

Bericht

Projekttitle	Recyclingfähigkeit von Verpackungen Konkretisierung Untersuchungsrahmen und Kriterienkatalog
Auftraggeber	INTERSEROH Dienstleistungs GmbH
Projekt-Nr.	530592
Bearbeiter	Sarah Tschachtli, Thorsten Pitschke, Dr. Siegfried Kreibe, Alexander Martin
Durchsicht / Kommentierung:	Dr. Martin Schlummer, Katharina Kaiser (Fraunhofer IVV)

Augsburg, März 2019

INHALTSVERZEICHNIS

1	Veranlassung	1
2	Zentrale Aspekte der Bewertungsmethodik	1
3	Zielprozesse für die werkstoffliche Verwertung von Verpackungen.....	4
4	Übersicht Bewertungskatalog	18
5	Ebene 1: Zuordnung der Vp zum Erfassungssystem	21
6	Ebene 2: Sortierbarkeit gemischt erfasster Vp (LVP)	23
7	Ebene 3: Eignung für werkstoffliche Verwertung und Bereitstellen von Sekundärprodukten	31
8	Quantitative Bewertung der Recyclingfähigkeit	Fehler! Textmarke nicht definiert
	Literatur	48

1 Veranlassung

Zur Förderung eines recyclinggerechten Designs von Verpackungen ist der Dialog zwischen den Akteuren der Wertschöpfungskette wesentlich. Bereits heute bestehen einige, teils geschlossene Plattformen und Angebote zum Austausch. Dennoch besteht in der Breite weiterer Informationsbedarf zu den Anforderungen an die recyclingfreundliche Verpackungsgestaltung bei Entwicklern, Abfüllern und dem Handel. Potenziell starke Lenkungswirkung bietet dazu § 21 des Verpackungsgesetzes, der die Gestaltung der Lizenzentgelte für Verkaufsverpackungen in Abhängigkeit von der Recyclingfähigkeit vorsieht. Durch die ökologische Gestaltung der Lizenzentgelte sollen prinzipiell recyclingfähige Verpackungen mit geringen und nicht recyclingfähige Verpackungen mit höheren Beteiligungsentgelten belegt werden. § 21 Verpackungsgesetz adressiert die Frage einer konkreten Bewertung der Recyclingfähigkeit von Verpackungen an die am Lebensweg einer Verpackung beteiligten Akteure. Im Folgenden werden die zentralen Rahmenbedingungen für eine Methodik zur Bestimmung der Recyclingfähigkeit von Verpackungen vorgestellt. Den Ausgangspunkt der zugehörigen Überlegungen bilden u.a. die abfallwirtschaftlichen Regelungen zur Entsorgung von Verpackungen, das Kreislaufwirtschafts- sowie das Verpackungsgesetz und die Verpackungsverordnung in der derzeit gültigen Fassung. Zusätzlich wird dem in der DIN EN 13430 „Anforderungen an Verpackungen für die stoffliche Verwertung“ formulierten Rahmen Rechnung getragen.

Im Rahmen der im Februar 2019 durchgeführten Aktualisierung wurde der Bewertungskatalogs an die Vorgaben der Orientierungshilfe der Zentralen Stelle Verpackungsregister [ZSVR 2018] angepasst.

Ziel des Recyclings ist es, bei der Produktion von neuen Gütern den Rohstoff- und Energieeinsatz durch den Einsatz von recyceltem Material zu reduzieren. Unter dem Begriff der Recyclingfähigkeit versteht man grundsätzlich die Eigenschaft eines Produktes, die es erlaubt, die verwendeten Materialien nach Ende der Lebensdauer wieder dem Stoffkreislauf zu zuführen und damit den Stoffkreislauf zu schließen. Dabei kommt es bei dem Maß der Recyclingfähigkeit darauf an,

- wie die Verpackung gestaltet und beschaffen ist,
- in welcher Qualität und Quantität die Verpackungen den materialspezifischen Verwertungswegen zugänglich gemacht und dort behandelt werden können
- welche Sortier- und Verwertungstechniken seitens der Entsorgungswirtschaft eingesetzt werden, um einzelne Materialströme zu separieren und mit hoher Ausbeute in Zielfraktionen aufzukonzentrieren und
- welche Qualität das Recyclingprodukt erreicht, vor dem Hintergrund, dass ein Wiedereinsatz als Substitut von Primärmaterial angestrebt ist

2 Zentrale Aspekte der Bewertungsmethodik

2.1 Untersuchungsgegenstand

Entsprechend der Definition nach Verpackungsgesetz und der DIN 55405 „Verpackungen - Terminologie – Begriffe“ sind Verpackungen Produkte zur Aufnahme, zum Schutz, zur

Handhabung, zur Lieferung oder zur Darbietung von Waren, die vom Hersteller an den Benutzer oder Verbraucher weitergegeben werden.

Im Fokus dieses Konzeptes zur Bewertung der Recyclingfähigkeit stehen Verkaufsverpackungen. Verkaufsverpackungen fallen typischerweise nach Gebrauch beim Endverbraucher an und werden dann über die Sammelsysteme der dualen Systeme beziehungsweise im Fall pfandpflichtiger Getränkeverpackungen über das Pfandsystem des Handels erfasst. Die in der Regel eingesetzten Verpackungsmaterialien, auch als Packstoffe bezeichnet sind: Glas, Kunststoffe, Papier/Pappe/Kartonage (PPK), Aluminium, Weißblech und Kombinationen bzw. Verbunde dieser Materialien (z.B. Flüssigkeitskarton). Dabei finden in Verpackungen oftmals mehrerer Materialien, teils auch nur in kleinen Anteilen, Anwendung. Packhilfsmittel wie z.B. Etiketten oder Verschlüsse werden ebenfalls als Teil der Verpackung in der Bewertung der Verpackung berücksichtigt.

2.2 Abgrenzung Recyclingfähigkeit / Öko-Design

Für Hersteller und Entwickler von Verpackungen ist die Recyclingfähigkeit neben weiteren Faktoren, eine Dimension im übergeordneten Kontext des „Öko-Designs“ von Verpackungen. Weitere Aspekte, die in diesem Kontext diskutiert werden, sind beispielsweise:

- Ökobilanz als Methode zu Systematisierung und Bewertung von Umweltwirkungen über den gesamten Lebenszyklus der Verpackung. Dabei ist die Aussage über die Umweltwirkung immer eine Frage der Systemgrenzen der Betrachtung. Die Betrachtung fängt bei der Rohstoffgewinnung an und kann bis hin zum Wiedereinsatz als Rezyklat bei der Herstellung neuer Verpackungen oder der zusätzlichen Berücksichtigung der verpackten Ware gehen.
- Materialeffizienz als Strategie zur Reduzierung des Materialverbrauchs: Das gleiche Ergebnis soll mit weniger Material erzielt werden. Die Maßnahmen hierzu reichen von materialsparenden Fertigungsverfahren bis zur verbesserten Produktkonstruktion, von der Mitarbeiterschulung bis zur Kooperation mit Zulieferern und Kunden. Materialeffizienz ist primär ein Thema im Herstellungs- nicht aber im Recyclingprozess nach Gebrauchsende.
- Recycled Content als Maß für den Anteil von Sekundärmaterial im Neuprodukt. Das Hinwirken auf einen (hohen) Sekundärmaterialanteil ist eine Maßnahme die das Schließen von Stoffkreisläufen befördert.

Die genannten Aspekte des Öko-Designs von Verpackungen können sich auf verschiedene Lebenswegstufen beziehen, daher sind auch Zielkonflikte zwischen diesen Dimensionen möglich. Im Rahmen dieser Konzeption wird nur die Recyclingfähigkeit einer Verpackung bewertet, Rückschlüsse auf weitere Dimensionen des Öko-Design können aus dieser Bewertung nicht gewonnen werden.

2.3 Bewertung der Recyclingfähigkeit

Die Bestimmung der Recyclingfähigkeit muss in Bezug auf eine zugrunde liegende Verwertungsstruktur erfolgen (z.B. eingesetzte Erfassungs-, Sortier- und Aufbereitungsverfahren). Besondere Relevanz haben dabei die Art der Verwertung (i.S.v. werkstofflich, rohstofflich bzw. energetisch) und die Qualität der jeweiligen Verwertungsprodukte mit Blick auf die potenziellen Wiedereinsatzgebiete.

Das VerpackG (§21 Absatz 4) weist die Förderung der werkstoffliche Verwertung¹ den Bezugspunkt aus, auf den die Recyclingfähigkeit von Verpackungen Bezug nehmen sollte. Vor diesem Hintergrund werden im Rahmen der vorgestellten Methodik Verpackungen die nach Erfassung und Sortierung

- hochwertig werkstofflich verwertet werden können, als **recyclingfähig** bezeichnet. Eine werkstoffliche Verwertung zu Produkten, die ursprünglich eingesetzten Primärmaterialien potenziell ersetzen wird dabei als hochwertig bezeichnet. Die Verfügbarkeit hochwertiger Behandlungskapazitäten bzw. der Umfang einer hochwertigen werkstofflichen Verwertung wird in der Bewertung berücksichtigt.
- nur energetisch verwertet werden können als **nicht recyclingfähig** bezeichnet.

Die Bewertung von Recyclingfähigkeit beinhaltet auch den Aspekt, dass der Erfolg der werkstofflichen Verwertung für bestehende Recyclingströme beispielsweise hinsichtlich Qualität und Ausbeute durch eingetragene Störstoffe nicht gefährdet werden soll. Störende Substanzen, Materialien oder Materialkombinationen sind im Rahmen der Bewertung zu identifizieren und hinsichtlich der Möglichkeit zur Abtrennung und des Einflusses auf die Produktqualität zu bewerten.

Die Bewertung der Recyclingfähigkeit wird darauf abzielen effizient und valide das Potenzial zu ermitteln, ob und in welchem Umfang eine Verpackung bzw. die daraus separieren Materialien oder Materialkombinationen die jeweiligen physikalischen oder chemischen Anforderungen erfüllen, um entlang der Sortier- und Verwertungsprozesse im Pfad für eine hochwertige werkstoffliche Verwertung zu verbleiben.

Dabei ist ein für jede Verpackung spezifisch durchzuführender Praxistest an realen Verwertungsanlagen zum Quantifizieren einer realen Recyclingfähigkeit nicht vorgesehen. Die Prüfung der physikalischen oder chemischen Voraussetzungen der Eigenschaften erfolgt in aller Regel auf Basis von Produktinformationen und experimentellen Untersuchungen.

2.4 Betrachtungsgrenze

Die Bewertung der Recyclingfähigkeit umfasst prinzipiell die gesamte Entsorgungskette der Verpackungen ab Gebrauchsende. Diese Schritte sind:

- **Erfassung**
Abgabe der gebrauchten Verpackung an das jeweilige materialspezifische Erfassungssystem (inkl. möglicher Auftrennung durch den Konsumenten in Verpackungsmaterialien, Restentleerbarkeit, Abschätzung Fehlzuordnung Erfassungssystem, etc.)
- **Sortierung**
Sortierung gemischt erfasster Verpackungen
- **Aufbereitung**
Materialspezifische, werkstoffliche Verwertung der Verpackungsmaterialien und Bereitstellung eines Sekundärprodukts (z.B. Regranulat)

Entlang aller Stufen der Verwertungskette kann die Abtrennung von Verpackungsteilen erfolgen, die für eine hochwertige werkstoffliche Verwertung entweder nicht geeignet sind oder diesem Pfad verloren gehen. Im Rahmen der hier zu entwickelnden Methodik soll die Recy-

¹ Werkstoffliche Verwertung ist nach VerpackG die Verwertung durch Verfahren, bei denen stoffgleiches Neumaterial ersetzt wird oder das Material für eine weitere stoffliche Nutzung verfügbar bleibt

lingfähigkeit daher als eine graduelle Eigenschaft verstanden werden, die letztendlich die Relation von erwarteter Sekundärprodukt- und eingesetzter Verpackungsmaterialmenge bewertet.

Die Berücksichtigung der einzelnen Prozessschritte und Produkte der werkstofflichen Verwertung ist wichtig für die Bewertung der Recyclingfähigkeit. Allein die Bereitstellung einer Verpackung für einen hochwertigen werkstofflichen Verwertungsprozess als Indikator ihrer Verwertbarkeit, analog zur Berechnung von Verwertungsquoten, würde zu kurz greifen.

2.5 Status der referenzierten Entsorgungsstruktur

Die Bewertung der Recyclingfähigkeit erfolgt in Anlehnung an DIN EN 13430 (Verpackung - Anforderungen an Verpackungen für die stoffliche Verwertung) anhand der heute in Deutschland relevanten und industriell eingesetzten Erfassungs- und Verwertungsprozesse (Status-quo). Eine ausführlichere Beschreibung der materialspezifischen Verwertungsprozesse enthält Kapitel 3.

2.6 Zusammenfassung

Die Bewertung der Recyclingfähigkeit einer Verpackung charakterisiert den Anteil der in der Verpackung enthaltenen Materialien, die nach Sortierung und Verwertung wieder zur Herstellung von Produkten aus dem ursprünglichen Primärmaterial verwendet werden können. Dementsprechend werden zur Ermittlung der erwarteten Recyclingfähigkeit die chemischen und physikalischen Eignungen der Verpackung hinsichtlich ihrer Sortier- und Verwertbarkeit bewertet. Bezugspunkt für diese Bewertung sind die verpackungsmaterialspezifischen, in Deutschland relevanten und industriell eingesetzten Sortierungs- und Verwertungsprozesse.

3 Zielprozesse für die werkstoffliche Verwertung von Verpackungen

Verkaufsverpackungen werden nach Gebrauch getrennt vom Restabfall und materialspezifisch über die Sammelsysteme der dualen Systeme beziehungsweise im Fall pfandpflichtiger Getränkeverpackungen über das Pfandsystem des Handels erfasst.

Dabei sind zunächst auch das Verbraucherverhalten und die grundsätzliche Handhabbarkeit der Verpackungen bei der getrennten Erfassung zu berücksichtigen. Als Beispiel kann an dieser Stelle zum einen die Möglichkeit der Zuordnung zum Sammelsystem durch den Konsumenten genannt werden. Diese ist gegeben, sobald der Verpackungsabfall eindeutig dem dafür vorgesehenen Erfassungssystem zugeordnet werden kann. So kann Behälterglas beispielsweise als eindeutig sortierfähig eingestuft werden, da für den Konsumenten das Material Glas als solches klar erkennbar ist. Gleiches gilt für die Zuordnung metallischer Verpackungen in entsprechende separate Erfassungssysteme (sofern vorhanden). Dies kann ebenso für die eindeutig richtige Zuordnung der Verkaufsverpackungen aus Kunststoff in die dafür vorgesehenen Erfassungswege (Gelber Sack, Gelbe Tonne) angenommen werden. Schwieriger wird es, wenn die Verpackung aus verschiedenen Materialien besteht, die vom Konsumenten zu dem noch in einzelne Bestandteile aufgetrennt werden sollten (Beispiel Joghurtbecher: Deckel aus Aluminium, dünner Kunststoffkörper ummantelt mit Pappe). Da-

bei wird vom Konsumenten Eigenleistung für die Durchführung der technisch sachgerechten Sortierung verlangt. Nicht alle Konsumenten sind dazu bereit, weswegen auch hier mit Verlusten der einzelnen Verpackungsbestandteile zu rechnen ist.

Die folgende Darstellung der Aufbereitungsketten für verschiedene Verpackungsabfallanteile beschreibt einen breiten, nicht ausschließlichen Stand der Technik. Generell stellen die dargestellten Prozesse und Prozessketten das Verfahrensgerüst zur Bewertung einer Recyclingfähigkeit, d.h. diese dargestellten optischen und physikochemischen Behandlungsverfahren werden zur Bemessung der Recyclingfähigkeit herangezogen.

Prozessinnovationen im Aufbereitungssektor machen gegebenenfalls künftig eine Anpassung des beschriebenen Stands der Technik erforderlich.

3.1 Sortierung LVP-Gemische

Leichtverpackungen (LVP), d.h. Verkaufsverpackungen aus Kunststoff, Aluminium, Weißblech und Verbundstoffen wie Flüssigkeitskartons, werden meist im Gemisch gesammelt. Die Erfassung erfolgt überwiegend im Holsystem. Das LVP-Gemisch wird dann in Sortieranlagen in Fraktionen für die nachgelagerte Verwertung separiert. Das Sortierergebnis wird beeinflusst von vertraglichen und gesetzlichen Vorgaben sowie von Einflussgrößen, die der technischen Ausführung der Sortieranlage sowie deren Betriebsweise zuzuordnen sind. Der Stand der Technik der LVP-Sortierung ist heute charakterisiert durch eine in hohem Maße automatisierte Prozessgestaltung sowie eine Auftrennung von Kunststoffverpackungen nach Kunststoffarten. Bei der LVP-Sortierung nach Stand der Technik fallen grundsätzlich die Sortierfraktionen Weißblech/Fe-Metalle, Aluminium, PS, PE, PP, Mischkunststoffe (MKS), PET, PPK und Flüssigkeitskarton (FKN) an, die potenziell für eine werkstoffliche Verwertung geeignet sind. Eine einheitliche Vorgabe, in welche Produktpalette zu sortieren ist, existiert nicht. Die Qualitätsanforderungen für diese Fraktionen (Produktspezifikationen) z.B. hinsichtlich ihrer Reinheit sind in einem gemeinsamen Katalog der Systembetreiber dargelegt². Die wesentlichen Schritte einer Sortierung des LVP-Sammelgemisches nach Stand der Technik sind in Abbildung 3-1 dargestellt (siehe auch [Dehoust et al. 2012]):

- Aufschluss der Gebinde (beispielsweise Gelber Sack) zur mechanischen Freilegung der Verpackungsabfälle
- Siebklassierung als Vorbereitung für die größenabhängigen Sortierstufen und zur Abtrennung von kleinteiligen Sortierresten (<20 mm)
- Windsichtung der Fraktionen >220 mm und 20 – 220 mm zur Abtrennung von Kunststofffolien bzw. einer Fraktion flexibler **Mischkunststoffe (MKS)**
- Magnetscheidung zur Gewinnung von **Weißblech** bzw. **Fe-Metallen**
- Abtrennen von **Flüssigkeitskarton (FKN)** mittels Nah-Infrarot-Sensorik aus der Fraktion 20 – 220 mm (Windsichterschwer- und -leichtfraktion) und dem Teilstrom aus der Wirbelstromabscheidung
- Wirbelstromscheidung zur Gewinnung von **Aluminium**
- Mehrfachsortierung der formstabilen Kunststoffe insb. mittels Nah-Infrarot-Sensorik (NIR). In der Regel werden vier Fraktionen an Kunststoffarten (**PET, PS, PE und PP**), eine **MKS (formstabil)** und eine **PPK** Fraktion erzeugt.

² Für detaillierte Informationen siehe <https://www.gruener-punkt.de/de/download.html>

- Manuelle Kontrolle der automatisiert abgetrennten Sortierfraktionen

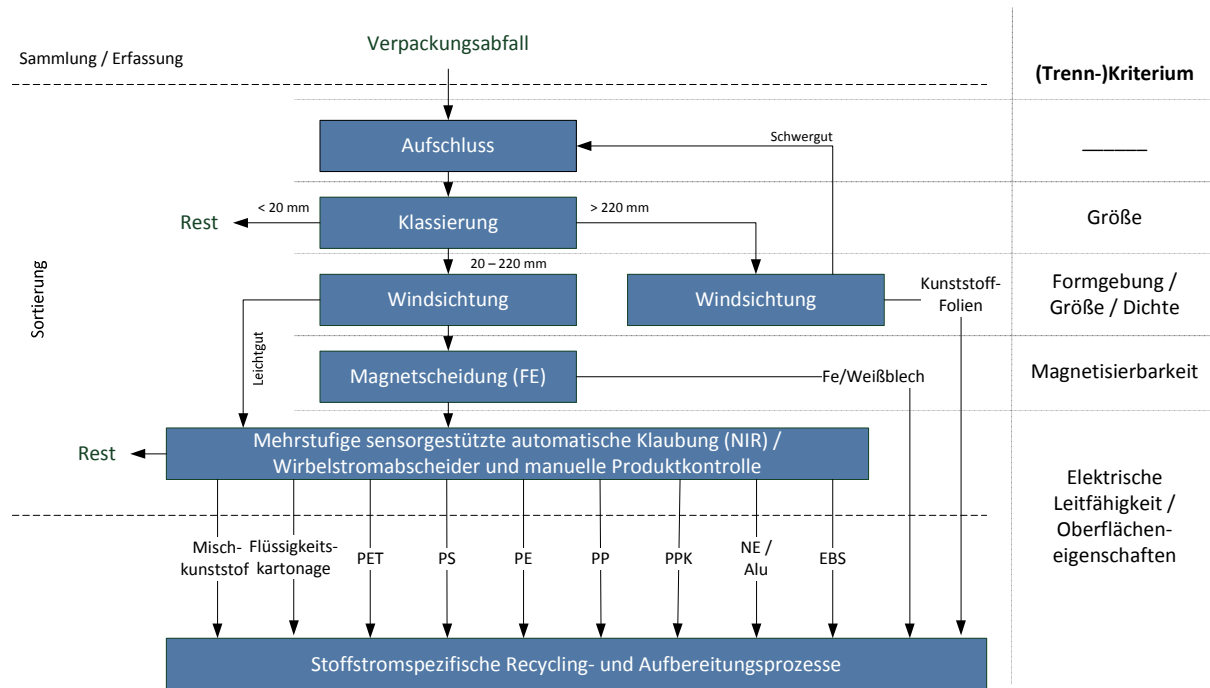


Abbildung 3-1: Prozessschritte LVP-Sortierung

Die aus den Sortieranlagen resultierenden Sortierfraktionen sollen bestimmte Sortierspezifikationen erfüllen, um für die nachgelagerten Verwertungsschienen geeignet zu sein. Bei der Betrachtung der Recyclingfähigkeit spielt der Punkt Sortierfähigkeit nach Stand der Technik eine zentrale Rolle. Die typischen Sortierfraktionen sind:

- Kunststoffarten: PP, PE, PET, PS, Folien > DIN A4 und Mischkunststoffe
- Metalle: Aluminium, Weißblech
- Papierfaserhaltige Fraktionen: Flüssigkeitskartons, PPK-Verbunde
- Sonstige: Sortierreste, heizwertreiche Fraktion (EBS)

3.2 PE, PP, PS und Folien

Beim Recycling von Verpackungskunststoffen geht es hauptsächlich um die Massenkunststoffe der Kategorie Thermoplaste. Thermoplaste lassen sich innerhalb bestimmter Temperaturbereiche verformen. Sofern keine Überhitzung und somit Schädigung des Materials erfolgt, ist dieser Prozess in gewissem Umfang wiederholbar. Wie oft diese Wiederholung stattfinden kann, hängt im Wesentlichen von der Qualität, sprich Reinheit, des Stoffstromes ab. Unter den Thermoplasten werden die Polyolefine Polypropylen (PP) und Polyethylen (PE) im Verpackungsbereich besonders häufig eingesetzt.

Aus den LVP-Sortieranlagen werden die Sortierfraktionen mit entsprechenden Spezifikationen den weiteren stoffstromspezifischen Verwertungsstufen zugeführt. Der grundsätzliche Verfahrensablauf bei der weiteren Verarbeitung ist in Abbildung 3-2 dargestellt.

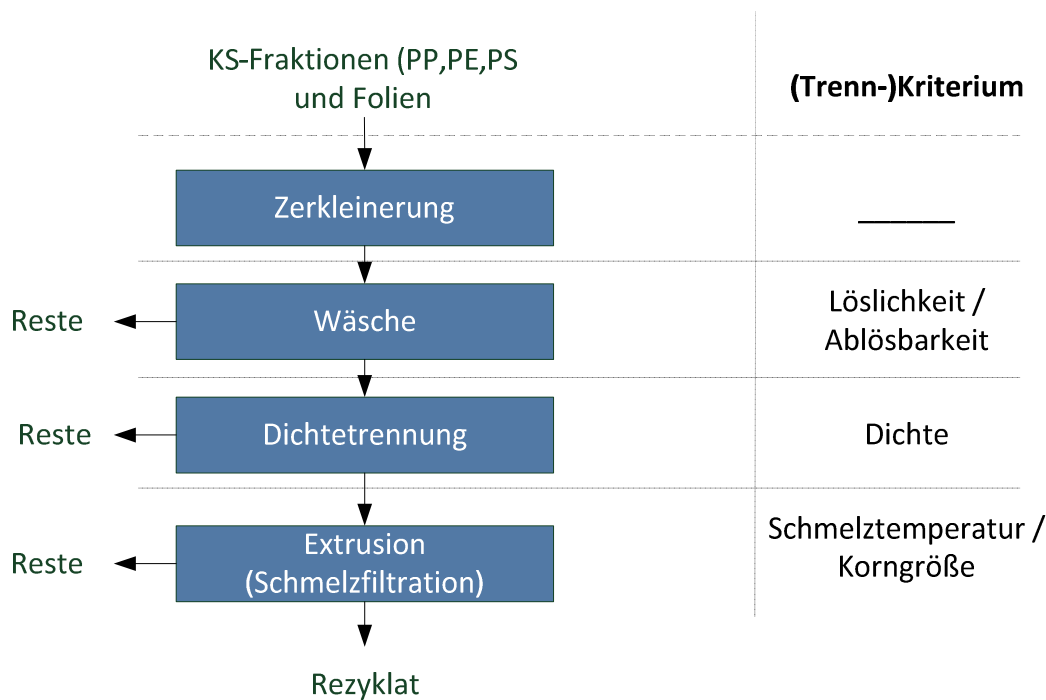


Abbildung 3-2: Prozessschritte für das Recycling von Standardverpackungskunststoffen [UBA, 2016-1]

Bei der weiteren Verarbeitung von Kunststoffverpackungen aus PP, PE und PS werden im Wesentlichen die oben dargestellten Prozessschritte durchlaufen. Die Sortierfraktionen aus PP, PE und PS weisen eine Reinheit von mindestens 94 % auf. Im Rahmen der Verwertung ist der erste Schritt nach der Ballenöffnung die Zerkleinerung der Kunststoffteile. Bei der anschließenden intensiven Wäsche sollen u.a. Reste des Füllmaterials, Anhaftungen, Etiketten etc. soweit als möglich entfernt werden. Dabei werden in der Regel keine Waschsubstanzen hinzugegeben, da den Kunststoffartikeln zumeist noch genügend Tenside anhaften, um einen ausreichenden Reinigungseffekt zu gewährleisten. Materialverbunde, die sich im Waschprozess nicht auflösen lassen, können in den weiteren Prozessschritten zu Herausforderungen führen.

In einer anschließenden Dichtentrennung im Schwimm-Sink-Verfahren werden Zielkunststoff (Schwimmfraktion für PE- oder PP-Recycling bzw. Sinkfraktion bei PS-Recycling mit 2-stufiger Dichtentrennung) und Störanteile abgetrennt, um die Reinheit der Polymerfraktion weiter zu erhöhen. Dies stößt jedoch an seine Grenzen, sofern Materialien mit sehr ähnlichen Dichten voneinander getrennt werden sollen oder Anhaftungen (z.B. Multilayer oder PPK-Reste) am Zielpolymer dessen originäre Dichte verändern.

Der Hauptverarbeitungsschritt hin zum Rezyklat ist die Extrusion inklusive Schmelzefiltration der getrockneten Kunststoffteile. Im Extruder wird das Material aufgeschmolzen, homogenisiert, entgast und filtriert.

Die Folien-Fraktion wird noch vor der Metallabscheidung im Rahmen der Klassierung des LVP-Gemisches abgetrennt. I.d.R. sind die so abgeschiedenen Folien größer DIN A4 und bestehen zum überwiegenden Anteil aus LDPE. Die Folien werden anschließend zerkleinert und zu Mahlgut aufbereitet. Da das so gewonnene Mahlgut jedoch eine geringe Schüttdichte aufweist, was für den Weitertransport zur Verwertungseinheit wirtschaftlich ungünstig ist, wird als Zwischenschritt eine Agglomeration durchgeführt. Durch Reibung erwärmt sich das

Mahlgut, schmilzt auf und verbindet sich mit anderen Teilchen wodurch es zu einem kompakteren Teilchen verklebt. Teilweise wird noch vor der Agglomeration eine Waschstufe eingeführt. Dadurch können Klebstoffe, Getränke- und Lebensmittelreste abgewaschen werden. Auch Etiketten (und anderes anhaftendes Papier) werden so abgelöst. Die Wäsche wird in Abhängigkeit des Zielprozesses durchgeführt. Sofern das Mahlgut zu einem Regranulat oder gar zu einem Produkt weiterverarbeitet werden soll, wird die Wäsche durchgeführt. Wenn Verunreinigungen und Anhaftungen im weiteren Verarbeitungsprozess keine nachteilige Auswirkungen haben, wird der Waschprozess nicht durchlaufen, da dieser die Kosten für das Regranulat erheblich beeinflusst. Anschließend wird der Kunststoff im Extruder homogenisiert, geschmolzen und meist zu Regranulat verarbeitet.

3.3 PET

Derzeit konzentriert sich das PET-Recycling auf transparente PET-Flaschen aus dem Pfandsystem oder der LVP-Sortierung. Formstabile Verpackungen aus PET, wie Schalen oder Trays, werden aktuell nicht werkstofflich recycelt³

Die Verwertung von PET-Flaschen muss zum einen in den bottle-to-bottle Kreislauf und zum anderen in die Produktion von PET-Flakes zum Einsatz im Non-Food-Bereich differenziert werden. In Abbildung 3-3 sind die wesentlichen Schritte dargestellt.

³ Vergleiche „Falscher PET-Einsatz: „Das kann so nicht bleiben!““ <https://www.k-zeitung.de/falscher-pet-einsatz-das-kann-so-nicht-bleiben/150/1085/81998/>

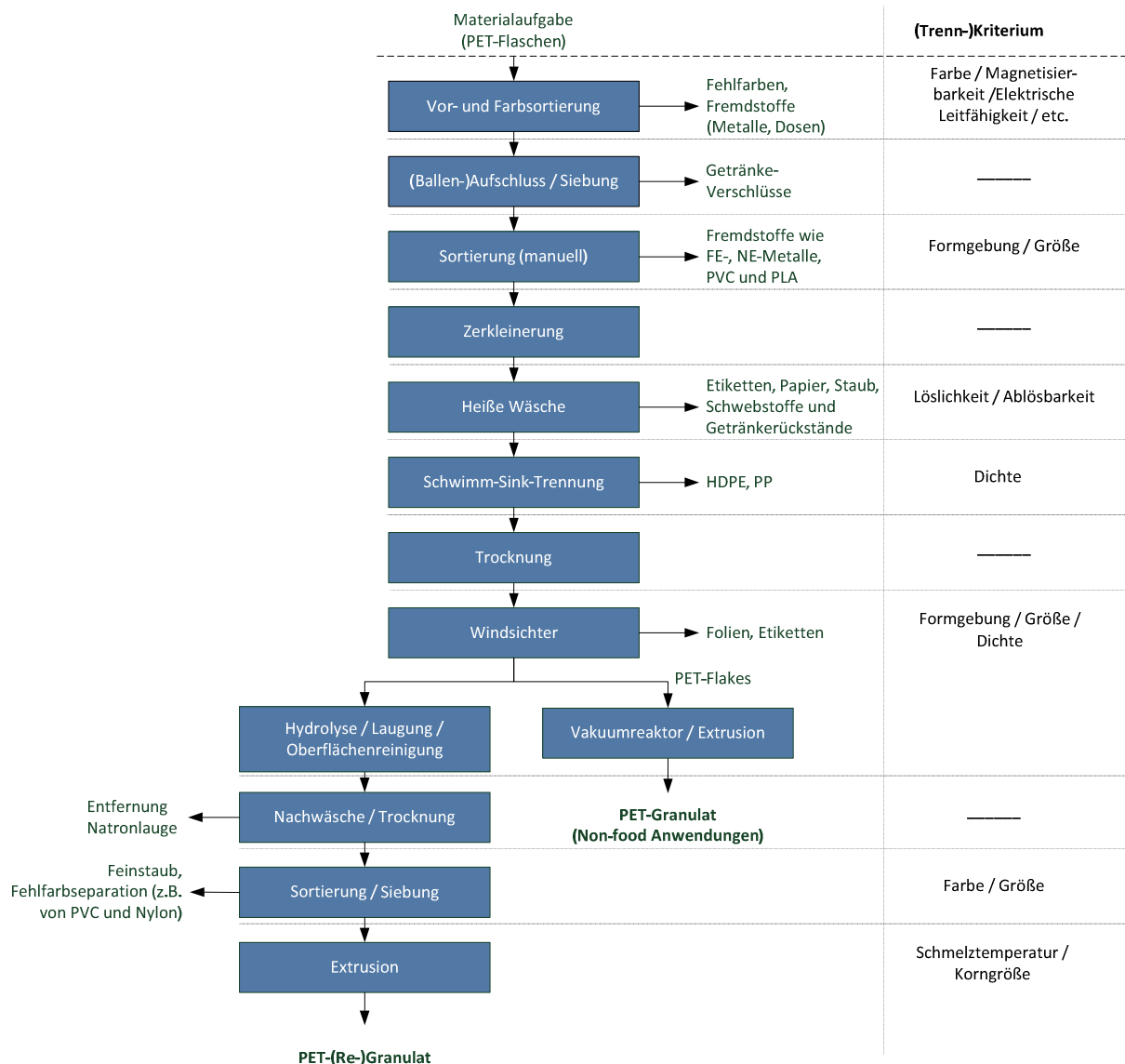


Abbildung 3-3: Prozessschritte PET-Recycling (bottle-to-bottle links und Non-Food rechts), nach [UBA_2016-1]

Die erfassten PET-Flaschen werden nach der Vorsortierung in einer Mühle zu „Flakes“ zerkleinert und mit heißem Wasser und unter Zusatz von Lauge von Etiketten, Getränkerückständen und weiteren Schmutzpartikeln gesäubert. Verschlüsse, etc. werden im Rahmen einer Schwimm-Sink-Trennung ausgeschleust. Ein Recycling des Verschlussmaterials (PE, PP) wird üblicherweise durchgeführt. Die PET-Flakes verbleiben auf Grund ihrer höheren Dichte in der Sinkfraktion, werden getrocknet und in einem Windsichter von weiteren Störstoffen befreit.

Im URRC-Verfahren zur Herstellung lebensmitteltauglicher PET-Flakes wird dann in einer Hydrolyse durch die Zugabe von Natronlauge die Oberfläche der Flakes, einschließlich anhaftender Verunreinigungen, abgelöst und das Material dadurch vollständig gereinigt. Nach dem Abwaschen der Lauge wird das PET getrocknet und verbleibende Fremdmaterialien abgetrennt. In der abschließenden Extrusion werden die PET-Anteile in Regranulate bzw. bei der PET-Flaschenproduktion in eine „Preform“ umgeformt.

Für Anwendungen des PET-Rezyklats in Non-Food Bereich existieren andere Verfahrensweisen. Beispielsweise ist das Vacurema-Verfahren dem URRC-Verfahren sehr ähnlich, es findet jedoch keine Hydrolyse statt, sondern direkt eine Extrusion und eine Verarbeitung des Rezyklats beispielsweise in Folien oder Fasern.

Problematisch bei der Schmelzfiltration von PET ist u.a., dass bedingt durch die hohe Schmelztemperatur von PET organische Störanteile bis in das Rezyklat verschleppt werden und dessen Qualität erheblich mindern. So werden beispielsweise PA-Copolymere in das Produkt eingetragen und können dort zu einer gelblichen Färbung des Rezyklats führen, dass dann nur noch zur Produktion farbiger Flaschen eingesetzt werden kann.

3.4 Mischkunststoffe (MKS)

Anteile der MKS eignen sich, analog zu den separierten Kunststoffarten, für eine Verarbeitung zu Kunststoffzwischenprodukten (z.B. Regranulate) und stehen damit potenziell einem breiten Kunststoff-Anwendungsspektrum offen. Soweit die MKS derartig werkstofflich verwertet werden, gelten die grundlegenden Verfahrensschritte des nassmechanischen Kunststoffrecycling (Zerkleinern, Waschen, Dichtentrennung und Extrusion; vergleiche auch Abbildung 3-2), wobei die Produkthanforderungen im Vergleich zu Regranulat aus Kunststoffarten in der Regel weniger anspruchsvoll sind.

MKS werden oftmals aber auch in trockener Prozessführung, beispielsweise über Intrusionsverfahren, direkt in fertige Produkte überführt (z.B. Lärmschutzwände, Bauzaunfüße), wobei allerdings in der Regel nicht die Verwendung von Primärkunststoffen substituiert wird⁴. Die feinkörnigen Mischkunststoffe werden hierbei nach einer Agglomeration unter Zugabe von Farbstoffen und/oder Folienagglomeraten in Intrusionsprozessen zu Produkten weiterverarbeitet [Bosewitz, 2013].

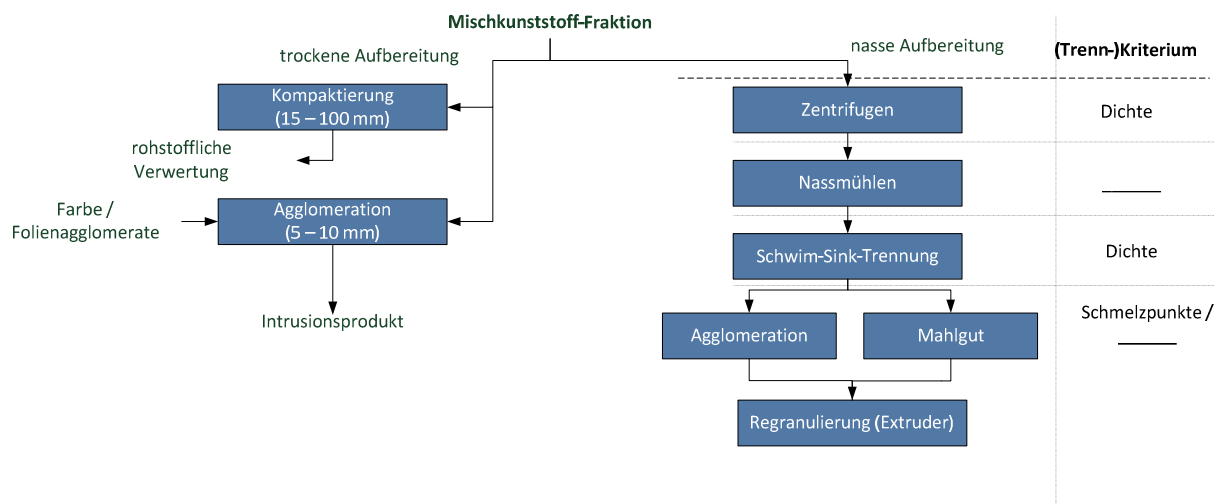


Abbildung 3-4: Übersicht der Verarbeitungswege von Mischkunststoffen [Bosewitz, 2013].

Die nassmechanische Aufbereitung zur Regranulaterzeugung z.B. für Spritzgussanwendungen ist die höchste Veredelungsstufe für die Mischkunststofffraktion. Die Differenzierung der unterschiedlichen Kunststoffe wird hierbei erst nach dem Aufschluss u.a. durch Dichtentrennverfahren vorgenommen. Nicht der Regranulierung zugeführte Anteile werden über den

⁴ Nach [Consultic 2015] finden sich etwa 60% der werkstofflich verwerten MKS in derartigen Produkten wieder.

EBS-Pfad verwertet. Die Regranulatausbeute, aber auch die -qualität hängen von der Ausgangszusammensetzung, von Feuchte, Restanhaftungen, Etikettierung etc. und insbesondere dem Anteil formstabiler Polyolefine ab. Je nach Mischkunststoffqualität sind Ausbeuten zwischen 40 und 60 % zu verzeichnen.

3.5 Flüssigkeitskarton (FKN) und PPK aus LVP (PPK-Verbunde)

Für das Ausgangsmaterial FKN besteht der Anspruch, dass die Reinheit nach Sortierung bei mindestens 90 % liegt. Ziel der Aufbereitung ist es hier, die Zellstofffasern für die Papierfabriken zurück zu gewinnen. Das bedeutet, dass der Kunststoff-Aluminium-Anteil schonend vom Karton gelöst werden muss, wofür eine eigene Prozesslinie nötig ist, was nur in wenigen Anlagen in Deutschland realisiert worden ist.

Wesentlicher Bestandteil des Recyclings von FKN ist der Waschprozess, in welchem die Trennung der Fasern von Aluminium- und Kunststoffanteilen erfolgt. Dazu wird das Material vorher geschreddert und anschließend in eine große, ca. 30 Meter lange Waschtrommel geleitet. Unter Zugabe von Wasser (es werden keine Chemikalien verwendet) wird das Gemisch in der rotierenden Trommel zerfasert. Am Ende der Trommel wird der Faserbrei durch kleine Öffnungen abgeschwemmt, wodurch die Trennung von den Folienresten mit dem Aluminiumanteil erfolgt. Der Faserbrei wird über Reinigungsstufen noch von Fremdstoffen befreit und anschließend, nach einer Eindickung, den Verarbeitungslinien zur weiteren (Alt)Papierherstellung zugeleitet. Die Rejekte, bestehend aus dem Folien-Aluminium-Anteil, kommen zu einem großen Teil in der Zementindustrie zum Einsatz. Zum einen liefern die Folienreste Energie die zur Brennung des Klinkers benötigt wird, zum anderen wird das Aluminiumoxid dazu verwendet, die Abbinde-Eigenschaften des Zements zu verbessern. In Abbildung 3-5 sind die wesentliche Schritte beim Recycling von FKN dargestellt. [FKN, 2007]

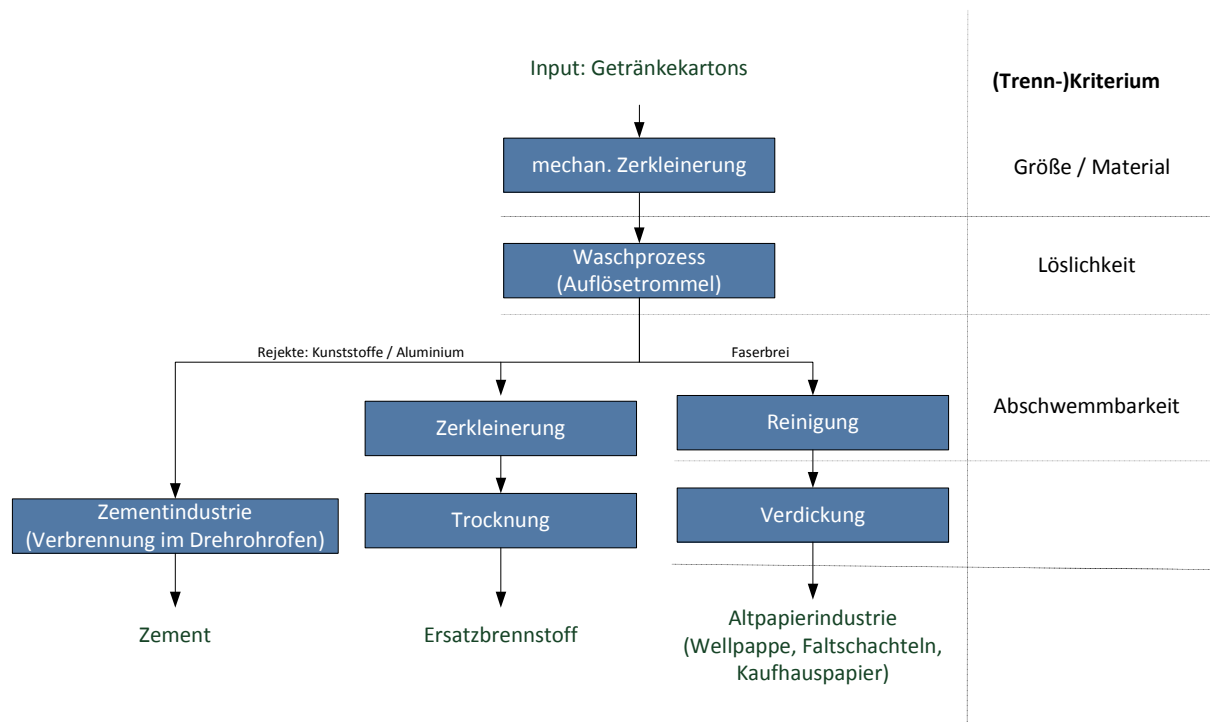


Abbildung 3-5: Prozessschritte Flüssigkeitskartonrecycling [FKN, 2007].

Problematisch in der weiteren Verwertung ist die Kunststoff-Aluminiumfraktion. Ein Trennen dieser beiden Komponenten ist nicht ohne weiteres möglich⁵.

Bei Verwertung der verbundmaterialreichen Sortierfraktion PPK aus LVP sind die wesentlichen Prozessschritte ähnlich wie bei der Verwertung der FKN-Fraktion. Das Ziel ist hier ebenfalls die Rückgewinnung des Faseranteils. Wesentlicher Prozessschritt ist auch hier ein Waschvorgang mit entsprechenden Verweilzeiten, sodass die Verbunde voneinander gelöst werden können. Bestandteile, die nicht voneinander gelöst werden können, werden als Rejekte ausgeschleust und üblicherweise der thermischen Verwertung zugeführt.

3.6 Aluminium

Aluminium als Teil der LVP-Fraktion findet sich häufig in Folien und Verbundverpackungen. Bei dem Recycling von Aluminium aus der LVP-Sammlung hat sich die Pyrolyse etabliert. In Abbildung 3-6 sind die wesentlichen Schritte des Verfahrens dargestellt (vergleiche [GDA, W 18] und [Erdmann et al. 2009]):

- Zerkleinerung
- Abtrennen von Störanteilen über Magnet- / Wirbelstrom- und Schwimm-Sink-Abscheider
- Pyrolyse (Drehrohrpyrolyse mit nachgeschalteter Bankglühe) zur Entfernung organischer Störanteile

⁵ In Finnland wird ein Verfahren eingesetzt, in welchem die Folienfraktion in einem Gasreaktor bei ca. 400 C erhitzt wird. Die Kunststoffe werden dabei in die Gasphase überführt, das Aluminium bleibt in fester Form erhalten und kann separiert werden. Mit dem Gas wird Dampf erzeugt, welcher für Trocknungsprozesse in der Papierindustrie oder zur Energieerzeugung in einer Turbine genutzt wird. Das Aluminium wird separiert und dem weiteren Recycling zugeführt.

- Schmelze in der Regel unter Zugabe von Schmelzsalmen und Abtrennen oxidischer Aluminiumanteile

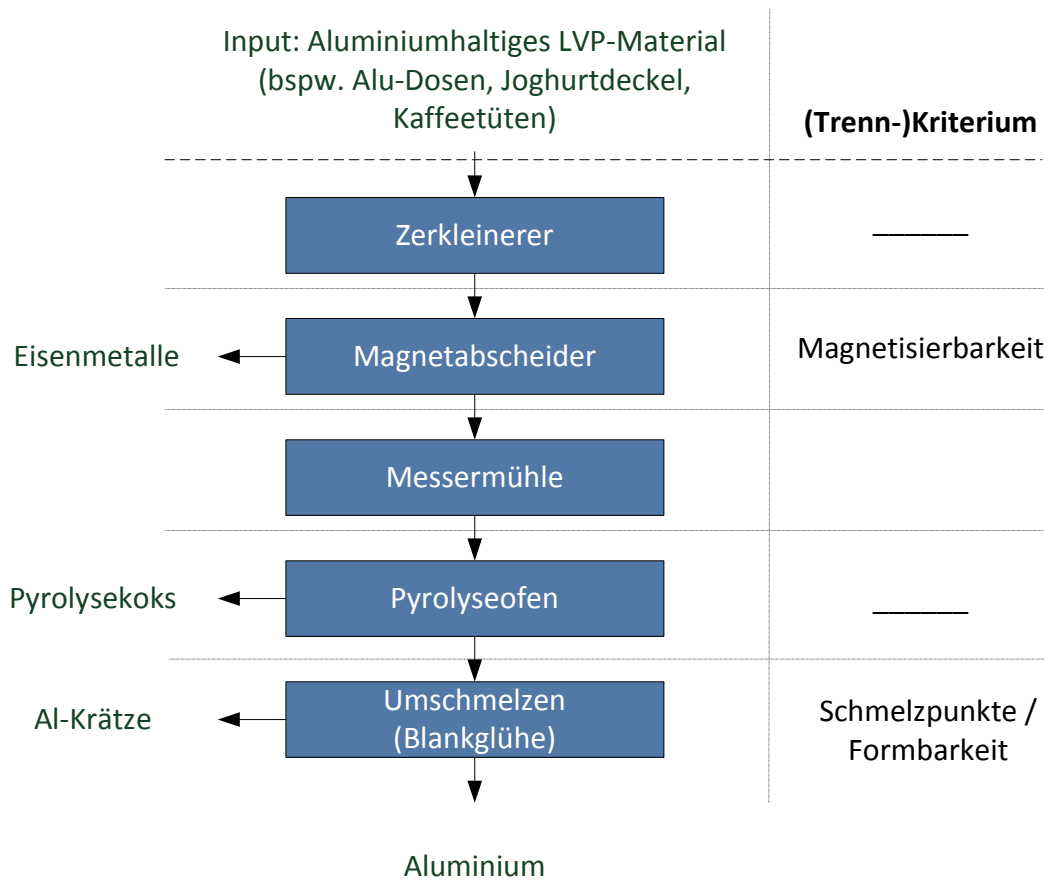


Abbildung 3-6: Recyclingverfahren von LVP-Aluminium, [GDA, W 18]

Da reines Aluminium als Werkstoff für viele Anwendungen und Einsatzgebiete zu weich ist, müssen andere Metalle wie Silizium, Kupfer oder Magnesium beigemischt werden, um die gewünschte Festigkeit zu erlangen. Diese Legierungen können ggfs. im Recyclingprozess nicht aufgetrennt werden. Daher sind Analysen zur Zusammensetzung der Legierung am Anfang des Prozesses wichtig, sodass unter Zugabe von reinem Aluminium im Konverter / Ofen eine neue Rezeptur / Legierung gekocht werden kann.

Ein weiteres Problem bei dem Recycling von Aluminium stellen Beschichtungen auf den Metallteilen dar. Aluminium ist als unedles Metall ein sehr reaktionsfreudiges Element und geht einfach Verbindungen mit anderen Stoffen ein. Beim Einschmelzen des Aluminiums entsteht als Reststoff die sogenannte Krätze, welche noch einen hohen Metallgehalt hat und einer weiteren Verwertung zugeführt werden müsste, um diese hohen Metallanteile wieder nutzbar zu machen. Durch Zugabe von Salzen (i.d.R. Chloride) wird der Anteil der entstehenden Krätze minimiert, wodurch jedoch wiederum Salzschlacke entsteht, die entsorgt werden muss. [GDA, W 18]

3.7 Weißblech / Fe-Metalle

Weißblech- bzw. Fe-Metallverpackungen, als Teil der LVP-Sammlung oder im Bringsystem erfasst, gelangen vorzugsweise in Form von Getränke- oder Konservendosen in den Ab-

fallstrom. Weißblechverpackungen lassen sich aufgrund ihrer ferromagnetischen Eigenschaften hervorragend vom übrigen LVP-Gemisch separieren.

Die zur Aufbereitung durchgeführten Schritte sind (vergleiche Abbildung 3-7):

- Zerkleinerung zum Aufschluss des Materials
- Abtrennen metallischer und organischer Störanteile u.a. über NE-Abscheider und Sichter
- Schmelze durch Einsatz im Elektro-Lichtbogenofen bzw. im Sauerstoffkonverter bei Einsatz in der Hochofenroute

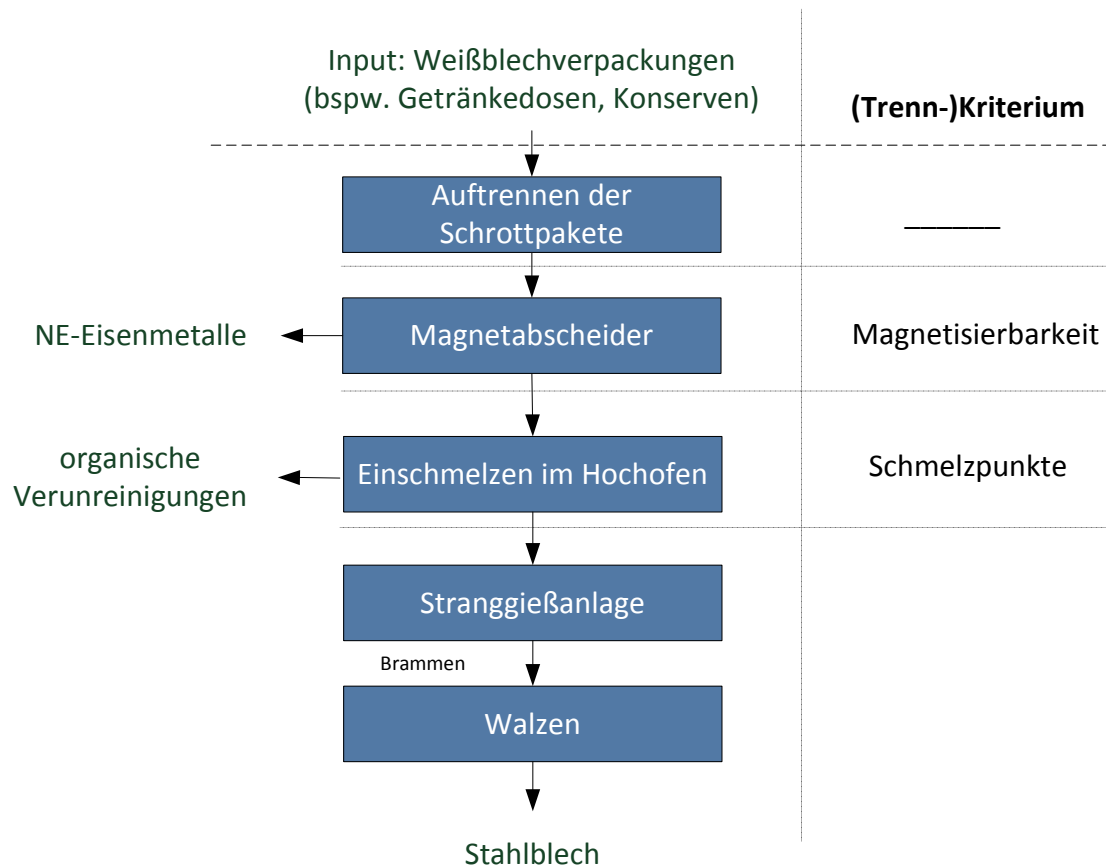


Abbildung 3-7: Recyclingverfahren von LVP-Weißblech

Nachdem die Schrottpakete wieder aufgetrennt wurden, wird über einen Magnetabscheider eine weitere Separierung von Nichteisenmetallen vorgenommen. Anschließend werden die Metallabfälle im Hochofen oder Konverter wieder eingeschmolzen und verarbeitet, sodass sie der Stahlindustrie in Form von Stahlblechen zugeführt werden können. Organische Verunreinigungen werden dabei durch das Einblasen von Sauerstoff oxidiert. Andere anorganische Elemente gehen entweder als Legierungsbestandteile⁶ in das Metall über oder werden als Schlacke abgetrennt [UBA, 2016-1].

⁶ Um im Falle des Weißblechs das Zinn vom Stahlblech zu trennen, werden die Abfälle zuvor einer Elektrolyse zugeführt.

3.8 PPK

Für im Hol- oder Bringsystem getrennt von anderen Verpackungsabfällen erfasstes PPK inklusive Verkaufsverpackungen existiert ein materialspezifischer Verwertungsweg. Die wesentlichen Ausgangsmaterialien für das Recycling von PPK sind grafische Papiere, Wellpappe, Karton und weitere Verpackungspapiere. Die zur Verwertung eingesetzten Prozessschritte dienen dem Ziel, das Altpapier bzw. die Fasern von Verunreinigungen und Störstoffen zu separieren und dann die Fasern für die Papierproduktion verfügbar zu machen. Die wesentlichen Schritte bei Trockensortierung gemischter PPK sind nach Stand der Technik (vergleiche auch Abbildung 3-8):

- Klassierung bzw. Abtrennung von Grob- und Feingut mittels Ballistikseparatoren
- Magnetscheidung zur Separierung von Eisenmetallen
- Mechanische Pappenseparation beispielsweise mithilfe eines Rotorsiebes
- Sortierung des Stoffstromes über Nah-Infrarot-Scansysteme (NIR)
- Manuelle händische Nachsortierung

Anschließend erfolgt die weitere Aufbereitung im Papierwerk in den folgenden Schritten:

- Das Altpapiermaterial wird in einem Pulper mit Wasser suspendiert (Auslösung/Zerfaserung).
- Der suspendierte Faserstoff wird dann einer Reinigung u.a. mit Hilfe von Klassieraggregaten und Wirbelschleudern unterzogen (Reinigung).
- Pigmente, Lös- und Bindemittel der Druckfarben werden von den Fasern gelöst und entfernt. Beim Flotations-Deinking wird in einer Flotationszelle der Papiermasse Wasser, Natronlauge und Seife zugesetzt. Luftdüsen erzeugen einen Schaum, an dessen Bläschen sich die Druckfarbenbestandteile anhängen. Sie treiben an die Oberfläche und werden abgetrennt (Druckfarbenentfernung / Deinking).

Die im Rahmen der Aufbereitung abgetrennten Rejekte (Schmutzstoffe, nicht lösbare Bestandteile) werden größtenteils energetisch verwertet.

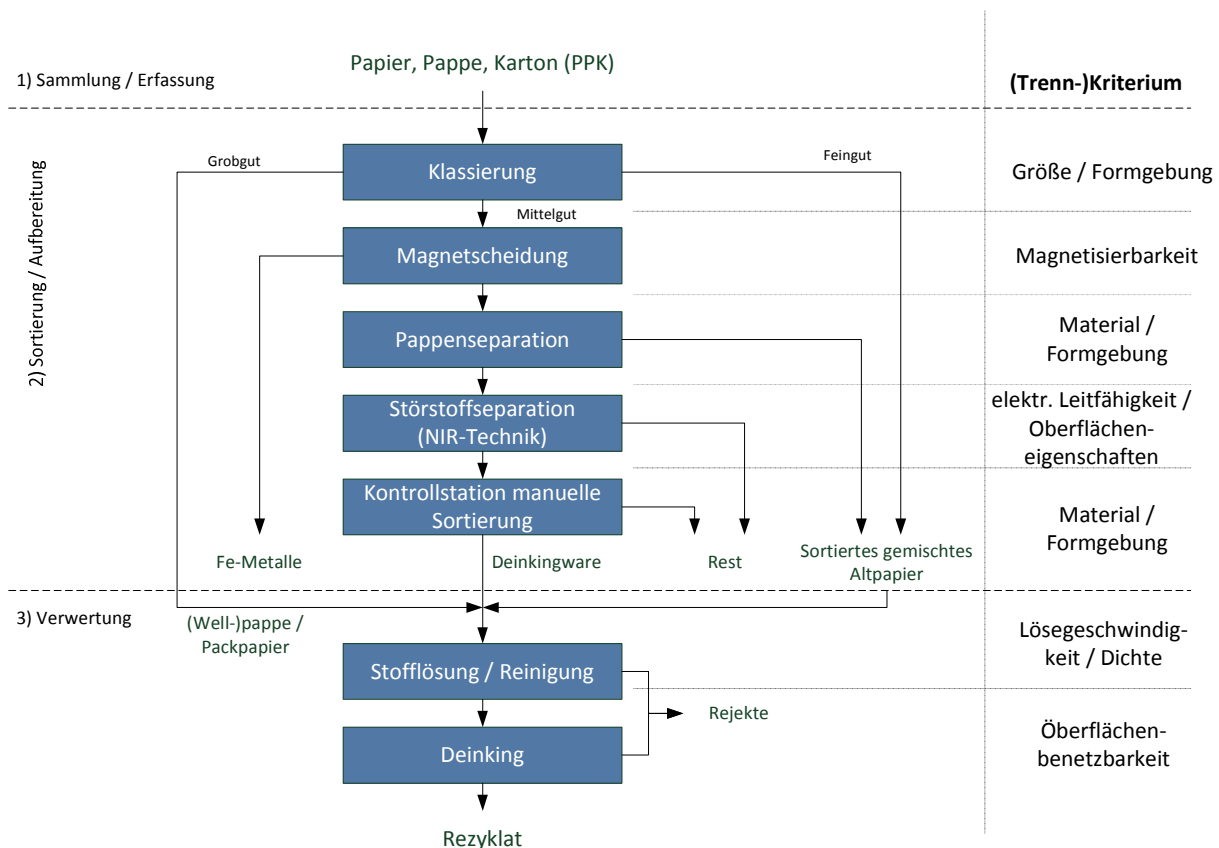


Abbildung 3-8: Prozessschritte PPK-Recycling [UBA, 2016-1].

Eine Herausforderung für das Recyclingverfahren stellen u.a. Druckfarben dar, die mit den gängigen Deinkingverfahren nicht vom Altpapier gelöst werden können. Probleme bereiten auch spezielle klebende Verunreinigungen, sogenannte Stickys (bspw. aus Haftetiketten oder Schmelzklebern in Broschüren), die fragmentiert werden und damit nicht mehr abtrennbar sind. Stickys können im weiteren Verfahren zu Schäden führen. Sie können sich an Maschinenteilen ablagern, die mit der Papierbahn in Kontakt sind, und zu Papierbahn-Abrissen führen [Gruber, 2011].

3.9 Behälterglas

Für das überwiegend im Bringsystem farblich getrennt erfasste Behälterglas existiert ein materialspezifischer Verwertungsweg. Die Reinheit des Altglases ist die zentrale Anforderung des Prozesses. Die wesentlichen Schritte der Aufbereitung sind dabei (vergleiche [bvse 2016, [Erdmann et al. 2009]):

- Grob- und Farbsortierung
- Zerkleinerung z.B. mit Hilfe eines Prallbrechers und Klassierung, um für die nachgeschalteten Sortieraggregate einen optimalen und homogenen Abfallstrom zu gewährleisten.
- Wäsche zur Ablösung von Etiketten sowie Beschichtungsresten (Frikionswäsche). Durch die damit verbundene Reinigung können die Glasanteile im späteren Prozessverlauf besser von den Keramik-Stein-Porzellan (KSP) Bestandteilen unterschieden werden.
- Abtrennung von Fe- (Magnetabscheider) sowie NE-Metallen (Wirbelstromscheider)

- Mittels Windsichter werden leichte, flächige Verunreinigungen (beispielsweise Kunststoffe) abgetrennt.
- Keramik, Steine und Porzellan (KSP) sowie Fehlfarben werden über optoelektronische Systeme selektiert.
- Nachsortierung (Siebung, Klassierung), um letzte Fehlfarben und Fremdstoffe zu entfernen.

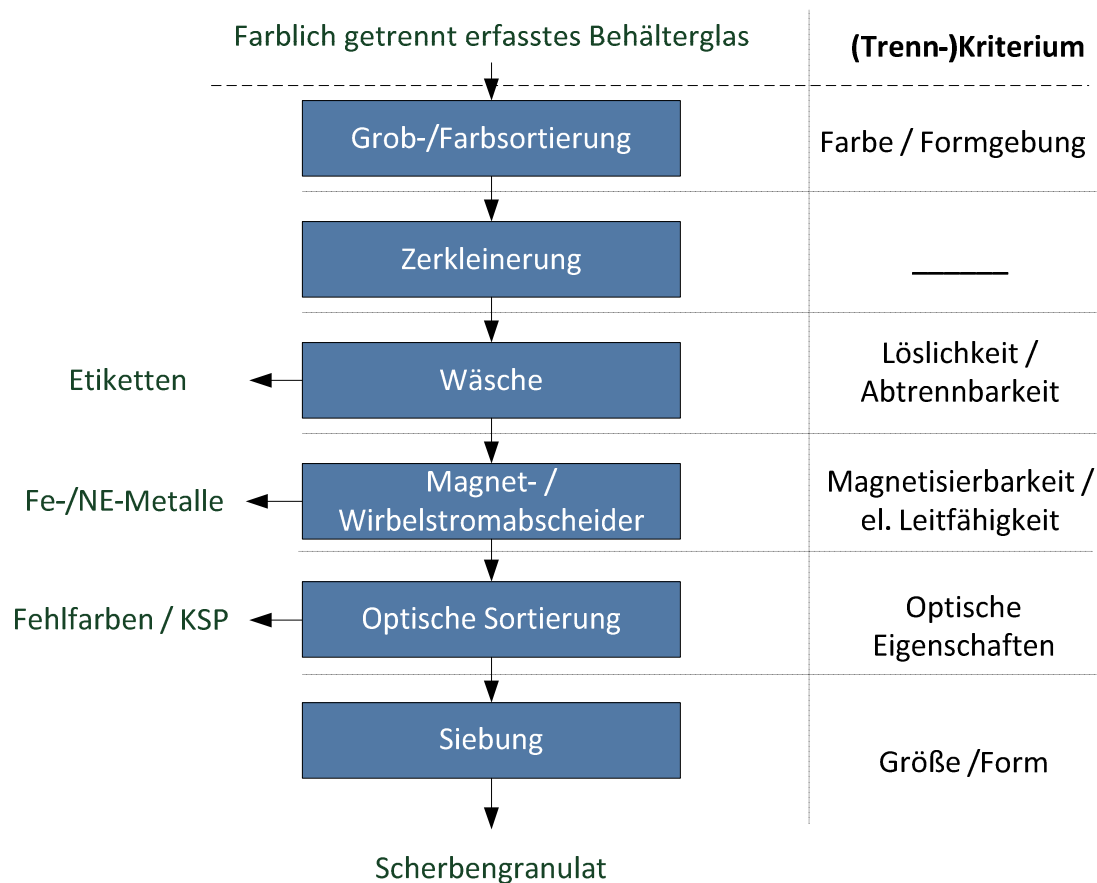


Abbildung 3-9: Prozessschritte Behälterglasrecycling

Am Ende des Prozesses steht ein Glasgranulat zur Verfügung, das qualitativ den ursprünglichen Rohstoffen für die Behälterglasherstellung entspricht. In der anschließenden Verwertung in der Glashütte wird das aufbereitete Altglas mit Sand, Soda, Kalk und Zuschlagstoffen vermischt erhitzt und geschmolzen.

4 Übersicht Bewertungskatalog

Im Folgenden wird ein breit anwendbares Standard-Vorgehen zur Bewertung der Recyclingfähigkeit von Verpackungen⁷ beschrieben.

Die Bewertungssystematik gliedert sich in drei Ebenen, die jeweils durch spezifische Bewertungskriterien ausgestaltet werden:

- Bewertungsebene 1: Zuordnung der Verpackung zum Erfassungssystem
- Bewertungsebene 2: Sortierbarkeit gemischt erfasster Verpackungen (LVP)
- Bewertungsebene 3: Eignung für werkstoffliche Verwertung und Bereitstellen von Sekundärprodukten

In Ebene 1 wird die Zuordenbarkeit der Verpackung zum vorgesehenen Erfassungssystem beleuchtet.

Ebene 2 bewertet die Recyclingfähigkeit mit Blick auf das Zielmaterial im Wesentlichen dahingehend, ob im Anschluss an die Erfassung im Gemisch mit anderen Verpackungen eine Identifizierbarkeit bzw. Sortierbarkeit der zu bewertenden Verpackungen zur Bereitstellung für die werkstoffliche Verwertungsverfahren gegeben ist. Zentrale Identifikationsmerkmale gemischt erfasster Verpackungen sind die Magnetisierbarkeit (Weißblech-Verpackungen), die elektrische Leitfähigkeit (Al-Verpackungen) und NIR Identifizierbarkeit der Oberfläche (Kunststoffe, PPK, Flüssigkeitskarton).

Unter der Voraussetzung, dass die Verpackung in der Sortierung i.d.R. in die für das Zielmaterial vorgesehene Sortierfraktion⁸ ausgelesen wurde, werden in Ebene 3 schließlich Ausbeute und Qualität des aus der Verpackung gewonnenen Sekundärmaterials bewertet. Zentrale Kriterien sind dabei der Anteil abtrennbarer und nicht-verwertbarer Verpackungsanteile und störende Einträge in das Sekundärprodukt bzw. den Recyclingprozess.

Voraussetzungen und Annahmen für die Bewertung einer Verpackung sind, dass

- die Verpackung im Rahmen der dualen Systems lizenziert ist bzw. lizenzierungsfähig ist
- der Konsument die Verpackung oder Verpackungsbestandteile dem vorgesehenen Erfassungssystem für Verpackungen - vorbehaltlich des in Kapitel 5.1 beschriebenen Kriteriums - ausnahmslos korrekt zuordnet
- der Konsument nach Gebrauch die gesamte Verpackung, d.h. ohne Abtrennung einzelner Verpackungsbestandteile, an das vorgesehene Erfassungssystem abgibt. Ausnahmen bilden dabei Verpackungsbestandteile,
 - die zum Gebrauch des Inhalts immanent und irreversibel abgetrennt werden müssen (z.B. Klarsichtfolie um CD-Hüllen, Einweg-Abreißverschluss, Kronkorken) oder
 - die lose mit dem Packmittel verbunden sind und daher ohne Trennmaßnahme durch den Konsumenten (wie z.B. schneiden, drehen, reißen) vollständig vom Packmittel zu trennen sind (z.B. Umverpackungen, Einlegeböden, Schachteln für Süßigkeiten)

Für diese Verpackungsbestandteile ist die Recyclingfähigkeit getrennt vom eigentlichen Packmittel zu bewerten.

Nicht berücksichtigt werden die vom Konsumenten möglicherweise vorgenommene Trennung von händisch zerlegbaren Verpackungskombinationen und deren materialspezifische

⁷ Definitionen des Verpackungsbegriffes nach VerpackV Anhang V (zu § 3 Abs. 1 Nr. 1).

⁸ zum Umgang mit Sonderfällen für die Betrachtung in Ebene 3 siehe Abbildung 7-1

Abgabe an die entsprechenden Erfassungssysteme (ein „3K-Joghurtbecher“ würde demzufolge als eine Verpackungseinheit aus Kunststoffbecher, Papier-Mantel und Kunststoff-/Al-Deckel bewertet).

- der Verpackung ein Zielmaterial des Recyclingprozesses zugeordnet wird.
Da die weitere Sortierung (Ebene 2) und Aufbereitung (Ebene 3) von Verpackungen grundsätzlich materialspezifisch erfolgt, muss die Art des bestimmenden Verpackungsmaterials im Verständnis des Gutstoffs oder Zielmaterial für den weiteren Recyclingprozess festgelegt werden. Nach [ZSVR 2018] ist bei Verpackungen aus Weißblech oder Aluminium sowie metallhaltigen Verbundverpackungen⁹ (ausgenommen Metallisierungen) stets das jeweilige Metall Zielmaterial des Recyclings. Ansonsten wird unter Zielmaterial in der Regel das Verpackungsmaterial (Packstoff) mit dem größten Gewichtsanteil an der Verpackung verstanden. Hat in Ausnahmefällen ein Material, das nur als Packhilfsmittel, z.B. für Verschlüsse oder Ummantelungen, verwendet wird den größten Gewichtsanteil, wird das Zielmaterial abweichend anhand dem der Verpackung zu Grunde liegenden Packmittel¹⁰ (z.B. Becher, Beutel, Dose, Flasche, Schale, Tray, Tube) bestimmt.

Aufgrund der großen Vielfalt und Entwicklungsdynamik bei der Gestaltung von Verpackungen kann es im Einzelfall möglich werden, dass anhand spezieller Informationslagen oder Sachverhalte¹¹ eine Bewertung der Recyclingfähigkeit abweichend vom Standardvorgehen zielführend ist. Abweichungen vom Standardvorgehen sind dann entsprechend auszuweisen und zu begründen.

In der folgenden Tabelle sind die Kriterien zur Bewertung der Recyclingfähigkeit und deren Relevanz für die möglichen Zielmaterialien zusammengefasst.

⁹⁹ siehe §3 /5 VerpackG für Verbunddefinition

¹⁰ Verpackungskomponente, die den Hauptbestandteil der Verpackung bildet und zur Aufnahme von Packgut bestimmt ist. Sie dient seinem teilweisen oder vollständigen Umhüllen und bildet im Endzustand einen offenen oder geschlossenen Hohlkörper. (vergleiche DIN 55405).

¹¹ U.a. bei der Bewertung von Verpackungen aus Holz oder Keramik

Tabelle 4-1: Übersicht Kriterienkatalog. X = Kriterium für entsprechendes Zielmaterial anzuwenden.
Vp = Verpackung

Kriterium	Kurzbezeichnung	PE	PS	PP	PET	FKN,PPK-Verb.	Weißblech / Fe	Aluminium	PPK	Glas
Ebene 1 Zuordnung der Verpackung zum Erfassungssystem										
Ist das vorgesehene Erfassungssystem der Vp für den Verbraucher zuordenbar?	Erfassungssystem zuordenbar	X	X	X	X	X	X	X	X	X
Ebene 2: Sortierbarkeit gemischt erfasster Verpackungen										
Ist die Vp groß genug?	Mindestgröße	X	X	X	X	X		X		
Identifizierbarkeit Weißblech-Vp: Ist die Vp magnetisierbar? (Magnetisierbarkeit) ¹⁾	Magnetisierbarkeit	X	X	X	X	X	X			
Identifizierbarkeit Al-Vp: Ist die Vp elektrisch hinreichend leitfähig? (Leitfähigkeit) ¹⁾	Leitfähigkeit	X	X	X	X	X		X		
Identifizierbarkeit Vp aus Kunststoff, FKN, PPK-Verbund, PPK und Glas: Ist die Vp anhand der Oberfläche erkennbar?	Oberflächeneigenschaften	X	X	X	X	X			X ²⁾	X ²⁾
Ebene 3 Eignung für werkstoffliche Verwertung und Bereitstellen von Sekundärprodukten										
Kann für die Vp eine hochwertige Verwertung erwartet werden?	Hochwertigkeit Verwertungsweg	X	X	X	X	X	X	X	X	X
Enthält die Vp nicht verwertbare Anteile, die im Rahmen der Aufbereitung abgetrennt werden können?	Abtrennbare, nicht verwertbare Anteile	X	X	X	X	X	X	X	X	X
Erfolgt über die Vp ein Eintrag von (nicht abtrennbaren) Verunreinigungen mit Risiko der Kontaminierung des Recyclingprodukts bzw. der Störung des Recyclingprozesses?	Nicht abtrennbare Anteile bzw. Verunreinigungen	X	X	X	X	X	X	X	X	X

¹⁾ Zielmaterial Kunststoff bzw. PPK-Verbund (nicht FKN): Prüfen hinsichtlich Identifikation aufgrund von WB- bzw. Al-Minderanteilen

²⁾ Vp aus Glas und PPK werden getrennt vom LVP-Gemisch als Monomaterial erfasst. Eine Identifizierung von PPK (über NIR) und Glas (über optische Sortierung) als Zielmaterial findet deshalb nicht im Rahmen einer LVP-Sortierung, sondern nachgelagert im eigentlichen werkstofflichen Verwertungsprozess statt. Dessen unbenommen wird die Bewertung der Identifizierbarkeit aus Gründen der Übersichtlichkeit formal Ebene 2 zugeordnet. Im Regelfall (Ausnahmen siehe [ZSVR 2018] bzw. Tabelle 6-7) ist die Identifizier- bzw. Sortierbarkeit von Vp aus Glas und PPK als gegeben anzunehmen.

5 Ebene 1: Zuordnung der Vp zum Erfassungssystem

5.1 Ist das vorgesehene Erfassungssystem der Vp für den Verbraucher zuordenbar? (Erfassungssystem zuordenbar)

Erläuterung

Zur Sicherstellung der Recyclingfähigkeit bei Sortierung und Aufbereitung muss der Konsument die Verpackung nach Gebrauch dem vorgesehenen Erfassungssystem zuführen. Der Verbraucher hat dabei grundsätzlich zu entscheiden, ob die Verpackung für LVP-, PPK- oder Behälterglassammlung vorgesehen ist¹². Verpackungen, in denen LVP-Materialien (z.B. Kunststoffe und Aluminium) mit PPK kombiniert sind, können deshalb unter Umständen zu Herausforderungen bei der Zuordnung führen¹³. Dies kann besonders bei Verpackungsgestaltungen in Form von Verbunden oder mit prägnant ausgeprägten Packhilfsmitteln (z.B. umschließende Papp-Etiketten für Joghurt-Becher) sein. Entsorgungshinweise bieten eine Möglichkeit bei potenziell schwierig zuordenbaren Verpackungsgestaltungen den Verbraucher bei seiner Entscheidung zu unterstützen.

Operative Durchführung Bewertung

Tabelle 5-1: Bewertung des Kriteriums Erfassungssystem zuordenbar

Aspekt	Erläuterung
Fachlicher Informationsbedarf zur Bewertung	Verpackungsmaterialien, Gewichtsanteile, Zielmaterial (Definition siehe Kapitel 4)
Bewertungsmethode, Werkzeug	Bestimmung anhand der zur Verfügung gestellten Verpackungsprobe. Sollte das Zielmaterial nicht eindeutig erkennbar sein, dann Durchführung entsprechender Laboranalysen zu den eingesetzten Materialarten und deren Gewichtsanteilen

¹² Getrennterfassung von metallischen Verpackungen in manchen Städten oder Landkreisen ebenfalls möglich

¹³ Bei Kombinationen von LVP-Material (in der Regel als Verschlüsse) mit Behälterglas oder möglicherweise Fe-Metall werden vereinfachend keine Schwierigkeiten bei der Zuordnung zum materialspezifischen Erfassungssystem angenommen.

Tabelle 5-2: Bewertung des Kriteriums Erfassungssystem zuordenbar

Klassifizierung / Bewertung	Erläuterung Einordnung
Vorgesehenes Erfassungssystem für Verbraucher intuitiv <u>problemlos</u> zuordenbar	Packmittel besteht nur aus den LVP-Materialien Kunststoff, Aluminium, Weißblech oder Papier bzw. Behälterglas. Packhilfsmittel aus Papier (Etiketten) haben nur einen geringen Gewichtsanteil (deutlich kleiner 20 Massen-%)
Vorgesehenes Erfassungssystem für Verbraucher intuitiv <u>eingeschränkt</u> zuordenbar	Packmittel ist FKN oder Packmittel ist ein Verbund auf PPK-Basis bzw. Packmittel ist Kunststoff und Packhilfsmittel aus PPK haben einen erheblichen Gewichtsanteil (deutlich größer 20 Massen-%). Die Verpackung enthält aufgedruckte Hinweise zur vorgesehenen Erfassung (nur der Aufdruck eines Recyclingsymbols analog dem „Grünen Punkt“ genügt nicht).
Vorgesehenes Erfassungssystem für Verbraucher intuitiv <u>schwer</u> zuordenbar	Packmittel ist ein Verbund auf PPK-Basis bzw. Packmittel ist Kunststoff und Packhilfsmittel aus PPK haben einen erheblichen Gewichtsanteil an der Verpackung. Die Verpackung enthält keine aufgedruckten Hinweise zur vorgesehenen Erfassung.
Vorgesehenes Erfassungssystem für Verbraucher <u>nicht</u> zuordenbar	Packmittel ist weder Kunststoff, FKN, PPK-Verbund, Aluminium, Weißblech oder Papier bzw. Behälterglas

6 Ebene 2: Sortierbarkeit gemischt erfasster Vp (LVP)

6.1 Ist die Vp groß genug? (Mindestgröße)

Erläuterung

Die Mindestgröße einer Verpackung ist ein wichtiges Merkmal für den Sortiererfolg von gemischt erfassten LVP. Unterschreitet die Verpackung eine Mindestgröße, so ist sehr wahrscheinlich, dass diese bereits in den ersten Schritten der Sortierung ausgeschleust wird d.h. sie erfährt nicht die erforderliche Sortiertiefe für ein hochwertiges Recycling. Eine Ausnahme bilden dabei eisenmetallische Verpackungen bzw. Verpackungsteile (z.B. Kronkorken), die in aller Regel auch aus kleinteiligen Materialströmen mit hohem Sortiererfolg abgetrennt werden:

- Die Klassierung des Ausgangsmaterials in zwei bis drei Größenklassen erfolgt mit Trommelsieben¹⁴. Die Eingrenzung des Kornspektrums auf ein festgesetztes Minimum bzw. Maximum ist notwendig, um sicherzustellen, dass die nachfolgenden Sortieraggregate effizient arbeiten können. Verpackungen, die die Mindestgröße unterschreiten, können nur eingeschränkt der richtigen Zielfraktion zugeordnet werden.
- Die Luftdüsenleiste einer NIR-Sortiereinheit hat zwischen jedem Ausblaselement (Luftdüse) einen Abstand (siehe Abbildung 6.1). Üblicherweise liegen die Düsenabstände in einem Bereich von 12,5 – 37,5 mm. Verpackungen, die kleiner als der Düsenabstand sind, werden mit geringerer Wahrscheinlichkeit, Verpackungen von ausreichender Mindestgröße mit hoher Wahrscheinlichkeit ausgetragen werden.

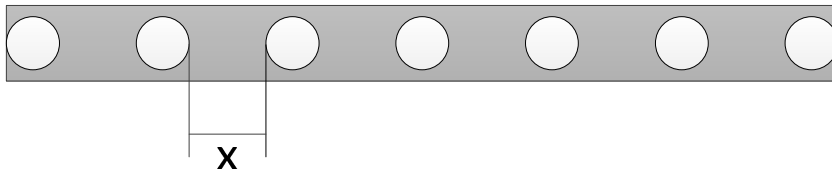


Abbildung 6.1: Schematische Darstellung einer NIR-Luftdüsenleiste mit einem Düsenabstand von 12,5 – 37,5 mm

Üblicherweise liegt die untere Korngröße in der Klassierung (Trommelsiebung) in einem Bereich von 20 bis 50 mm. Als erforderliche Mindestgröße für Verpackungen werden deshalb 20 mm angesetzt, da so auch ein Abtrennen mittels NIR-Sortiereinheit noch möglich ist.

Operative Durchführung Bewertung

Tabelle 6-1: Bewertung des Kriteriums Mindestgröße

Aspekt	Erläuterung
Fachlicher Informationsbedarf zur Bewertung	Größe, Abmessungen der Verpackung.
Bewertungsmethode, Werkzeug	Bestimmung mittels augenscheinlicher Betrachtung der Verpackungsprobe, bedarfsweise ergänzt durch einen Laborversuch (Laborversuch: Vermessen der Verpackung bzw. die Verpackung darf eine runde Öffnung mit einem Durchmesser 20 mm nicht passieren)

¹⁴ Entweder wird ein großes Trommelsieb mit zwei Siebquerschnitten oder zwei Trommelsieben mit jeweils einem Siebquerschnitt eingesetzt.

Tabelle 6-2: Bewertung des Kriteriums Mindestgröße

Klassifizierung / Bewertung	Erläuterung Einordnung
Vp hat eine ausreichende Größe	Vp ist in zwei Abmessungen größer als 20 mm
Vp hat <u>keine</u> ausreichende Größe	Vp ist in zwei Abmessungen kleiner als 20 mm

6.2 Identifizierbarkeit Weißblech-Vp: Ist die Vp magnetisierbar? (Magnetisierbarkeit)

Erläuterung

Verpackungen, die sich magnetisieren lassen, können mit hoher Trennschärfe und Ausbeute vom Verpackungsstrom abgetrennt werden. Üblicherweise ist ein Überbandmagnet nach dem Klassierungsprozess oberhalb eines Förderbandes oder einer Abwurfkante mit einem Abstand von max. 1 m angebracht. Damit die Verpackungen abgetrennt werden können und in den vorgesehenen Verwertungspfad für Eisenverpackungen gelangen, müssen diese ausreichende ferromagnetische Eigenschaften aufweisen.

Für Verpackungen werden normalerweise Weißbleche (Eisen) in Form von z. B. Blechdosen eingesetzt. Etiketten, Ummantelungen oder Schutzschichten aus Kunststoffen wirken sich in aller Regel nicht negativ auf die Sortierung mittels Magnetscheider aus. Es wird davon ausgegangen, dass der Eisenanteil der Weißblechverpackungen für gewöhnlich ausreichend hoch ist und eine Magnetscheidung gewährleistet ist.

Operative Durchführung Bewertung

Tabelle 6-3: Bewertung des Kriteriums Magnetisierbarkeit

Aspekt	Erläuterung
Fachlicher Informationsbedarf zur Bewertung	Magnetisierbarkeit bzw. Fe-Anteil
Bewertungsmethode, Werkzeug	Die Magnetisierbarkeit ist ein Trennmerkmal, das einen hohen Sortiererfolg ermöglicht. Ist WB das Material mit größten Gewichtsanteil an der Vp kann pauschal davon ausgegangen werden, dass die Verpackung uneingeschränkt sortiert werden kann. Bei Vp mit geringeren WB-Anteilen (Minderanteile, dennoch ist WB Zielmaterial) ist die Identifizierbarkeit abzuschätzen. Im Zweifelsfall sind Anlagen- bzw. Laborversuche durchzuführen. Für einen Laborversuch wird folgender Aufbau vorgeschlagen: Für die Laborversuche soll ein quaderförmiger Ferrit-Permanentmagnet eingesetzt werden. Die Maße des Magneten sollten mindestens 10*10*5 cm betragen. Der Magnet wird in einem Abstand von 5 cm ¹⁵ über die zu prüfende Vp angebracht. Die Vp muss in verschiedenen Lageoptionen unter dem Magnet getestet werden. Wenn die Vp in allen Lagen durch den Magnet angehoben wird, ist die Vp als magnetisierbar zu bewerten.

¹⁵ Abstand für den beschriebenen Labormagneten (10*10*5 cm). Für andere Labormagnete muss der Abstand ggfs. angepasst werden.

Tabelle 6-4: Bewertung des Kriteriums Magnetisierbarkeit

Klassifizierung / Bewertung	Vereinfachte Bewertung	Anlagen-/ Technikumsversuch
Detektion WB uneingeschränkt möglich.	WB ist Zielmaterial und Material mit dem größten Gewichtsanteil an der Vp (z.B. Dose) Kein Versuch erforderlich, da pauschal angenommen wird, dass eine Detektion in jedem Fall gegeben ist	WB ist Zielmaterial, obwohl WB nicht den größten Gewichtsanteil an der Vp hat (z.B. metallhaltiger Verbund) Detektion von WB findet in allen untersuchten Lagen statt
Detektion WB eingeschränkt oder nicht möglich	-	Findet die Detektion von WB nur in einem Teil der untersuchten Lagemöglichkeiten statt, <u>wird das Sortierverhalten der Vp anhand des Materials mit größten Gewichtsanteil (z.B. Kunststoff, oder Papier) bewertet</u>

6.3 Identifizierbarkeit Al-Vp: Ist die Vp elektrisch hinreichend leitfähig? (Leitfähigkeit)

Erläuterung

Anhand der elektrischen Leitfähigkeit einer Verpackung ist es möglich gezielt eine Nichteisenmetallfraktion (insbesondere Aluminium) zu erzeugen. Zum Abtrennen dieser Fraktion werden Wirbelstromscheider eingesetzt. Diese nutzen für die Abscheidung die Entstehung von Wirbelströmungen in elektrisch leitfähigen Materialien bei sich ändernden Magnetfeldern aus. Dabei ist es prinzipiell unerheblich, ob die leitfähige Schicht (z. B. Aluminiumfolie) von anderen Schichten (PPK, Kunststoff) umschlossen wird. Grundsätzlich steigt der Ausbringerfolg mit der Flächenausdehnung und der Schichtdicke des Nichteisenmetalls sowie dem Al-Massenanteil an der Gesamtverpackung. Zudem gilt es zu unterscheiden, ob die Verpackung eine Aluminiumfolie enthält, oder ob diese nur mit Aluminium bedampft ist¹⁶.

Übliche Verpackungen mit Aluminiumanteilen sind Joghurtbecher-Deckel, Vakuumverpackungen für Kaffee, Alu-Folien, Alu-Tuben, Tierfutterschalen, leere Tablettenverpackungen (Alu-Kunststoff-Bliester) oder Kaffeekapseln. Aluminium kann dabei das originäre Zielmaterial der Verpackung sein oder insbesondere in Verbund mit den Zielmaterialien Kunststoff und PPK¹⁷ einen Minderanteil darstellen. Bei Verwendung von Al sowohl als Zielmaterial als auch als Minderanteil ist die Identifizierbarkeit anhand der Leitfähigkeit zu überprüfen.

¹⁶ Aufgedampfte Aluminiumschichten haben einen hohen Porenanteil, die Leitfähigkeit ist so deutlich eingeschränkt.

¹⁷ aber nicht FKN, dass in der Sortierkette vorgelagert als eigene Fraktion durch NIR-Detektion erzeugt wird

Operative Durchführung Bewertung

Tabelle 6-5: Bewertung des Kriteriums Leitfähigkeit

Aspekt	Erläuterung
Fachlicher Informationsbedarf zur Bewertung	Elektrische Leitfähigkeit bzw. Al-Anteil
Bewertungsmethode, Werkzeug	Ist Al das Material mit größten Gewichtsanteil an der Vp kann pauschal davon ausgegangen werden, dass die Verpackung mittels Wirbelstromscheider sortiert werden kann. Für den Fall von geringeren Al-Anteilen (Al-Minderanteil, dennoch ist Al Zielmaterial) sind im Zweifelsfall Anlagen- bzw. Technikumsversuche durchzuführen. Der Wirbelstromscheider muss in den wichtigsten Einstellparametern (siehe Abbildung 6.2) einem im realen LVP-Anlagenbetrieb eingesetzten Wirbelstromscheider entsprechen. Die zu prüfende Vp ist verschiedenen Lagemöglichkeiten auf dem Wirbelstromscheider zu testen. Wird die Vp in allen Lagen über den Trennscheitel hinaus ausgetragen, ist die Vp als elektrisch leitfähig zu bewerten.

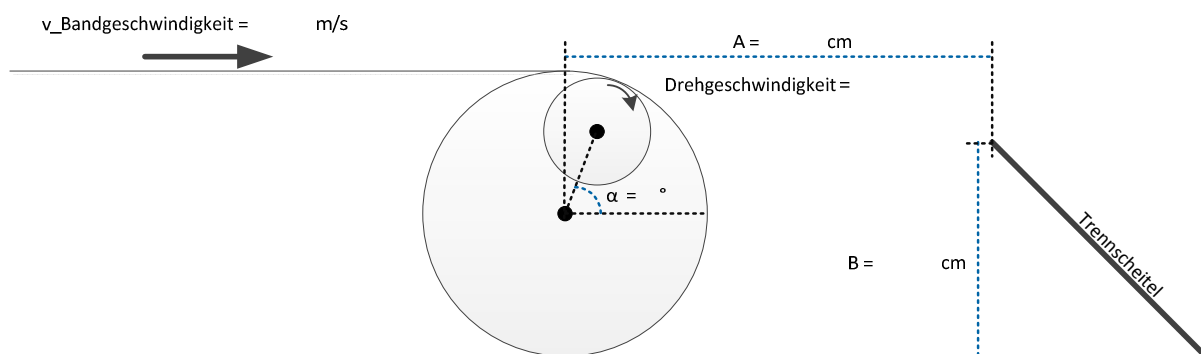


Abbildung 6.2: Skizze eines Wirbelstromscheiders mit exzentrisch gelagertem Polrad und den wichtigsten Einstellparametern (Bandgeschwindigkeit, Winkel der Poltrommel, Drehgeschwindigkeit, Abstand und Höhe Trennscheitel)

Tabelle 6-6: Bewertung des Kriteriums elektrische Leitfähigkeit

	Vereinfachte Bewertung	Anlagen-/ Technikumsversuch
Klassifizierung / Bewertung	Al ist Zielmaterial und Material mit dem größten Gewichtsanteil an der Vp (z.B. Dose)	Al ist Zielmaterial, obwohl Al nicht den größten Gewichtsanteil an der Vp hat (z.B. metallhaltiger Verbund)
Detektion Al uneingeschränkt möglich.	Kein Versuch erforderlich, da pauschal angenommen wird, dass eine Detektion in jedem Fall gegeben ist	Detektion von Al findet in allen untersuchten Lagemöglichkeiten statt
Detektion Al eingeschränkt oder nicht möglich	-	Findet die Detektion von Al nur in einem Teil der untersuchten Lagen statt, wird das Sortierverhalten der Vp anhand des Materials mit größten Gewichtsanteil (z.B. Kunststoff, oder Papier) bewertet

6.4 Identifizierbarkeit Vp aus Kunststoff, FKN, PPK-Verbund bzw. PPK und Glas: Ist die Vp anhand der Oberfläche erkennbar? (Oberflächeneigenschaften)

Erläuterung

Das Kriterium der Oberflächeneigenschaften ist zentral für die Identifikation von Kunststoffverpackungen, Flüssigkeitskartons (FKN) und Papierverbunden (PPK). Mittels NIR (Nahinfrarot) Messtechnik werden in den meisten Sortieranlagen verschiedene Kunststoffarten (PET, PE, PP, PS, etc.) sowie deren Verbunde unterschieden und mittels Druckluft gezielt aus dem Abfallstrom ausgeblasen. Die Voraussetzung für eine erfolgreiche NIR Sortierung hängt von verschiedenen Faktoren ab:

- Detektierbarkeit des Zielmaterials an Oberfläche
 - Art des Oberflächenmaterials
 - Aufbau und Schichtdicken von Materialverbunden (Multilayer)
 - Oberflächenfarbe
 - Reflexionsverhalten
- Mehrere detektierbare Materialien haben Anteil an der Oberfläche (z. B. Flasche aus PE mit Deckel aus PP) und Lage der Verpackung auf dem Sortierband (insbesondere bei flächigen Verpackungen mit Multilayeraufbau können je nach Seite, die der Trenneinheit zugewandt ist verschiedene Materialien detektiert werden)

Die Oberflächenfarbe sowie deren Reflexionsverhalten sind entscheidende Faktoren, die maßgeblich die Sortierbarkeit beeinflussen. Oberflächen, die spiegeln oder metallisch beschichtet sind, reflektieren die nahinfrarote Strahlung unspezifisch, so dass eine Detektion des Materials nicht möglich ist. Dunkle oder schwarze Materialien absorbieren die Nahinfrarotstrahlung. Eine Reflexion hin zur Detektoreinheit wird verhindert. Eine Erkennung des Materials und somit ein Austrag in die Zielfraktion ist nicht möglich. Auf diese Art beschichtete oder dunkel gefärbte Kunststoffe können nicht in den richtigen Verwertungspfad überführt werden und gelangen in die Fraktion der Sortierreste oder Mischkunststoffe.

Problematisch für die Identifikation sind außerdem Verpackungen, die aus mehreren Materialien bestehen. Grundsätzlich kann eine Verpackung aus einem Multilayer (verschiedene Materialschichten) und/oder mehreren Verpackungsteilen, wie z.B. Packhilfsmitteln aufgebaut sein. Die NIR-Erkennung von Verpackungen mit Multilayern wird durch den Schichtaufbau, die jeweiligen Schichtdicken, die eingesetzten Materialien und individuellen Einstellungen des NIR Sortierers beeinflusst. Auch eine vollständige Beschichtung mit Fremdmaterial könnte prinzipiell zu einer korrekten Identifikation des Zielmaterials führen, wenn die Schichtdicke des Fremdmaterials ausreichend gering und das Reflexionsverhalten günstig ist.

Letztendlich ist aber entscheidend, an welchen Stellen auf der Oberfläche gemessen wird. Die Wahrscheinlichkeit einer korrekten Zuordnung zur Zielfraktion steigt mit dem Oberflächenanteil des Zielmaterials. Wird die Oberfläche des Zielmaterials mit mehr als 30 % Fremdmaterial¹⁸ bedeckt ist die Wahrscheinlichkeit groß, dass keine richtige Identifikation des Zielmaterials stattfindet. Etiketten, Aufdrucke oder Banderolen können sich so negativ

¹⁸ Plastics Recyclers Europe: www.plasticsrecyclers.eu

auf die NIR Erkennbarkeit des Zielmaterials auswirken, wenn diese nicht aus dem Zielmaterial bestehen. Auch Verschlussysteme (Deckel, Kappen, Schraubverschlüsse, Siegelfolien, Ausgiesser, Dispenser, etc.) aus Fremdmaterial können verhindern, dass die Verpackung der richtigen Zielfraktion zugeordnet wird. In beiden genannten Fällen besteht die Gefahr, dass das Material des Packhilfsmittels detektiert wird. Dies hängt zusätzlich von der Lage der Verpackung auf dem Sortierband (insbesondere bei flächigen Packmitteln) und zum anderen von den technischen Spezifikationen des NIR-Trenners ab.

Eine Sonderstellung nehmen große, flächige, formflexible Kunststoffe (Folien) ein.

Flächige Verpackungen erschweren bzw. verhindern, insbesondere durch Bedeckung, die Identifikation anderer Verpackungen. Außerdem lassen sich Kunststoff-Folien schwerer mittels NIR Technik abtrennen, da das Flugverhalten während des Ausblasens diffus ist. Auch können formflexible Kunststoffe bei hohen Bandgeschwindigkeiten auf dem NIR Detektionsband ihrer Position ändern. Ein zielgerichtetes Ausblasen ist nicht mehr gegeben. Um diesen Effekten vorzubeugen werden großflächige, formflexible Kunststoffe mittels Windsichter bereits am Beginn des Sortierprozesses ausgeschleust und i.d.R. nach manueller Produktkontrolle als separate Fraktion der weiteren Verwertung zugeführt.

Für diese Verpackungen kann eine Identifizierung bzw. Sortierung auch über das Flächengewicht anstelle die NIR-Detektion der Oberfläche erfolgen. Im Rahmen dieser Bewertungsmethodik wird ab einer Fläche > DIN A4 von einem Austrag, unabhängig von den anlagenspezifischen Aggregat Einstellungen, ausgegangen.

Verpackungen aus Glas und PPK werden getrennt vom LVP-Gemisch als Monomaterial erfasst. Eine Identifizierung von PPK (über NIR) und Glas (über optische Sortierung) als Zielmaterial findet deshalb nicht im Rahmen einer LVP-Sortierung, sondern nach materialspezifischer, getrennter Erfassung im eigentlichen werkstofflichen Verwertungsprozess statt. Dessen unbenommen wird die Bewertung der Identifizierbarkeit aus Gründen der Übersichtlichkeit formal Ebene 2 zugeordnet. Im Regelfall (Ausnahmen siehe [Tabelle 6-7]) kann die Identifizier- bzw. Sortierbarkeit von Vp aus Glas und PPK als gegeben angenommen werden.

Operative Durchführung Bewertung

Tabelle 6-7: Bewertung des Kriteriums Oberflächeneigenschaft

Aspekt	Erläuterung
Fachlicher Informationsbedarf zur Bewertung	<ol style="list-style-type: none"> 1. Farbe und Reflexionsverhalten der Oberfläche/n 2. Bei verschiedenen Oberflächenmaterialien: Aufteilung der Oberfläche in Prozent (zusätzlich Lageabhängigkeit) 3. Sonderfall formflexible Kunststoffe: Fläche, Abmessungen der Verpackung.
Bewertungsmethode, Werkzeug	<p>Nach [ZSVR 2018] ist eine empirische Prüfung der Identifizierbarkeit in Versuchen in der Regel nicht erforderlich. Verpackungsmerkmale, die aber eine Prüfung durch Versuche erfordern sind:</p> <p>Kunststoffverpackungen</p> <ul style="list-style-type: none"> • großflächige Etikettierung (> 5 % der Oberfläche) mit Fremdmaterial Fullsleeve-Etikettierung • Multilayer-Aufbau (außer: PE-/ PP-EVOH oder innwändig bzw. in der Mittelschicht metallisiert) • dunkle Farbgestaltung unter Verwendung rußbasierter Farbstoffe (auch bei Verwendung in innenliegenden Layern) • unterschiedliche Kunststoffarten auf Vorder- und Rückseiten <p>FKN</p> <ul style="list-style-type: none"> • vom Standardaufbau (nicht nassfest ausgerüsteter Karton, PE ± Alu) abweichende Ausführung <p>PPK-Verpackungen und PPK-Verbunde</p> <ul style="list-style-type: none"> • lackierte oder Kunststoff-beschichtete Oberfläche • schwarz durchgefärbt unter Verwendung rußbasierter Farbstoffe <p>Glas</p> <ul style="list-style-type: none"> • fehlende Transparenz bzw. Transluzenz (Detektion mit optischen Sortiereinheiten im ultravioletten bzw. sichtbaren Lichtwellenbereich) <p>Die Bewertung erfolgt über</p> <ul style="list-style-type: none"> • augenscheinliche Einschätzung, ob Verpackungsmerkmale vorliegen, die eine Prüfung erfordern (andernfalls wird eine uneingeschränkte Identifizierbarkeit der Vp angenommen) • im Sonderfall formflexibler Kunststoffe: Bestimmung mittels augenscheinlicher Betrachtung bzw. Vermessen der Verpackungprobe • Versuch zur Bewertung der Identifizierbarkeit (falls entsprechende Verpackungsmerkmale vorhanden) <p>Nach [ZSVR 2018] soll die Prüfung mit einer betriebsüblichen Detektionseinheit erfolgen. Für einen Versuch wird folgende Durchführung vorgeschlagen: In mindestens 10 Durchläufen wird die Verpackung, z.B. durch Aufwerfen oder Fallenlassen auf das Zuführband, dem NIR-Trennaggregat zugeführt (über die zufällige Aufgabeposition soll die in der Realität zu erwartende Lage der Verpackung berücksichtigt werden) und die prozentuale Zuordnung zu den Sortierfraktionen über alle Durchläufe ermittelt.</p>

Tabelle 6-8: Bewertung des Kriteriums Oberflächeneigenschaft

Klassifizierung / Bewertung	Vereinfachte Bewertung	Versuch (erforderlich falls Merkmal nach [ZVSR 2018 Anhang 2] vorhanden)
Detektion Zielmaterial uneingeschränkt möglich.	Es liegt <u>kein</u> Verpackungsmerkmal nach [ZVSR 2018 Anhang 2 bzw. <i>Tabelle 6-7</i>] vor oder die Verpackung hat eine Fläche deutlich >DIN A4 (Sonderfall formflexibler Kunststoff)	Eine richtige Zuordnung des Zielmaterials findet in mindestens 95% aller Durchläufe statt.
Detektion Zielmaterial eingeschränkt		Eine richtige Zuordnung des Zielmaterials findet in 75 % bis 95% aller Durchläufe statt.
Detektion Zielmaterial deutlich eingeschränkt		Eine richtige Zuordnung des Zielmaterials findet in 75 % bis 50% aller Durchläufe statt.
Detektion Zielmaterial nicht möglich		Eine richtige Zuordnung des Zielmaterials findet in weniger als 50% aller Durchläufe statt.

7 Ebene 3: Eignung für werkstoffliche Verwertung und Bereitstellung von Sekundärprodukten

Ausgangspunkt für die Bewertung in Ebene 3 ist, dass die Verpackung i.d.R. in die für das Zielmaterial vorgesehene Fraktion sortiert wird.

In Sonderfällen, bei LVP-Materialien bei denen die Sortierbarkeit des Zielmaterials nicht gegeben ist, ist in Ebene 3 anstelle der für das Zielmaterial vorgesehenen Fraktion, die für die Verpackung tatsächliche zu erwartende Sortierfraktion bzw. deren Verwertungsweg zu bewerten. Das zugehörige Entscheidungsraaster ist in der folgenden Abbildung dargestellt.

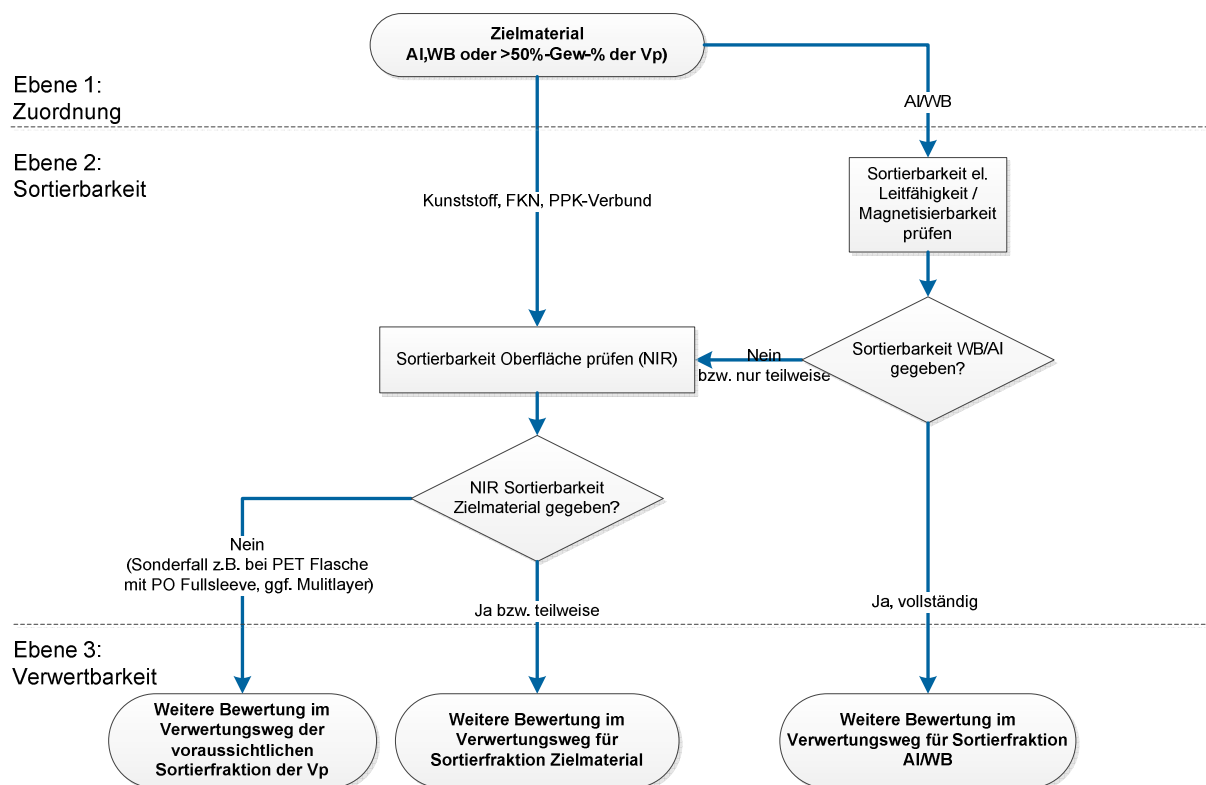


Abbildung 7-1: Auswahl des Verwertungsweg zur Bewertung in Ebene 3 für gemischt erfasste Verpackungen (LVP). [Redaktioneller

7.1 Kann für die Vp eine hochwertige Verwertung erwartet werden? (Hochwertigkeit Verwertungsweg)

Die aus der LVP-Sortierung erzeugten und als Ballenware gepressten Fraktionen und die materialspezifisch getrennt erfassten Verpackungen aus PPK und Behälterglas gehen der Verwertung zu. Die Vermarktung ist stark abhängig von der Materialqualität und den aktuellen Vermarktungspreisen. Im Status-Quo werden sortierte Kunststoffe (PP, PE, PET, PS, Folien), Metalle, Flüssigkeitskartons, PPK und Behälterglas, abgesehen von materialfremden Anteilen in der Regel werkstofflich verwertet und als Sekundärprodukte wieder der Kunststoff verarbeitenden Industrie oder Al-, Stahl-, Glas- und Papierherstellern zugeführt.

Die hier vorgestellte Methode zur Bewertung der Recyclingfähigkeit priorisiert hochwertige werkstoffliche Aufbereitungswege mit Blick auf den potenziellen Wiedereinsatz der Verwertungsprodukte als Substitut entweder für das originäre Primärmaterial. Ausschließlich ener-

getisch verwertete Verpackungen werden grundsätzlich als nicht recyclingfähig im Sinne dieser Methode eingestuft.

Die Bewertung der Recyclingfähigkeit erfolgt in Bezug auf die heute in Deutschland relevanten eingesetzten, materialspezifischen Erfassungs- und Verwertungsprozesse. Heute steht nur für ausgewählte Verpackungsmaterialien eine hochwertige werkstoffliche Verwertung grundsätzlich zur Verfügung. Diese Verpackungsmaterialien sind Eisen, Aluminium, Behälterglas, PPK, karton und die Kunststoffarten PE, PP, PS und PET (z.B. transparente Flaschen¹⁹). Für andere Verpackungsmaterialien (z.B. PVC, PLA) ist demzufolge derzeit keine Recyclingfähigkeit anzunehmen²⁰.

Für sortierte Mischfraktionen aus transparenten PET-Flaschen und anderen PET-Packmitteln (z.B. Trays, Blister) finden sich heute kaum Abnehmer für eine werkstoffliche Verwertung, da unterschiedliche PET-Arten zum Einsatz kommen, die gemeinsam nicht bzw. kaum werkstofflich verwertbar sind.

Diese Schwierigkeiten führen dazu, dass derzeit nahezu ausschließlich PET-Flaschen einer hochwertigen werkstofflichen Verwertung zugeführt werden, während übrige PET-Fraktionen (z.B. PET-Schalen) weitestgehend in den Sortierresten landen und thermisch verwertet werden [Öko-Institut 2016].

In der folgenden Tabelle sind die im Status quo zu erwartenden Aufbereitungswege und eine Einschätzung mit Blick auf die Hochwertigkeit zusammengefasst.

¹⁹ Formstabile Verpackungen aus PET, wie Schalen oder Trays, werden aktuell nicht werkstofflich recycelt (<https://www.k-zeitung.de/falscher-pet-einsatz-das-kann-so-nicht-bleiben/150/1085/81998/>)

²⁰ So sind heute die Mengen aus Verpackungsabfällen aus biobasierten Polymeren (z.B. PLA-/ Stärkeblends) im LVP-Strom noch zu gering, um ein grundsätzlich mögliches aber noch unwirtschaftliches sorten- bzw. typenreines werkstoffliches Recycling durchzuführen.

Tabelle 7-1: Übersicht Verwertungswege

Sortierfraktion	Wertstoff und erwartete Verwertungsart	Ausschluss [ZVSR 2018]
PP	PP-Anteil: Hochwertig werkstofflich , da PP-Regranulat Primärmaterial ersetzen kann	Kartuschen für Dichtmassen
PE	PE-Anteil: Hochwertig werkstofflich , da PE-Regranulat Primärmaterial ersetzen kann	Kartuschen für Dichtmassen
PS	PS-Anteil: Hochwertig werkstofflich, da PS-Regranulat Primärmaterial in ersetzen kann	geschäumter Kunststoffe inkl. EPS-Artikel
Folien	PE-Anteil: Überwiegend hochwertig werkstofflich, da PE-Regranulat Primärmaterial prinzipiell ersetzen kann. Aber aufgrund steigender Verbundanteile in der Folienfraktion Recyclingprodukte auch in materialfremde Anwendungen gehen.	Al-bedampfte Kunststoffe
PET	PET Anteil <ul style="list-style-type: none"> • Transparente Flaschen: Hochwertig werkstofflich, da PET-Flakes Primärmaterial ersetzen kann • Mischfraktionen (Flaschen mit Schalen und Blistern: werkstofflich (z.B. materialfremde Anwendungen) möglich aber heute kaum Abnehmer • Schalen, Blister: Heute keine werkstofflichen Verwertungskapazitäten vorhanden 	Für transparente Flaschen: opake PET-Flaschen und anderen PET-Artikel
MPO (Sortennummer 323)	PO-Anteil: Teilweise hochwertig werkstofflich bei allerdings begrenzter Verfügbarkeit des Verwertungsweges [ZSVR 2018]).	Ausschluss von Kartuschen für Dichtmassen
MKS	Überwiegend energetisch (Verstärkung aufgrund sinkender PO-Anteile).	
FKN (Kartonverbundmaterialien aus Karton/PE oder Karton/Aluminium/PE)	Faseranteil: Hochwertig werkstofflich , da Faseranteil Primärmaterial in vergleichbarer Anwendung ersetzen kann Al-Anteil: Rohstofflich (Substitut für Bauxit) KS Anteil: Energetisch	Sonstige Artikel aus Papier, Pappe, Karton
PPK aus LVP	Faseranteil: Teilweise hochwertig werkstofflich, da Faseranteil Primärmaterial ersetzen kann, bei allerdings begrenzter Verfügbarkeit des Verwertungsweges nach [ZSVR 2018]).	Flüssigkeitskartons, Wachs-, Paraffin-, Bitumen- und Ölpapiere
Aluminium	Al-Anteil: Hochwertig werkstofflich, da Primärmaterial ersetzt werden kann	
Weißblech	Fe-Anteil: Hochwertig werkstofflich , da Primärmaterial ersetzt werden kann	
PPK	Faseranteil: Hochwertig werkstofflich, da Faseranteil Primärmaterial ersetzen kann	
Behälterglas	Glasanteil: Hochwertig werkstofflich , da Primärmaterial ersetzt werden kann	Bleiglas, nicht aufbereitetes Sicherheitsglas, Glaskeramik, Leuchtmittel, TV-Glas, Quarzglas, Borosilikatglas und sonstige bleihaltige Gläser

Operative Durchführung Bewertung

Tabelle 7-2: Bewertung des Kriteriums Hochwertigkeit Verwertungsweg

Aspekt	Erläuterung
Fachlicher Informationsbedarf zur Bewertung	Zu erwartender Verwertungsweg für die Verpackung
Bewertungsmethode, Werkzeug	Festlegung der erwarteten Sortierfraktion (siehe Abbildung 7-1) und Zuordnung eines erwarteten Aufbereitungsweges (siehe Tabelle 7-1).

Tabelle 7-3: Bewertung des Kriteriums Hochwertigkeit Verwertungsweg

Klassifizierung / Bewertung	Erläuterung Einordnung
Erwarteter Aufbereitungsweg für das Zielmaterial ²¹ der Verpackung ist überwiegend hochwertig werkstofflich	Sortierfraktion Folien, PP, PE, PS, FKN, PPK aus LVP, NE-Metalle, PET (transparente Flaschen) Weißblech, PPK oder Behälterglas
Erwarteter Aufbereitungsweg für das Zielmaterial der Verpackung ist nur zum Teil hochwertig werkstofflich (z.B. begrenzte Verfügbarkeit)	<ul style="list-style-type: none"> • PPK aus LVP • MPO
Erwarteter Aufbereitungsweg für das Zielmaterial der Verpackung ist überwiegend energetisch	<ul style="list-style-type: none"> • Sortierfraktion Mischkunststoffe • PET (Trays, Blister), opakes PET
Erwarteter Aufbereitungsweg für das Zielmaterial der Verpackung ist ausschließlich energetisch	<p>Grundsätzlich ist im Status-Quo kein hochwertiger werkstofflicher Verwertungspfad für das Zielmaterial der Verpackung vorhanden D.h.</p> <ul style="list-style-type: none"> • das Zielmaterial ist <u>nicht</u> WB / Fe, Aluminium, Behälterglas, Getränkekarton, PPK, PE, PP, PS oder PET oder • das die Sortierreste als erwartete Fraktion nach der Sortierung anzunehmen sind (z.B. schwarze Verpackungen) oder • das die Verpackung aus einer Sortierfraktion (siehe Spalte 3 Tabelle 7-1) ausgeschlossen ist

Sofern im Einzelfall das Vorhandensein der für die hochwertige werkstoffliche Verwertung notwendigen Infrastruktur sowie deren Nutzung belegt werden können, kann eine Ausnahme gelten. Ein solcher Beleg muss für den jeweiligen Einzelfall umfassen: Nachweis, dass das Ergebnis des Recyclingverfahrens hochwertig im Sinne des Mindeststandards ist und wiegescheingestützter Nachweis über die in angemessenem Umfang erfolgte Belieferung des Verwertungsweges. [ZSVR 2018]

²¹ In Sonderfällen, bei LVP-Materialien, bei denen die Sortierbarkeit des Zielmaterials nicht gegeben ist, ist in Ebene 3 anstelle der für das Zielmaterial vorgesehenen Fraktion, die für die Verpackung tatsächliche zu erwartende Sortierfraktion bzw. deren Verwertungsweg zu bewerten.

7.2 Verpackungskunststoffe (PE, PP, PS, PET)

7.2.1 Enthält die Vp nicht-verwertbare Anteile, die im Rahmen der Aufbereitungsschritte abgetrennt werden können? (abtrennbare Verpackungsbestandteile)

Erläuterung

Bei der Aufbereitung der Standard-Verpackungskunststoffe gibt es einzelne materialfremde Verpackungsbestandteile, die im Aufbereitungsprozess stören oder die Qualität des Recyclingprodukts möglicherweise negativ beeinflussen. Einige solcher nicht-verwertbaren Verpackungsanteile können jedoch in der Regel in den verschiedenen Schritten des Aufbereitungsprozesses (Wäsche, Schwimm-Sink-Trennung, Schmelzextrusion) abgetrennt werden.

- Die Wäsche wird in der Regel im wässrigen Medium durchgeführt. Ziele der Wäsche sind die Reinigung von Produktanhaftungen und das Ablösen bzw. Abtrennen von Etiketten, fremden Materialien und anderen störender Bestandteilen wie z.B. Aufdrucken.
- Anschließend wird in der Regel eine Dichte-Trennung (Schwimm-Sink-Trennung) der vorab zerkleinerten und gewaschenen Verpackung vorgenommen, sodass die gewünschte Kunststofffraktion weiter angereichert werden kann. Mithilfe von Wasser werden Kunststoffsorten mit einer Dichte größer bzw. kleiner 1 g/cm^3 voneinander trennt. Bei der Aufbereitung von Polyolefinen (Dichte $< 1 \text{ g/cm}^3$) können Kunststoffe und andere Materialien mit einer Dichte $> 1 \text{ g/cm}^3$ als Sinkfraktion abgetrennt werden. An ihre Grenzen stößt die Dichtentrennung bei Kunststoffarten mit geringen Dichteunterschieden. So können Kunststoffe mit einer ähnlichen Dichte wie PP und PE nicht voneinander getrennt werden. Hier können spezielle Flüssigkeiten mit einer Dichte, die zwischen denen der Zielkunststoffe liegt, zum Einsatz kommen. Dies wird jedoch eher selten praktiziert. Bei dem Recycling von PET ($> 1 \text{ g/cm}^3$) können durch die Schwimm-Sink-Trennung insbesondere Verschlüsse, welche zu meist aus PE-HD bestehen, abgetrennt und verwertet werden. Die zerkleinerten Verschlusssteile landen dann in der Leichtfraktion und werden so vom nicht schwimmenden PET abgetrennt. Auch PS ($> 1 \text{ g/cm}^3$) wird als Sinkfraktion gewonnen und von spezifisch leichteren PO-Anteilen befreit. Die Veränderung der Dichte des originären Verpackungsmaterials, z. B. durch die Verwendung von Blends und Additiven, kann einen Eintrag von Verunreinigungen in die Zielfraktion des Trennschritts oder eine Ausschleusung von eigentlich erwünschten Kunststoffsorten aus der Zielfraktion zur Folge haben.
- Bei der weiteren Aufbereitung von Kunststofffraktionen steht die Gewinnung von Regranulaten (ohne Zusätze) oder Regeneraten (mit Zusätzen) im Umschmelzprozess im Mittelpunkt. Beim Extrudieren / Schmelzprozess gehen diejenigen Anteile in das Regranulat mit über, welche eine niedrigere Schmelztemperatur im Vergleich zu Verarbeitungstemperatur haben. Sie können dort zur Verschlechterung der Eigenschaften des Produktes führen (ausführlich Kapitel 7.2.2). Als potenziell problematisch erweist sich dabei die Verarbeitung von Verbundmaterialien, Blends und Kunststoffen mit Additiven. Höher schmelzende Bestandteile können mittels Schmelzfiltration zwar als Rückstand abgetrennt und ausgebracht werden, erhöhen allerdings den Reinigungsaufwand für das Filtersieb und führen auch zu Ausbeuteverlusten an Zielmaterial im Rahmen der Filtration. Niedrig schmelzende Bestandteile gelangen hingegen ins Rezyklat und/oder zersetzen sich vorab, was zu einer Verschlechterung der mechanischen und optischen Eigenschaften des Rezyklates führt.

Es folgt ein Überblick von Stoffen, die im Rahmen der oben genannten Aufbereitungsschritte abgetrennt werden können.

Tabelle 7-4: Überblick der abtrennbaren, nicht-verwertbaren Verpackungsbestandteile (nach European PET Bottle Platform und Plastics Recyclers Europe). Verarbeitungstemperaturen für Neuware nach Saechtling²².

	Wäsche der zerkleinerten Verpackungsteile	Dichte-Trennung der zerkleinerten, gewaschenen Verpackungsteile	Umschmelzprozess der Zielfraktion aus der Dichtentrennung
PE-HD	Klebstoffe (wasserlöslich unter 60 °C), Papieretiketten	Verpackungsteile, Stoffe mit Dichte > 1 g/cm ³ : PS, PET, PVC, EVA mit Aluminium	Verpackungsbestandteile, Stoffe, etc. mit einer Schmelztemperatur größer Verarbeitungstemperatur (ca. 160-220°C)
PE-LD	Klebstoffe (wasserlöslich unter 60 °C), Papieretiketten	Verpackungsteile, Stoffe mit Dichte > 1 g/cm ³ : PS, PET, PVC, EVA mit Aluminium	Verpackungsbestandteile, Stoffe, etc. mit einer Schmelztemperatur größer Verarbeitungstemperatur (ca.180-250°C)
PP	Klebstoffe (wasserlöslich unter 80 °C, Papieretiketten)	Verpackungsteile, Stoffe mit Dichte > 1 g/cm ³ : PS, PET, PVC, EVA mit Aluminium	Verpackungsbestandteile, Stoffe, etc. mit einer Schmelztemperatur größer Verarbeitungstemperatur (ca.200-270°C)
PET, transparente Flaschen	Klebstoffe (wasser- oder alkalilöslich im Temperaturbereich 60 – 80 °C), Papieretiketten	Verpackungsteile, Stoffe mit Dichte < 1 g/cm ³ : PE, PP, geschäumtes PET, OPP, EPS	Verpackungsbestandteile, Stoffe, etc. mit einer Schmelztemperatur größer Verarbeitungstemperatur (ca.260-300°C)
PS	Klebstoffe (wasserlöslich), Papieretiketten	Verpackungsteile, Stoffe mit Dichte < 1 g/cm ³ : PE, PP, geschäumtes PET, OPP, EPS und mit Dichte >1,08 g/cm ³ : PET, Al	Verpackungsbestandteile, Stoffe, etc. mit einer Schmelztemperatur größer Verarbeitungstemperatur (ca.170-280°C)

PO-Anteile an transparenten PET-Flaschen (insb. Verschlüsse) können im Rahmen der PET-Aufbereitung (Schwimmfraktion der Dichte-Trennung) für eine weitere stoffliche Verwertung abgetrennt werden.

Bei den anderen Leicht- bzw. Schwerfraktionen aus der Dichtentrennung weiterer Kunststoffarten ist zumeist aufgrund der heterogenen Zusammensetzung (verschiedenste Kunststoffsorten bzw. Nicht-Kunststoff-Materialien) eine energetische Verwertung die einzige Lösung.

²² Verarbeitungstemperaturen für Reggranulate tendenziell geringer

Operative Durchführung Bewertung

Tabelle 7-5: Bewertung des Kriteriums der abtrennbare Verpackungsbestandteile

Aspekt	Erläuterung
Fachlicher Informationsbedarf zur Bewertung	<p>Beschreibung von Packmittel und Packhilfsmitteln (inkl. Klebstoffe) insbesondere hinsichtlich</p> <ul style="list-style-type: none"> • Verwendeter Materialien (inkl. Zusammensetzung und Anteile), Massenanteilen, Aufbau • Löslichkeit der eingesetzten Klebstoffe • Dichte der eingesetzten Materialien, Schmelzpunkt bzw. Glasübergangstemperatur <p>durch Untersuchungen oder auf Basis valider Sekundärinformationen</p>
Bewertungsmethode, Werkzeug	<p>Falls keine validen Sekundärinformationen (z.B. Herstellerangaben bzw. Prozessenerfahrungen zu Unverträglichkeiten z.B. von Zuschlagstoffen, nicht-abtrennbaren Anteilen mit dem Zielmaterial) zu den Verpackungsmaterialien vorhanden, helfen Untersuchungen u.a. zur Löslichkeit, Dichte und Umschmelzverhalten im Labormaßstab:</p> <p>Einschätzung der Löslichkeit von Klebern / Etiketten: Es könnte z.B. analog der Vorgehensweise des Quick Test QT504 der European PET Bottle Platform (www.epbp.org/page/8/downloads) vorgegangen werden. Die Versuchsbeschreibung gilt für PET. Bei den weiteren Kunststofffraktionen kann in einer wässrigen Phase in den jeweils angegeben Temperaturbereichen, analog zum beschriebenen Ablauf im Quick Test QT504 vorgegangen werden.</p> <p>Einschätzung des Schwimm-Sink-Verhaltens: Es könnte z.B. analog der Vorgehensweise des Quick Test QT502 der European PET Bottle Platform vorgegangen werden. Alternativ kann eine Dichtebestimmung von Verpackungsteile nach Zerkleinerung (nur nicht geschäumte Materialien) nach DIN 1183-1 vorgenommen werden.</p>

Tabelle 7-6: Bewertung des Kriteriums abtrennbare, nicht verwertbare Verpackungsbestandteile²³

Klassifizierung / Bewertung	Erläuterung Einordnung
Vp enthält <u>keine</u> abtrennbaren, nicht-verwertbaren Anteile	Die Sekundärinformationen zur Vp bzw. die durchgeführten Untersuchungen belegen, dass die Vp keine materialfremden und abtrennbaren Anteile enthält (Verpackung aus Monomaterial)
Vp enthält <u>geringe</u> Anteile	Die Sekundärinformationen zur Vp bzw. die durchgeführten Untersuchungen belegen, dass die Vp materialfremde und abtrennbare Anteile bis maximal 10 Massen-% enthält.
Vp enthält <u>signifikante</u> Anteile	Die Sekundärinformationen zur Vp bzw. die durchgeführten Untersuchungen belegen, dass die Vp materialfremde und abtrennbare Anteile zwischen 10 bis maximal 30 Massen-% enthält.
Vp enthält <u>erhebliche</u> Anteile	Die Sekundärinformationen zur Vp bzw. die durchgeführten Untersuchungen belegen, dass die Vp materialfremde und abtrennbare Anteile von mehr als 30 Massen-% enthält.

²³ PO-Anteile aus der PET-Aufbereitung werden als abtrennbare aber verwertbare Anteile nicht berücksichtigt

7.2.2 Erfolgt über die Vp ein Eintrag von (nicht abtrennbaren) Verunreinigungen mit Risiko der Kontaminierung des Recyclingprodukts bzw. Störung des Recyclingprozesses? (Verunreinigungen mit Risiken)

Erläuterung

Stoffe mit eher **geringem Kontaminationsrisiko** sind im Verständnis dieser Methodik diejenigen Stoffe in der Verpackung, welche in der Regel konzentrationsabhängig, die optischen, mechanischen oder weiteren Eigenschaften des Rezyklats und damit die Vermarktbarkeit nicht wesentlich negativ beeinflussen. Das Rezyklat weist lediglich geringe Einschränkungen bei der Verarbeitbarkeit und dem nachgelagertem Einsatzgebiet auf.

Stoffe mit **erheblichem Kontaminationsrisiko** sind diejenigen Stoffe in der Verpackung, welche teils konzentrationsabhängig die optischen und mechanischen Eigenschaften so wesentlich negativ beeinflussen, dass das im Aufbereitungsprozess zu erwartende Produkt möglicherweise nicht mehr marktfähig ist und nur noch der energetischen Verwertung zugeführt werden kann. Das Rezyklat weist dann erhebliche Einschränkungen bei der Verarbeitbarkeit und dem nachgelagertem Einsatzgebiet auf.

In folgender Tabelle sind vereinfachend und nicht abschließend, typische Störstoffe dargestellt. Die Angaben wurden im Wesentlichen aus den Empfehlungen von [ZVSR 2018] und European Plastics Recyclers übernommen²⁴. Weitere Quellen zu diesen Aspekten sind [APR 2018] und [Recoup 2017]. Die Angaben in Tabelle 7-7 geben für die genannten Materialien dabei eine Einschätzung hinsichtlich der in der Realität zu erwartenden Prozessstörungen bzw. Verunreinigungen. Eine konkrete Bewertung würde in der Regel spezifische Untersuchungen erfordern. Für einige, spezifische Kontaminationen (nach [ZVSR 2018] und [APR 2018]) kann pauschal eine Recyclingfähigkeit der Verpackung ausgeschlossen werden.²⁵

²⁴ (<http://www.plasticsrecyclers.eu/guidelines-packagings>)

²⁵ Nach [ZSVR 2018] muss für eine davon abweichende Feststellung der Unschädlichkeit für die Recyclingfähigkeit unverträglicher Stoffe ein Einzelnachweis geführt werden.

Tabelle 7-7: Vereinfachter Überblick Verunreinigungen mit potenziellem Risiko (nach [ZVSR 2018], <http://www.plasticsrecyclers.eu/guidelines-packagings>, [APR 2018], siehe dort auch für ausführlichere Informationen auch zu weiteren Packmitteln).

Zielmaterial	Geringes Risiko	Hohes Risiko	Nicht recyclingfähig [ZVSR 2018]
LDPE	Packmittelmateriale: Multilayer PP/PE Barrieren: EVOH Metallisierte Barrierschichten Komponenten: PP-, PPK-Label Farben /Drucke: Aufdrucke <50%	Packmittelmateriale: alle weiteren Kunststoffe Komponenten: Labels aus allen weiteren Materialien Farben /Drucke: Aufdrucke >50% Metallisierte Etiketten	nicht wasserlösliche Klebstoffapplikation in Kombination mit nassfesten Etiketten PA-Barrierschichten, PVDC-Barrierschichten, nicht-Polymer-Barrierschichten (außer SiOx/AlOx/Metallisierung), nicht-EVOH-Barrierschichten [APR 2018] PVC-, PVDC-Layer Labels mit Metall-Folien, metallhaltige Verpackungsbestandteile
HDPE formstabil	PP (z.B. Kappen, Etiketten) > 8 Massen-% ²⁶) Kunststofffolien und Al-bedampfte Kunststoffe Farben /Drucke: Aufdruck von Verfalls-/Produktionsdatum	Packmittelmateriale: Multilayer HDPE + (PLA, PVC, PS, PET, PETG) Barrieren: EVOH ²⁷ Klebstoffe: nicht löslich Farben /Drucke: blutende Farben, giftige, gefährliche Tinten, Aufdrucke ²⁸ Etiketten, Sleeves, etc.: Metallisierung bzw. Al	Silikonkomponenten Komponenten geschäumter nicht thermoplastischer Elastomere nicht wasserlösliche Klebstoffe in Kombination mit nassfesten Etiketten PA-Barrierschichten; PE-X-Komponenten, PVDC-Barrierschichten Nicht-PO-Kunststoffe der Dichte < 1 g/cm ³ [APR 2018]: Verschlüsse / Dosierer mit PVC Labels mit PVC, PLA kombiniert mit nicht wasserlöslichen Klebern
PP formstabil	analog PE formstabil	analog PE formstabil	analog PE formstabil
PS formstabil			Fremdkunststoffe oder Multilayer (Dichte 1,0 – 1,08 g/cm ³) nicht wasserlösliche Klebstoffe in Kombination mit nassfesten Etiketten [APR 2018] Verpackungsbestandteile (Labels, Dosierer) mit PVC und PLA
PET-Flaschen	Additive, Füllstoffe: AA-/UV-	Farben: (opake), metallische	PET-G-Komponenten; POM-Komponenten; PVC-Komponenten

²⁶ Annahme auf Basis ISD-Information.

²⁷ Für farbige Behälter potenziell hohes Risiko für EVOH >1%, für transparente Behälter hohes Risiko ohne Mengengrenze

²⁸ Nach [Recoup 2017] Einschätzung als akzeptabel für manche Anwendungen. Nach [APR 2018] Test erforderlich. Nach [APR 2018] im Einzelfall zu prüfen.

Zielmaterial	Geringes Risiko	Hohes Risiko	Nicht recyclingfähig [ZVSR 2018]
Transparent	Blocker, O ₂ -Absorber, Aufheller	Flaschenfarbe Additive, Füllstoffe: bio- / oxo- / photochemisch abbau-bare Additive, Nanokomposites Klebstoffe: nicht löslich Farben / Drucke: Aufdruck mit blutenden Farben, giftige, gefährliche Tinten, direkter Aufdruck	EVOH-Barrierschichten; PA-Monolayer-Barrierschichten (nur falls Flasche farblos und „light-blue“), sonstige blended-barriers; PVC-Etiketten/Sleeves, PS-Etiketten/Sleeves, PET-G-Etiketten/Sleeves; PA-Additivierung (nur falls Flasche farblos und „light-blue“); ; nicht lösliche Klebstoffe (in Wasser oder alkalisch bei 80°C); nicht magnetische Metalle Elastomerkomponenten der Dichte > 1 g/cm ³ ; Direktdruck (abgesehen von Produktionscode und MHD) [APR 2018] Verpackungsbestandteile (Labels, Dosierer) mit PVC und PLA
MPO (Sortennummer 323)	LDPE EVOH-Barrieren		Silikonkomponenten; geschäumte nicht thermoplastische Elastomere mit der Dichte < 1 g/cm ³ ; geschäumte nicht-polyolefinische Komponenten

Operative Durchführung Bewertung

Tabelle 7-8: Bewertung des Kriteriums Verunreinigungen mit Risiken.

Aspekt	Erläuterung
Fachlicher Informationsbedarf zur Bewertung	Potenzielle Kontaminationen (ausführlich siehe www.plasticsrecyclers.eu/guidelines-packagings , [ZSVR 2018] [APR 2018], [Recoup 2017] vereinfacht dargestellt in Tabelle 7-7 in der Verpackung. Im Zweifelsfall weitere Untersuchungen und Recherchen zu möglichen Produkt- /Prozessrisiken von nicht abtrennbaren Materialkombinationen, Klebstoffen, Additiven, etc.
Bewertungsmethode, Werkzeug	Laboruntersuchung mit entsprechender Analytik (z.B. DSC, Mikrotomschnitte, Füllstoffanalyse: TGA (Thermisch gravimetrische Analyse) oder Lösemittelbasierter Polymeraufschluss (IVV-Methode)).

Tabelle 7-9: Bewertung des Kriteriums Verunreinigungen mit Risiken.

Klassifizierung / Bewertung	Erläuterung Einordnung
Vp trägt keine störenden Verunreinigungen in das Produkt bzw. den Recyclingprozess ein	Keine störenden Verunreinigung, die nicht abgetrennt werden können
Vp trägt störende Verunreinigungen mit geringem Kontaminationsrisiko für Recyclingprodukt bzw. –prozess ein	Ein oder mehrere Bestandteile mit geringem Kontaminationsrisiko enthalten, die im Aufbereitungsprozess nicht abtrennbar sind
Vp trägt störende Verunreinigungen mit hohem Kontaminationsrisiko für Recyclingprodukt bzw. –prozess ein	Ein oder mehrere Bestandteile mit hohem Kontaminationsrisiko, die im vorhergehenden Aufbereitungsprozess nicht abtrennbar sind.
Vp trägt störende Verunreinigungen ein, die eine Recyclingfähigkeit ausschließen	Ein oder mehrere Bestandteile, die im vorhergehenden Aufbereitungsprozess nicht abtrennbar sind und für die eine Recyclingfähigkeit der Verpackung pauschal auszuschließen ist.

7.3 PPK-Verpackungen, PPK-Verbund und FKN

7.3.1 Enthält die Vp nicht verwertbare Anteile, die im Rahmen der Aufbereitungsschritte abgetrennt werden können? (abtrennbare Verpackungsbestandteile)

Erläuterung

Das Ziel des Recyclings von PPK-Verpackungen besteht darin, den Faseranteil aus der Verpackung zurückzugewinnen. PPK-Verpackungen werden zum Aufschluss der Fasern in einem Pulper behandelt. Dabei werden nicht nur Reste von Füllmaterial entfernt, sondern auch Produktanhaftungen und ggf. anhaftende Etiketten entfernt. Störende Anteile, die im Rahmen der Aufbereitungsschritte abgetrennt werden können, sind recyclingfreundliche Klebstoffe und Druckerfarben, nassfeste Papiere, materialfremde Verschlussysteme oder Heftklammern sowie EPS oder Kunststofffolien und Faseranteile, die sich im Rahmen des Aufschlusses nicht freilegen lassen. Beim Hindurchdrücken des Faserbreis durch die Siebköpfe werden in der Regel alle Stoffe, die sich nicht im vorherigen Pulperschnitt gelöst haben, abgetrennt und bedingen damit keine negative Beeinträchtigung des Materials. Dies ist allerdings auch immer mit einem Verlust an Fasermaterial verbunden.

Gegenüber dem Recycling von PPK-Verpackungen benötigt die Zerfaserung von FKN und anderen Papierverbund-Materialien einen speziellen Prozess mit höheren Zerfaserungszeiten und -energien sowie eine aufwändigere Rejekt-Linie.

Nicht verwertbare, abtrennbare Anteile werden im Altpapier unerwünschte Materialien genannt. Sie werden unterteilt in

- papierfremde Bestandteile wie Metalle, Kunststoffe, synthetische Materialien etc. und
- Papier, Pappe und Kartonagen, die als Rohstoff für eine normale Produktion ungeeignet sind (z. B. Verbunde von Papier mit Kunststoff und/oder Aluminium, nassfeste Papiere, wachshaltige Papiere, lackierte Papiere).

Operative Durchführung Bewertung

Tabelle 7-10: Bewertung des Kriteriums „abtrennbare Verpackungsbestandteile“

Aspekt	Erläuterung
Fachlicher Informationsbedarf zur Bewertung	Beschreibung von Packmittel und allen Packhilfsmitteln (inkl. Klebstoffe) insbesondere hinsichtlich <ul style="list-style-type: none"> • Verwendete Materialien (inkl. Zusammensetzung und Anteile), Massenanteilen, Aufbau • Zerfaserungsverhalten und Anteil unerwünschter Materialien
Bewertungsmethode, Werkzeug	Siehe Tabelle 7-11

Bewertung analog Tabelle 7-6.

7.3.2 Erfolgt über die Vp ein Eintrag von (nicht abtrennbaren) Verunreinigungen mit Risiko der Kontaminierung des Recyclingprodukts oder. Störung des Recyclingprozesses? (Verunreinigungen mit Risiken)

Erläuterung

Verunreinigungen mit eher geringem Risiko

Bei der Herstellung von Recyclingpapier sind in Abhängigkeit vom Zielprodukt optische Inhomogenitäten zu vermeiden. Es sollen keine Verunreinigungen in das Produkt eingetragen werden, welche in der Papierbahn als Schmutzpunkte oder anderweitig optische Abweichungen wahrgenommen werden können.

Weiterhin sind Bestandteile störend, die klebend sind, kleinteilig fragmentiert werden und wieder zusammenballen können (Stickys). Größere Stickys (über 2 mm äquivalenter Kreisdurchmesser) können durch die Prozesse der Stoffaufbereitung aussortiert werden. Kleinere Stickys können jedoch zu Ablagerungen an Papierbahn führenden Maschinenelementen führen, die Papierbahnabbrisse und damit Produktionsausfälle auslösen.

Verunreinigungen mit erheblichem Risiko

Verunreinigungen mit erheblichem Risiko die Papierfasern negativ zu beeinflussen, sind alle Stoffe, welche die Papierfasern für den Wiedereinsatz unbrauchbar machen. Hierzu zählen Nassfestmittel und nicht lösliche dispergierende Klebstoffe.

Die European Printing Ink Association (EuPIA) hat eine Ausschlussliste²⁹ an Stoffen und Materialien ausgegeben, welche aufgrund ihrer Schädlichkeit nicht mehr eingesetzt werden sollten. Komponenten aus der EUPIA-Liste sind in Verpackungen nicht zu erwarten. Von einer allgemeinen Prüfung kann abgesehen werden.

In der folgenden Übersicht sind Verunreinigungen mit potenziell geringem bzw. erheblichem Risiko für das Herstellen von Recyclingfasern zusammengefasst.

Tabelle 7-11: Überblick zu Verunreinigungen mit potenziellem Risiko

	Geringes Risiko	Nicht recyclingfähig
PPK ,FKN, PPK-Verbund	Bewertung nach PTS Methode PTS-RH 021/97 : <ul style="list-style-type: none"> wegen optischer Inhomogenität im aufbereiteten Stoff bedingt rezyklierbar das Produkt ist rezyklierbar, aber hinsichtlich der Produktgestaltung verbesserungswürdig 	Nassfestmittel, soweit nicht nachgewiesen wird, dass Rückgewinnung und Verwertung der Fasern gegeben sind (PTS Methode PTS-RH 021/97) [ZVSR 2018] Nicht lösliche dispergierende Klebstoffe, soweit nicht nachgewiesen wird, dass sie entfernt werden können (INGEDE Methode 12 oder 4) Bewertung nach PTS Methode PTS-RH 021/97 : <ul style="list-style-type: none"> wegen klebender Verunreinigungen nicht rezyklierbar Im Papierrecycling nicht sinnvoll verwertbar

Operative Durchführung Bewertung

Tabelle 7-12: Bewertung des Kriteriums „Verunreinigungen mit Risiken

Aspekt	Erläuterung
Fachlicher Informationsbedarf zur Bewertung	Potenzielle Recyclingunverträglichkeiten in der Verpackung
Bewertungsmethode, Werkzeug	Prüfung nach Methode PTS-RH 021/97 <ul style="list-style-type: none"> Bestimmung des Zerfaserungsverhaltens und des Anteils unerwünschter Materialien Prüfung auf klebende Verunreinigungen bzw. auf optische Inhomogenitäten

Bewertung analog Tabelle 7-9.

²⁹ EuPIA Exclusion List for Printing Inks and related Products

7.4 Weißblech- und NE-Metalle

7.4.1 Enthält die Vp nicht verwertbare Anteile, die im Rahmen der Aufbereitungsschritte abgetrennt werden können? (abtrennbare Verpackungsbestandteile)

Erläuterung

Bei WB-Verpackungen kommt es im Verwertungsverfahren zu einer nahezu vollständigen Schließung des Stoffkreislaufs für den Eisenanteil der Verpackung. Bedingt durch das Aufbereitungsverfahren (Schmelzprozess) kommt es jedoch zu Verlusten beispielsweise von NE-Metallen oder organischen Verbindungen. Konkret sind derartige Verpackungsbestandteile Etiketten, Beschichtungen mit Zinn (Weißblech), einer Emailleschicht oder anderen anorganischen und organischen Materialien³⁰.

Beim Recycling von Aluminium-Verpackungen ist der Anteil von organischen Bestandteilen (Etiketten aus Papier oder Kunststoff) bei der Recyclingfähigkeit zum Abzug zu bringen, da diese pyrolysiert werden.

Tabelle 7-13: Überblick zu abtrennbaren, störenden Verpackungsbestandteilen

	Materialfremde Anteile, deren Abtrennung im Schmelz- oder Pyrolyseprozess erfolgt
Weißblech	Aluminium, Silizium, organische Verpackungsbestandteile (Kunststoff, PPK)
Aluminium	Organische Verpackungsbestandteile (Kunststoff, PPK)

Operative Durchführung Bewertung

Tabelle 7-14: Bewertung des Kriteriums „abtrennbaren Verpackungsbestandteile“

Aspekt	Erläuterung
Fachlicher Informationsbedarf zur Bewertung	Beschreibung von Packmittel und allen Packhilfsmitteln insbesondere hinsichtlich <ul style="list-style-type: none"> • Verwendeter Materialien (inkl. Zusammensetzung und Anteile), Massenanteilen, Aufbau durch Untersuchungen oder auf Basis valider Sekundärinformationen
Bewertungsmethode, Werkzeug	Zerlegen der Vp und gfs. Bestimmung des Glühverlustes (DIN 15169). Experteneinschätzung anhand Verpackungsinformationen bzw. Verpackungsanalyse

Bewertung analog Tabelle 7-6.

7.4.2 Erfolgt über die Vp ein Eintrag von (nicht abtrennbaren) Verunreinigungen mit Risiko der Kontaminierung des Recyclingprodukts bzw. Störung des Recyclingprozesses? (Verunreinigungen mit Risiken)

Erläuterung

Verunreinigungen mit geringem Risiko

Art und der Anteil an störenden Verpackungsbestandteilen sind abhängig vom Einsatzgebiet des Recyclingproduktes.

³⁰ Diese werden als Verluste bei der Einschmelzung im Hochofen oder im Sauerstoffkonverter oxidiert, die metallischen Verbindungen werden dann über die Schlacke abgeschieden.

Fe-Verpackungen können prinzipiell anorganische Verpackungsbestandteile wie beispielsweise Kupfer enthalten, die im Aufbereitungsprozess eine Legierung mit Eisen eingehen. Die Konzentration der Legierungsbestandteile und der nachfolgende Verwendungszweck bedingen entweder eine Zufuhr oder Verdünnung der Schmelze durch jeweils benötigte metallische Elemente.

Beim Recycling von Al-Getränkedosen sind bereits geringe Konzentrationen von Kupfer (0,2 Masse-%) und Silizium (0,3 Masse-%) als störend zu betrachten. Beim Recycling von anderen Aluminiumverpackungen sind höhere Toleranzgrenzen (Kupfer: 2,5 Masse-%; Silizium: 1 Masse-%) angesetzt. Auch hier wird reines Aluminium zu dosiert, bis die gewünschte Legierung vorliegt [Erdmann et al., 2009].

Tabelle 7-15: Überblick zu Verunreinigungen mit Risiko

	Verunreinigungen mit geringem Risiko der Kontaminierung des Produkts
Weißblech	Kupfer
Aluminium	Eisen, Silizium, Kupfer

Operative Durchführung Bewertung

Tabelle 7-16: Bewertung des Kriteriums Verunreinigungen mit Risiken

Aspekt	Erläuterung
Fachlicher Informationsbedarf zur Bewertung	Potenzielle Kontaminationen (siehe Tabelle 7-15) in der Verpackung
Bewertungsmethode, Werkzeug	Experteneinschätzung anhand Verpackungsinformationen bzw. Verpackungsanalyse

Bewertung analog Tabelle 7-9.

7.5 Behälterglas

7.5.1 Enthält die Vp nicht verwertbare Anteile, die im Rahmen der Aufbereitungsschritte abgetrennt werden können? (abtrennbare Verpackungsbestandteile)

Erläuterung

Bei Behälterglasverpackungen kommt es im Aufbereitungsprozess zu einer nahezu vollständigen Schließung des Stoffkreislaufs für den Glasanteil. Im Rahmen des Aufbereitungsprozesses werden materialfremde Packhilfsmitteln (z.B. Etiketten) abgetrennt, die, mit Ausnahme metallischer Verschlüsse, nicht werkstofflich verwertet werden.

Tabelle 7-17: Überblick zu abtrennbaren, störenden Verpackungsbestandteile

	Materialfremde Anteile deren Abtrennung im Rahmen der Aufbereitung erfolgt
Behälterglas	<p>Packhilfsmittel wie Verschlüsse, Etiketten</p> <p>Für abtrennbare metallische Anteile z.B. aus Verschlüssen darf eine werkstoffliche Verwertung angenommen werden</p>

Operative Durchführung Bewertung

Tabelle 7-18: Bewertung des Kriteriums „abtrennbare Verpackungsbestandteile“

Aspekt	Erläuterung
Fachlicher Informationsbedarf zur Bewertung	Beschreibung von Packmittel und allen Packhilfsmitteln insbesondere hinsichtlich <ul style="list-style-type: none"> • Verwendeter Materialien (inkl. Zusammensetzung und Anteile), Massenanteilen, Aufbau durch Untersuchungen oder auf Basis valider Sekundärinformationen
Bewertungsmethode, Werkzeug	Zerlegen der Vp und gfs. Bestimmung des Glühverlustes (DIN 15169) Experteneinschätzung anhand Verpackungsinformationen bzw. Verpackungsanalyse

Bewertung analog Tabelle 7-6.

7.5.2 Erfolgt über die Vp ein Eintrag von (nicht abtrennbaren) Verunreinigungen mit Risiko der Kontaminierung des Recyclingprodukts bzw. Störung des Recyclingprozesses? (Verunreinigungen mit Risiken)

Erläuterung

Verunreinigungen mit erheblichem Risiko

Bei Behälterglas ist der Eintrag von Bleioxid zu verhindern, da hier die optischen Eigenschaften der Scherben bzw. des neuen Glasprodukts verändert werden. Borosilikatgläser stören das Recycling von Behälterglas, da Bor- und Aluminiumoxide die Eigenschaften des Normalglases verändern. Diese Gläser werden jedoch im Behälterglas-Bereich nicht eingesetzt bzw. kommen hauptsächlich in der Chemie zur Anwendung. Metalle wie Blei, Zinn und Eisen (Banderolen von Sekt- und Weinflaschen) wirken korrosiv auf die Schmelzwannen. Bereits sehr geringe Konzentrationen an Chromeisen, Kobalt und Kupfer können zu Verfärbungen der Glasschmelze führen.

Bei dem Recycling von Behälterglas sind außerdem jegliche Einschlüsse im Glas (Bügel zur Deckelbefestigung) oder Applikationen auf dem Glas aus Metall, welche sich durch Bruch nicht entfernen lassen, problematisch, da diese in die Glasschmelze gelangen. Dort bilden sie Einschlüsse im Glas, was die Glasstruktur schwächen und zum Bruch führen kann. Aluminiumverschlüsse (Schraubdeckel), die in die Glasschmelze gelangen, führen zur Bildung von Silizium, dass Einschlüsse bildet, die die Glasstruktur schwächen. Keramik, Porzellan und Steingut lösen sich nicht in der Schmelze. Es bilden sich Einschlüsse, die durch Spannungen im Glas zu Brüchen führen würden.

Kristallglasverpackungen, die Blei oder Barium enthalten sind nicht-recyclingfähig [ZSVR 2018].

In der folgenden Übersicht sind die möglichen Verunreinigungen beim Behälterglasrecycling zusammengefasst.

Tabelle 7-19: Überblick zu Verunreinigungen mit Risiko

	Produktverunreinigungen mit potenziell erheblichem Risiko	Nicht recyclingfähig [ZVSR 2018]
Behälterglas	Bleioxid, Borosilikatgläser, Chromeisen, Kupfer, Kobalt Einschlüsse und Applikationen aus Metallen oder Kunststoff, die nicht abgetrennt werden können	Kristallglasverpackungen mit Blei oder Barium

Operative Durchführung Bewertung

Tabelle 7-20: Bewertung des Kriteriums „Verunreinigungen mit Risiken“

Aspekt	Erläuterung
Fachlicher Informationsbedarf zur Bewertung	Potenzielle Kontaminationen (siehe Tabelle 7-19) in der Verpackung
Bewertungsmethode, Werkzeug	Experteneinschätzung anhand Verpackungsinformationen bzw. Verpackungsanalyse

Bewertung analog Tabelle 7-9.

Literatur

- [APR 2018]: APR Design Guide for Plastics Recyclability. The Association of Plastics Recyclers. Version 2.
- [Bosewitz, 2013]: Bosewitz, S. [Hrsg.]: Kunststoffrecycling in Produkten – Herkunftskatalog von Erzeugnissen aus Kunststoffabfallströmen, 1. Auflage, VGE Verlag GmbH, Essen, 2013
- [bvse 2016]: Glasrecycling – ein in sich geschlossener Materialkreislauf. www.bvse.de/342/491/4. aufgerufen am 24.02.2016
- [Consultic 2015] Analyse/Beschreibung der derzeitigen Situation der stofflichen und energetischen Verwertung von Kunststoffabfällen in Deutschland. Studie erstellt im Auftrag der Interessengemeinschaft der thermischen Abfallbehandlungsanlagen in Deutschland e.V.
- [Dehoust et al 2012]: Analyse und Fortentwicklung der Verwertungsquoten für Wertstoffe. UBA-Text 40/2012
- [Erdmann et al. 2009]: Einfluss von RFID-Tags auf die Abfallentsorgung. UBA-Text 27/2009.
- [FKN, 2007]: Fachverband Kartonverpackungen für flüssige Nahrungsmittel e.V. (Hrsg.): Getränkekarton – Im Kreislauf der Natur; www.getraenkekarton.de, abgerufen am 05.09.2017
- [GDA, W 18]: GDA - Gesamtverband der Aluminiumindustri e.V. (Hrsg.): Aluminium in der Verpackung – Herstellung, Anwendung, Recycling (Merkblatt W18); Düsseldorf
- [Gruber, 2011]: Gruber, E.: Papier- und Polymerchemie Vorlesungsskriptum zum Lehrgang „Papier-technik“ an der Dualen Hochschule Karlsruhe, <http://www.gruberscript.net>, abgerufen am 12.09.2017
- [Institut cyclos-HTP 2017]: Prüfung und Testierung der Recyclingfähigkeit. Anforderungs- und Bewertungskatalog des Institutes cyclos-HTP. Fassung 3.5. Stand 03.08.2017. Download unter www.cyclos-htp.de. Aufgerufen am 18.09.2017.
- [Öko-Institut 2016]: Umweltpotenziale der getrennten Erfassung und des Recyclings von Wertstoffen im Dualen System. Ökobilanz für das Duale System Deutschland.
- [Recoup 2017]: Plastic Packaging. Recyclability By Design. Recycling of Used Plastics Limited (RECOUP). Peterborough (UK) 2017.
- [Saechtling] Karl Oberbach: Kunststoff-Taschenbuch. 28.Ausgabe Hanser Verlag
- [UBA_2016-1]: Umweltbundesamt (Hrsg.): Umweltbezogene Bilanzierung von „intelligenten“ und „aktiven“ Verpackungen hinsichtlich der Recyclingfähigkeit und Durchführung eines Dialogs mit Akteuren der Entsorgungs- und Herstellungsbranche, Dessau-Roßlau, April 2016
- [ZSVR 2018]: Orientierungshilfe zur Bemessung der Recyclingfähigkeit von systembeteiligungspflichtigen Verpackungen vom 30.11.2018. Stiftung Zentrale Stelle Verpackungsregister