanzierungsmodell einführen, das darauf abzielt, nicht recycelbare Verpackungen auf dem Markt zu reduzieren

Vergleichsstudie Identifikationsverfahren – Forum Rezyklat

(Bulach et al. 2022). Trotzdem besteht ein Mangel an quantitativer Bewertung der potenziellen Auswirkungen dieser Gesetzesänderung. Es ist daher unerlässlich, ein zukünftiges Szenario zu entwickeln, das die Reduktion nicht-recycelbarer Verpackungen und deren potenzielle Auswirkungen auf die Umwelt und die Wirtschaft berücksichtigt. Durch eine solche Entwicklung können Entscheidungsträger und Interessengruppen informierte Entscheidungen über nachhaltige Verpackungen treffen und den Übergang zu einer nachhaltigeren und kreislauforientierten Wirtschaft fördern.

7 Zusammenfassung

Die vorliegende Studie bewertet und vergleicht die Anwendung innovativer Identifikationstechnologien zur Sortierung von Post-Consumer Kunststoffverpackung in Deutschland. Dabei werden verfügbare, innovative Technologien in Bezug auf ihre Eignung für verschiedene Materialströme, die verbundenen Kosten, ihre technische Reife (TRL) und bestehende Lieferanten betrachtet. Im Ergebnis zeigt sich, dass alle betrachteten Technologien geeignet sind die LVP weitergehend zu sortieren und eine qualitative Verbesserung der Rezyklats bewirken können. Gleichzeitig sind Zielsetzungen und Anwendungsbereiche der Technologien unterschiedlich, so dass ein Vergleich und definierter Zielsetzung im großtechnischen Maßstab empfohlen wird.

Zusätzlich wurden alle 39 deutschen LVP-Sortieranlagen angesprochen und vorhandene Kapazitäten, der Stand der Ausrüstung und verfügbare Fläche ermittelt und dokumentiert. Die Anlagen unterscheiden sich nach Kapazitäten und Ausrüstung, setzen aber alle sensorbasierte Verfahren auf der Basis der NIR-Spektroskopie zur Trennung von Polymeren ein. Neben dem großen Interesse der Anlagenbetreiber*innen verdeutlicht die Erhebung auch den aktuellen Mangel an konkreten Technologieentscheidungen, welcher die technische Weiterentwicklung der Sortieranlagen bremst. Hier sollte der Austausch über die gesamte Circular Economy intensiviert und verstetigt werden.

Abschließend wurde die Zusammensetzung der Versuchschargen und die Testmethode für den geplanten Feldversuch erarbeitet. Im Ergebnis werden drei verschiedene Chargen vorgeschlagen, die auf unterschiedlichen Kombinationen von Verpackungsmerkmalen wie Polymertyp, Lebensmittel-/Nichtlebensmittelanwendungen, Form, Farbe, Größe, Etiketten und Verschlüsse basieren. Wichtig ist, dass die Leistungsbewertung der innovativen Identifizierungstechnologien in großtechnischen Tests und auf der Grundlage der Rezyklatqualität erfolgen sollte. Vor dem Hintergrund neuer Rezyklatprodukte sollte auch eine Überprüfung der genutzten Sortierkriterien erfolgen.

Ein entscheidender Faktor für die Einführung innovativer Identifikationstechnologien besteht darin, konkrete Belege aus der Feldstudie vorzulegen, um politische Entscheidungsträger und Anlagenbetreiber davon zu überzeugen, dass diese Technologien erhebliche Vorteile bieten. Insbesondere können innovative Sortiertechnologien in der LVP-Sortierung die Menge an Rezyklaten auf dem Markt signifikant erhöhen und die Qualität der Rezyklate verbessern. Durch die Einführung dieser Technologien kann ein entscheidender Beitrag zur Förderung des Übergangs zur Circular Economy (CE) geleistet werden.

Literaturverzeichnis

Acerbi, Federica; Sassanelli, Claudio; Terzi, Sergio; Taisch, Marco (2021): A Systematic Literature Review on Data and Information Required for Circular Manufacturing Strategies Adoption. In: *Sustainability* 13 (4), S. 2047. DOI: 10.3390/su13042047.

Andritz (2014): Censor Kunststoff-Recycling: Wir setzen Maßstäbe. Online verfügbar unter http://atl.g.andritz.com/c/com2011/00/03/26/32651/1/1/0/658255457/se-censor_centrifuge-de.pdf.

2019: Artificial intelligence - Life Cycle Processes and Quality Requirements - Part 1: Quality Meta Model.

Baumann, A.; Uhlich, D.; Löw, H.; Braumandl, W. (2022): Leuchtende Marker statt heiligem Gral.

Blomsma, Fenna; Brennan, Geraldine (2017): The Emergence of Circular Economy: A New Framing Around Prolonging Resource Productivity. In: *Journal of Industrial Ecology* 21 (3), S. 603–614. DOI: 10.1111/jiec.12603.

Bonifazi, Giuseppe; Gasbarrone, Riccardo; Palmieri, Roberta; Serranti, Silvia (2020): Near infrared hyperspectral imaging-based approach for end-of-life flat monitors recycling. In: *at - Automatisierungstechnik* 68 (4), S. 265–276. DOI: 10.1515/auto-2019-0058.

Bulach, W.; Dehoust, G.; Möck, A.; Herman, A.; Keimeyer, F.; Christiani, J.; Bartnik, S. (2022): Überprüfung der Wirksamkeit des § 21 VerpackG und Entwicklung von Vorschlägen zur rechtlichen Weiterentwicklung. Endbericht. Umweltbundesamt. Online verfügbar unter https://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/479/publikationen/texte_118-2022_ueberpruefung_der_wirksamkeit_des_ss_21_verpackg_und_entwicklung_von_vorschlaegen_zur_rechtlichen_weiterentwicklung.pdf.

Burger, Alexandar; Cayé, Nicolas; Jaegermann, Corinna; Schüler, Kurt (2021): Aufkommen und Verwertung von Verpackungsabfällen in Deutschland im Jahr 2019. Online verfügbar unter https://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/1410/publikationen/2021-11-23_texte_148-2021_aufkommen-verwertung-verpackungsabfaelle-deutschland-2019_bf.pdf, zuletzt geprüft am 19.08.2022.

Burger, Alexandar; Cayé, Nicolas; Schüler, Kurt (2022): Aufkommen und Verwertung von Verpackungsabfällen in Deutschland im Jahr 2020. Hg. v. Umweltbundesamt. Dessau-Roßlau. Online verfügbar unter

https://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/1410/publikationen/2022-09-29_texte_109-2022_aufkommen-verwertung-verpackungsabfaelle-2020-d.pdf, zuletzt geprüft am 21.03.2023.

CEFLEX (2020): DESIGNING FOR A CIRCULAR ECONOMY. Recyclability of polyolefin-based flexible packaging. Online verfügbar unter <https://guidelines.ceflex.eu/resources/>, zuletzt geprüft am 21.03.2023.

Christiani, Joachim (2017): Recycling und Recyclingfähigkeit bei Verpackungen – Das neue VerpackG in der Praxis. Stand der Technik und Herausforderungen für einzelne Verpackungsmaterialien. Online verfügbar unter https://www.bvse.de/images/pdf/Themen__Ereignisse/2017/1-Christiani_Stand_der_Technik_.pdf, zuletzt geprüft am 21.03.2023.

Christiani, Joachim; Beckamp, Sandra (2020): Was können die mechanische Aufbereitung von Kunststoffen und das werkstoffliche Recycling leisten? In: Stephanie Thiel, Elisabeth Thomé-Kozmiensky, Peter Quicker und Alexander Gosten (Hg.): Energie aus Abfall, Bd. 17. Neuruppin: Thomé-Kozmiensky Verlag GmbH, S. 139–152.

Conversio GmbH (2020): Stoffstrombild der Kunststoffe in Deutschland 2019. Kurzfassung. Online verfügbar unter <https://www.bkv-gmbh.de/studien/studie-stoffstrombild-kunststoffe-in-deutschland-2019-conversio.html>, zuletzt geprüft am 19.08.2022.

Conversio GmbH (2022): Stoffstrombild Kunststoffe in Deutschland 2021: Zahlen und Fakten zum Lebensweg von Kunststoffen. Unter Mitarbeit von Christoph Lindner, Jan Schmitt, Elena Fischer und Julia Hein. Online verfügbar unter https://www.bvse.de/dateien2020/2-PDF/01-Nachrichten/03-Kunststoff/2022/Kurzfassung_Stoffstrombild_2021_13102022_1_.pdf, zuletzt geprüft am 21.03.2023.

Cox, Ingemar J.; Miller, Matthew L.; Bloom, Jeffrey A.; Fridrich, Jessica; Kalker, Ton (Hg.) (2008): Introduction in Digital watermarking and steganography. Amsterdam, Boston.: Morgan Kaufmann Publishers (The Morgan kaufmann series in computer security).

Dehoust, Günter; Herman, Andreas; Christiani, Joachim; Beckamp, Sandra; Bünemann, Agnes; Bartnik, Sabine (2021): Ermittlung der Praxis der Sortierung und Verwertung von Verpackungen im Sinne des § 21 VerpackG. Hg. v. Umweltbundesamt. Dessau-Roßlau. Online verfügbar unter https://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/5750/publikationen/2021-01-22_texte_11-2020_oekologische_beteiligungsentgelte.pdf, zuletzt geprüft am 21.03.2023.

Dilkes-Hoffman, Leela Sarena; Pratt, Steven; Laycock, Bronwyn; Ashworth, Peta; Lant, Paul Andrew (2019): Public attitudes towards plastics. In: *Resources, Conservation and Recycling* 147, S. 227–235. DOI: 10.1016/j.resconrec.2019.05.005.

Döbel, I.; Leis, M.; Vogelsang, M.; Neustroev, D.; Petrka, H.; Riemer, A. et al. (2018): *Maschinelles Lernen: Eine Analyse zu Kompetenzen, Forschung und Anwendung*. München.

Ellen MacArthur Foundation (2016): *The New Plastics Economy. Rethinking the Future of Plastics*. Cowes, UK.

Ellen MacArthur Foundation (2017): *The New Plastics Economy. Catalysing Action*. Hg. v. World Economy Forum. Online verfügbar unter <https://emf.thirdlight.com/link/u3k3oq221d37-h2ohow/@/preview/1?o>, zuletzt geprüft am 21.03.2023.

Engelmann, M.; Luan, P. (2023): *NEW RULES FOR PLASTIC RECYCLATES IN CONTACT WITH FOOD*. GKV-BDE-BVSE. Online verfügbar unter https://kunststoffverpackungen.de/wp-content/uploads/2023/02/GKV-BDE-bvse_plastics_recyclates_in_food_contact_final.pdf, zuletzt geprüft am 30.03.2023.

European Commission (2018): *A European Strategy for Plastics in a Circular Economy*. European Commission. Brussels, Belgium. Online verfügbar unter https://eur-lex.europa.eu/resource.html?uri=cellar:2df5d1d2-fac7-11e7-b8f5-01aa75ed71a1.0001.02/DOC_1&format=PDF, zuletzt geprüft am 21.03.2023.

Faraca, Giorgia; Astrup, Thomas (2019): Plastic waste from recycling centres: Characterisation and evaluation of plastic recyclability. In: *Waste management (New York, N.Y.)* 95, S. 388–398. DOI: 10.1016/j.wasman.2019.06.038.

Feil, Alexander; Pretz, Thomas; Vitz, Philipp; van Thoden Velzen, Eggo Ulphard (2017): A methodical approach for the assessment of waste sorting plants. In: *Waste management & research : the journal of the International Solid Wastes and Public Cleansing Association, ISWA* 35 (2), S. 147–154. DOI: 10.1177/0734242X16683270.

Freitag, G. (2022): *Anlagenzertifikat für die Letztempfängeranlage*. Vogt-Plastic GmbH Standort Premnitz. Hg. v. Zertifizierungsnetzwerk.de. Zertifizierungsnetzwerk.de. Jettingen. Online verfügbar unter <https://www.vogt-plastic.de/de/zertifikate.html?file=files/vogt-plastic/docs/pdf/zertifikate/2022/2022%20Vogt%20Premnitz%20VerpackG%20Zertifikat.pdf>, zuletzt geprüft am 29.09.2022.

Vergleichsstudie Identifikationsverfahren – Forum Rezyklat

- Garcia, Jeannette M.; Robertson, Megan L. (2017): The future of plastics recycling. In: *Science (New York, N.Y.)* 358 (6365), S. 870–872. DOI: 10.1126/science.aag0324.
- Haenlein, Michael; Kaplan, Andreas (2019): A Brief History of Artificial Intelligence: On the Past, Present, and Future of Artificial Intelligence. In: *California Management Review* 61 (4), S. 5–14. DOI: 10.1177/0008125619864925.
- Herrmann, Jürgen (1997): Maschinelles Lernen und wissensbasierte Systeme. Systematische Einführung mit praxisorientierten Fallstudien. Berlin, Heidelberg: Springer.
- HolyGrail 2.0 (2022): Significant milestone achieved with the semi-industrial validation of detection sorting unit. Online verfügbar unter <https://www.digitalwatermarks.eu/post/significant-milestone-achieved-with-the-semi-industrial-validation-of-detection-sorting-unit>,
- HolyGrail 2.0 (30.03.2022): Significant milestone achieved with the semi-industrial validation of detection sorting unit. Online verfügbar unter <https://www.digitalwatermarks.eu/post/significant-milestone-achieved-with-the-semi-industrial-validation-of-detection-sorting-unit>, zuletzt geprüft am 09.07.2022.
- Horodytska, O.; Valdés, F. J.; Fullana, A. (2018): Plastic flexible films waste management - A state of art review. In: *Waste management (New York, N.Y.)* 77, S. 413–425. DOI: 10.1016/j.wasman.2018.04.023.
- Industrievereinigung Kunststoffverpackungen e.V. (2018): Sustainability Report 2018. Hg. v. IK Industrievereinigung Kunststoffverpackungen e.V. IK Industrievereinigung Kunststoffverpackungen e.V. Bad Homburg vor der Höhe. Online verfügbar unter <http://kunststoffverpackungen.de/wp-content/uploads/2019/09/Sustainability-Report-2018>, zuletzt geprüft am 21.03.2023.
- Jaeger, Claudius (2021): Digital Watermarks & Holy Grail 2.0. Digimarc Corporation. HolyGrail 2.0, 08.11.2021.
- Jansen, M.; van Thoden Velzen, E.U; Pretz, Th (Hg.) (2015): Handbook for sorting of plastic packaging waste concentrates. Separation efficiencies of common plastic packaging objects in widely used separation machines at existing sorting facilities with mixed postconsumer plastic packaging waste as input. Wageningen: Wageningen UR Food & Biobased Research.
- Johansen, Mathilde Rosenberg; Christensen, Thomas Budde; Ramos, Tiffany Marilou; Syberg, Kristian (2022): A review of the plastic value chain from a circular economy

- perspective. In: *Journal of environmental management* 302 (Pt A), S. 113975. DOI: 10.1016/j.jenvman.2021.113975.
- Koinig, Gerald; Kuhn, Nikolai; Barretta, Chiara; Friedrich, Karl; Vollprecht, Daniel (2022): Evaluation of Improvements in the Separation of Monolayer and Multilayer Films via Measurements in Transflection and Application of Machine Learning Approaches. In: *Polymers* 14 (19). DOI: 10.3390/polym14193926.
- Krüger, Franziska (2020): ATA - Ad-hoc-Ausschuss: Kennzeichnung / Identifizierung von Kunststoffen. Hg. v. Bund-Länder-Arbeitsgemeinschaft Abfall (LAGA).
- Lange, Jean-Paul (2021): Managing Plastic Waste—Sorting, Recycling, Disposal, and Product Redesign. In: *ACS Sustainable Chem. Eng.* 9 (47), S. 15722–15738. DOI: 10.1021/acssuschemeng.1c05013.
- Lang-Koetz, Claus; Woidasky, Jörg; Schmidt, Jannick; Auer, Maximilian; Kusch, Anina; Gasde, Johannes et al. (2021): Markerbasiertes Sortier- und Recyclingsystem für Kunststoffverpackungen. Schlussbericht des BMBF-Forschungsvorhabens „MaReK“. Hg. v. Technische Informationsbibliothek. Pforzheim, Germany. Online verfügbar unter <https://www.tib.eu/de/suchen/id/TIBKAT:1777963265/Markerbasiertes-Sortier-und-Recyclingsystem-f%C3%BCr?cHash=dd74a446d37fa737fc852e56bc425726>, zuletzt geprüft am 21.03.2023.
- Lubongo, Cesar; Alexandridis, Paschalis (2022): Assessment of Performance and Challenges in Use of Commercial Automated Sorting Technology for Plastic Waste. In: *Recycling* 7 (2), S. 11. DOI: 10.3390/recycling7020011.
- Maga, Daniel; Hiebel, Markus; Aryan, Venkat (2019): A Comparative Life Cycle Assessment of Meat Trays Made of Various Packaging Materials. In: *Sustainability* 11 (19), S. 5324. DOI: 10.3390/su11195324.
- Mellen, Dirk; Becker, Tobias (2018): Kunststoffe. In: Peter Kurth, Anno Oexle und Martin Faulstich (Hg.): *Praxishandbuch der Kreislauf- und Rohstoffwirtschaft*. Wiesbaden: Springer Fachmedien Wiesbaden, S. 327–345.
- Mitchell, Tom M. (2010): *Machine learning*. International ed., [Reprint.]. New York, NY: McGraw-Hill (McGraw-Hill series in computer science).
- Neubauer, Christian; Stoifl, Barbara; Tesar, Maria; Thaler, Peter (2021): *Sortierung und Recycling von Kunststoffabfällen in Österreich: Status 2019*. 2. korrigierte Auflage. Wien:

Vergleichsstudie Identifikationsverfahren – Forum Rezyklat

Umweltbundesamt (Report / Umweltbundesamt, [Neue Folge], 744,2). Online verfügbar unter <https://permalink.obvsg.at/AC16194420>.

Nonclercq, Aurélie (2016): Mapping flexible packaging in a Circular Economy [F.I.A.C.E]: Final report. Delft University of Technology. Online verfügbar unter https://ceflex.eu/public_downloads/FIACE-Final-report-version-24-4-2017-non-confidential-version-Final.pdf, zuletzt geprüft am 21.03.2023.

Pereda, M.; Gerber, E.; Sander, I.; Welle, F. (2021): How to Evaluate Post-consumer Polyolefin Recyclates in Cosmetic Packaging? Online verfügbar unter https://www.ivv.fraunhofer.de/content/dam/ivv/de/documents/info/cosmetic_packaging_guidance_nce_.pdf, zuletzt geprüft am 30.03.2023.

Pretz, Thomas; Feil, Alexander (2020): Mechanical Recycling. In: Trevor M. Letcher (Hg.): Plastic waste and recycling. Environmental impact, societal issues, prevention, and solutions. Amsterdam, San Diego, Cambridge, MA, Kidlington: Academic Press.

Ragaert, Kim; Delva, Laurens; van Geem, Kevin (2017a): Mechanical and chemical recycling of solid plastic waste. In: *Waste management (New York, N. Y.)* 69, S. 24–58. DOI: 10.1016/j.wasman.2017.07.044.

Ragaert, Kim; Delva, Laurens; van Geem, Kevin (Hg.) (2017b): Mechanical and chemical recycling of solid plastic waste (69).

Roux, Megan; Varrone, Cristiano (2021): Assessing the Economic Viability of the Plastic Biorefinery Concept and Its Contribution to a More Circular Plastic Sector. In: *Polymers* 13 (22). DOI: 10.3390/polym13223883.

Russell, Stuart J.; Norvig, Peter (2010): Artificial intelligence. A modern approach. 3. ed. Upper Saddle River, NJ: Prentice-Hall (Prentice-Hall series in artificial intelligence).

Sassanelli, Claudio; Rosa, Paolo; Terzi, Sergio (2021): Supporting disassembly processes through simulation tools: A systematic literature review with a focus on printed circuit boards. In: *Journal of Manufacturing Systems* 60, S. 429–448. DOI: 10.1016/j.jmsy.2021.07.009.

Schmidt, Jannick; Auer, Maximilian; Moesslein, Jochen; Wendler, Pascal; Wiethoff, Stefan; Lang - Koetz, Claus; Woidasky, Jörg (2021): Challenges and Solutions for Plastic Packaging in a Circular Economy. In: *Chemie Ingenieur Technik* 93 (11), S. 1751–1762. DOI: 10.1002/cite.202100110.

Vergleichsstudie Identifikationsverfahren – Forum Rezyklat

Schmidt, Jannick; Grau, Laura; Auer, Maximilian; Maletz, Roman; Woidasky, Jörg (2022): Multilayer Packaging in a Circular Economy. In: *Polymers* 14 (9). DOI: 10.3390/polym14091825.

Schubert, Heinrich (Hg.) (2012): Handbuch der Mechanischen Verfahrenstechnik. Partikeleigenschaften, Mikroprozesse, Makroprozesse, Schüttgut. Weinheim: Wiley-VCH. Online verfügbar unter <http://swb.ebib.com/patron/FullRecord.aspx?p=894832>.

Statistisches Bundesamt (2022): Abfallbilanz. (Abfallaufkommen/-verbleib, Abfallintensität, Abfallaufkommen nach Wirtschaftszweigen). Hg. v. Umweltbundesamt. Online verfügbar unter https://www.destatis.de/DE/Themen/Gesellschaft-Umwelt/Abfallwirtschaft/Publikationen/Downloads-Abfallwirtschaft/abfallbilanz-pdf-5321001.pdf?__blob=publicationFile, zuletzt geprüft am 21.03.2023.

VerpackG: Gesetz zur Fortentwicklung der haushaltsnahen Getrennterfassung von wertstoffhaltigen Abfällen. In: Bundesgesetzblatt, Jahrgang 2017, Teil 1 Nr. 45, S. 2234-2261.

Wagner, Jörg; Günther, Marko; Rhein, Hans-Bernhard; Meyer, Peter (2018): Analyse der Effizienz und Vorschläge zur Optimierung von Sammelsystemen (Hol- und Bringsysteme) der haushaltsnahen Erfassung von Leichtverpackungen und stoffgleichen Nichtverpackungen auf der Grundlage vorhandener Daten. Hg. v. Umweltbundesamt (TEXTE, 37/2018).

Wissenschaftlichen Dienste des Deutschen Bundestages (WDDb) (2018): Neuregelungen durch das Verpackungsgesetz gegenüber der Verpackungsverordnung. Hg. v. Deutscher Bundestag.

Woidasky, J.; Auer, M.; Schmidt, J.; Kusch, A.; Gasde, J.; Lang-Koetz, C. et al. (2021): „Tracer-Based-Sorting“ in der Verpackungs-Abfallwirtschaft. In: *Müll und Abfall* (7). DOI: 10.37307/j.1863-9763.2021.07.05.

Woidasky, J.; Schmidt, Jannick; Auer, M. (Hg.) (2023): Technologiesprünge beim Kunststoffrecycling!? Unter Mitarbeit von In: Stegmann, Rettenberger, Ritzkowski, Kuchta, Siechau, Heyer (Hg.):

Woidasky, Jörg; Gasde, Johannes; Lang-Koetz, Claus; Moesslein, Jochen (2020a): Tracer-Based Sorting als Querschnittstechnologie für die Kreislaufwirtschaft. In: Elisabeth Thomé-Kozmiensky, Olaf Holm, Bernd Friedrich und Daniel Goldmann (Hg.): Recycling und

Vergleichsstudie Identifikationsverfahren – Forum Rezyklat

Sekundärrohstoffe, Band 13. Nietwerder: Thomé-Kozmiensky Verlag GmbH (Recycling und Rohstoffe, 13), S. 256–266.

Woidasky, Jörg; Moesslein, Jochen; Wendler, Pascal; Kirchenbauer, Daniel; Wacker, Dirk; Gao, Guojun; Lang-Koetz, Claus (2020b): Kunststoffidentifikation und -sortierung in der Circular Economy durch Fluoreszenzmarker. In: *Chemie Ingenieur Technik* 92 (4), S. 1–12. DOI: 10.1002/cite.201900126.

Wotruba, Hermann; Feil, Alexander (2022): 9th Sensor-Based Sorting & Control 2022. 1. Aufl. Hg. v. Kathrin Greiff, Nils Kroell, Xiaozheng Chen, Devrim Gürsel und Vincent Merz: Shaker Verlag GmbH.

Wotruba, Hermann; Harbeck, Hartmut (2010): Sensor-Based Sorting. In: Ullmann's encyclopedia of industrial chemistry, Bd. 153. 7. edition, release 2015. Weinheim, Wiley online library: Wiley-VCH.

Zentrale Stelle Verpackungsregister (2018): Orientierungshilfe zur Bemessung der Recyclingfähigkeit von systembeteiligungspflichtigen Verpackungen. Hg. v. Zentrale Stelle Verpackungsregister. Osnabrück. Online verfügbar unter https://www.verpackungsregister.org/fileadmin/files/Mindeststandard/Orientierungshilfe_2018.pdf, zuletzt geprüft am 21.03.2023.

Zentrale Stelle Verpackungsregister (2021): Recyclingquoten 2020. Online verfügbar unter https://www.verpackungsregister.org/fileadmin/Auswertungen/ZSVR_Auswertungen_Recyclingquoten_2018_-_2020.pdf, zuletzt geprüft am 21.03.2023.

Zentrale Stelle Verpackungsregister (2022): Mindeststandard für die Bemessung der Recyclingfähigkeit von systembeteiligungspflichtigen Verpackungen gemäß § 21 Abs. 3 VerpackG. Hg. v. Zentrale Stelle Verpackungsregister. Osnabrück. Online verfügbar unter https://www.verpackungsregister.org/fileadmin/files/Mindeststandard/Mindeststandard_VerpackG_Ausgabe_2022.pdf, zuletzt geprüft am 21.03.2023.

Zhu, Shichao; Chen, Honghui; Wang, Mengmeng; Guo, Xuemei; Lei, Yu; Jin, Gang (2019): Plastic solid waste identification system based on near infrared spectroscopy in combination with support vector machine. In: *Advanced Industrial and Engineering Polymer Research* 2 (2), S. 77–81. DOI: 10.1016/j.aiepr.2019.04.001.