

## Was können die mechanische Aufbereitung von Kunststoffen und das werkstoffliche Recycling leisten?

Joachim Christiani und Sandra Beckamp

1.	Rohstoffliche Grundlagen .....	140
2.	Rezyklate und Rezyklateinsatz .....	141
3.	Stand der Technik des Kunststoffrecyclings .....	143
3.1.	PET-Recycling .....	143
3.2.	Folienrecycling .....	145
3.3.	PP-/PE-Recycling .....	146
3.4.	MPO-Recycling .....	147
3.5.	PS-Recycling .....	149
4.	LVP-Sortierung.....	150
5.	Fazit.....	150

Mit Inkrafttreten des Verpackungsgesetzes sind die Anforderungen an die Verwertung von Kunststoffverpackungen signifikant gestiegen.

Dies betrifft zum einen die sog. Werkstoffquote, die bezogen auf die Beteiligungsmenge von 36 % auf 58,5 % ab 2019 (63 % ab 2022) angehoben wurde. Noch gravierender ist die Einführung einer Recyclingquote unter Bezug auf die Sammelmenge in Höhe von 50 % einzustufen. Vordergründig ist diese Vorgabe nach § 16 (4) VerpackG zwar keine *Kunststoffquote*; faktisch ist sie aber nur zu erreichen, wenn die werkstoffliche Verwertung von Kunststoffverpackungsabfällen um etwa 70 % gegenüber den Vorjahren gesteigert wird.

Neben den gesetzlichen Treibern wirken zunehmend auch Zielfestlegungen des Handels und von Markenherstellern auf die Recyclingwirtschaft ein. So haben sich quasi alle namhaften Hersteller und Handelsketten unter dem Eindruck des medialen Interesses am Thema Kunststoff und Umwelt verpflichtet, mittelfristig Kunststoffverpackungen recyclingfähig zu gestalten und vermehrt Rezyklate einzusetzen. Die konkrete Umsetzung solcher Zielfestlegungen setzt voraus, dass die Gesetzmäßigkeiten und Optionen der mechanischen Aufbereitung von Kunststoffabfällen realistisch dargestellt und eingeordnet werden.

Gleiches gilt auch für die Zielerreichung bezüglich Quotenvorgaben und den hierfür gegebenenfalls einzuleitenden Maßnahmen. Was kann also die mechanische Aufbereitung leisten und inwieweit muss der (anthropogene) Rohstoff *Verpackungsabfall* zur Schließung von Kreisläufen verändert werden?

## 1. Rohstoffliche Grundlagen

Im Hinblick auf die abfallwirtschaftliche Herausforderung gilt die erste Betrachtung des potentiell zu schließenden Kreislaufs dem Rohstoff Abfall in seiner derzeitigen Zusammensetzung. Bild 1 zeigt die Ergebnisse eigener Untersuchungen aus den Herbstmonaten 2017 in einer Hochrechnung auf die bundesweite Sammelmenge.

Der Grafik ist zu entnehmen, dass das Sammelgemisch zu knapp 50 % aus Kunststoffabfällen besteht, von denen etwa zwei Drittel als grundsätzlich recyclingfähig einzustufen sind. Im Verpackungsbereich dominieren nach wie vor die Polyolefine (PO) PE und PP, gefolgt von PET, dessen Marktanteil in den vorangegangenen Jahren insbesondere im Bereich von Flaschen und Schalen stark zugenommen hat.

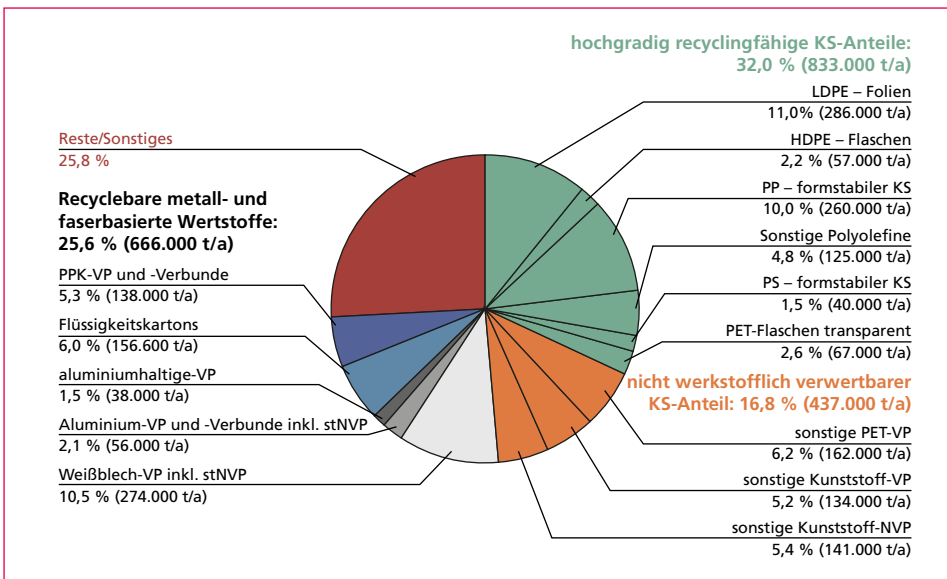


Bild 1: Zusammensetzung von LVP

Mit Blick auf die Recyclingquote nach § 16 (4) VerpackG veranschaulicht die Graphik die anspruchsvolle Aufgabe: In Summe weisen nur etwas mehr als 57 % die grundsätzliche Eignung zur stofflichen Verwertungszuführung auf.

## 2. Rezyklate und Rezyklateinsatz

Grenzen und Möglichkeiten der mechanischen Kunststoffaufbereitung werden in vielerlei Hinsicht erkennbar, wenn die heutige Produktpalette und das Einsatzspektrum von Kunststoffrezyklaten dargestellt wird. Tabelle 1 vermittelt eine entsprechende Übersicht, aus der auch deutlich wird, dass eine werkstoffspezifische Differenzierung notwendig ist, wenn Erfordernisse einer Optimierung realistisch eingeschätzt werden sollen.

So lassen sich beispielsweise für den Werkstoff PET-A in transparenten Flaschenanwendungen technisch bereits jetzt Kreisläufe sogar für das anspruchsvollste Segment der Lebensmittelkontaktanwendungen schließen. Voraussetzungen sind anwendungsspezifische Erfassung oder Sortierung, Typenreinheit, Farbreinheit und recyclinggerechte Produktgestaltung. Letztere ist für PET-Verpackungen allerdings auch von besonderer Bedeutung, da Rezyklatanwendungen außerhalb des außerordentlich anspruchsvollen Verpackungsbereiches kaum gegeben sind.

Deutlich anders stellt sich die Situation für die Polyolefine HDPE und PP dar. Dadurch, dass eine Vielzahl von Rezyklatanwendungsoptionen vornehmlich bei Extrusions- und Spritzgussprodukten im Nichtverpackungsbereich bestehen, ist die technologische Herausforderung an das Recyclingverfahren geringer. Derzeit gehen die aus Bechern, Schalen und Flaschen gewonnenen Rezyklate überwiegend in Anwendungsbereiche, die geringere Ansprüche an Farbe, Geruch usw. stellen, z.B. Kabelrohre oder Pflanztöpfe.

Spezifisch ist auch die Situation im Bereich der Verpackungsfolien von LDPE. Rezyklatanwendungen im Spritzguss sind wegen der geringen Steifigkeit des Werkstoffs rar, so dass im Wesentlichen in Folienanwendungen mit geringen Ansprüchen an Farbe und Transparenz (wie Müllbeutel) und in teilweise werkstoffuntypische Anwendungen geliefert wird.

Im Überblick kann aber festgestellt werden, dass Monolayer-Kunststoffverpackungen sich heute so aufbereiten lassen, dass sie Primärkunststoffe substituieren können. Dies gilt auch mit geringen Abstrichen für Multilayer-Verpackungen aus der Polymergruppe Polyolefine.

Die Aufbereitungstiefe richtet sich nicht nur nach den technischen Möglichkeiten, sondern auch im Wesentlichen danach, welche Rezyklatqualitäten nachgefragt werden (Tabelle 1).

Tabelle 1: Rezyklatanwendungen im Verpackungsbereich und Nicht-Verpackungsbereich

Zielkategorie Kunststoffverpackungen (Hauptwerkstoff)	Beispiele	Sortierfraktion	Verpackungsbereich		Nicht-Verpackungsbereich	
			Nahrungsmittelkontakt	Sonstige Verpackungen	Ersatz Primärrohstoff	Ersatz sonstige Werkstoffe
Folie aus LDPE	Tragtaschen, Luftpolsterfolie	Folienfraktion (LDPE)	–	Blasfolien wie Tragetaschen	Blas- und Castfolien wie Mülltüten/Abfallsäcke, Malerplanen, flexible Spritzgussanwendungen (z.B. Mörtelimer)	Intrusionsprodukte wie Industrietraletten
Flaschen, Eimer, Kanister aus HDPE	Flaschen für Kosmetikprodukte und Reinigungsmittel	PE-Fraktion	–	Spritzgussanwendungen wie Farbeimer	Extrusionsprodukte wie Rohre und Spritzgussanwendungen wie Mörtelkübel oder Abstreifgitter	–
Flaschen, Schalen, Becher aus PP	Margarine- und Joghurtbecher, Shampoo-Flaschen	PP-Fraktion MPO-Fraktion	–	Spritzguss- und Tiefziehenanwendungen wie Pflanztöpfe, Kisten	Spritzguss- und Extrusionsanwendungen wie Mülleimer, Aufbewahrungsboxen, Büroartikel (Mappen)	–
Flexible Multilayer-Verpackungen, polyolefin-basiert	Bonbontüten, Wickler, Standbodenbeutel, Drückverpackungen	Mischkunststoffe (zukünftig MPO flex)	–	–	Intrusionsprodukte, wie Industrietraletten	Intrusionsprodukte, wie Palissaden, Spiegelgeräte, Parkbänke, Abdeckplatten, Rasengittersteine
Becher, Schalen aus PS	Joghurtbecher, Obstschalen	PS-Fraktion	–	Tiefziehenanwendungen, wie Pflanzentrays und Spritzguss wie Kleiderbügel	Spritzgussanwendungen wie Büroartikel (Ablagekörbe) und Wickelspulen	–
Getränkflaschen aus PET	Einweg-Pfandflaschen	Farbsortierte PET-Getränkflaschen	Blasform- und Tiefziehenanwendungen wie Getränkeflaschen, PET-Schalen (Trays)	Blasform- und Tiefziehenanwendungen wie Spülmittel-Flaschen, Tiegel und Schalen, Umrreifungsbänder	PET-Fasern (Textilien, Fleece und Dämmstoffe)	–
Flaschen aus PET	Getränke-, Waschmittel- und Haushaltsreiniger-Flaschen	PET-Flaschen aus DS	–	Blasform- und Tiefziehenanwendungen wie Spülmittel-Flaschen, Tiegel und Schalen, Umrreifungsbänder	PET-Fasern (Textilien, Fleece und Dämmstoffe)	–
PET opak, PET-Thermoforms, sonstige Kunststoffe (z.B. PLA, PVC)	Ketchup-Flaschen, Schalen für Wurst und Käse	Mischkunststoffe	–	–	–	–

### 3. Stand der Technik des Kunststoffrecyclings

#### 3.1. PET-Recycling

Das PET-Recycling eignet sich besonders zur Darstellung des Standes der Technik der Kunststoffaufbereitung, da hier bedingt durch die hohen Qualitätsanforderungen an Rezyklate quasi alle verfügbaren Technologien eingesetzt werden.

Bild 2 zeigt das Grundverfahren des beschriebenen Aufbereitungsprozesses unter Ausweisung der Variante mit Regranulierung und SSP.

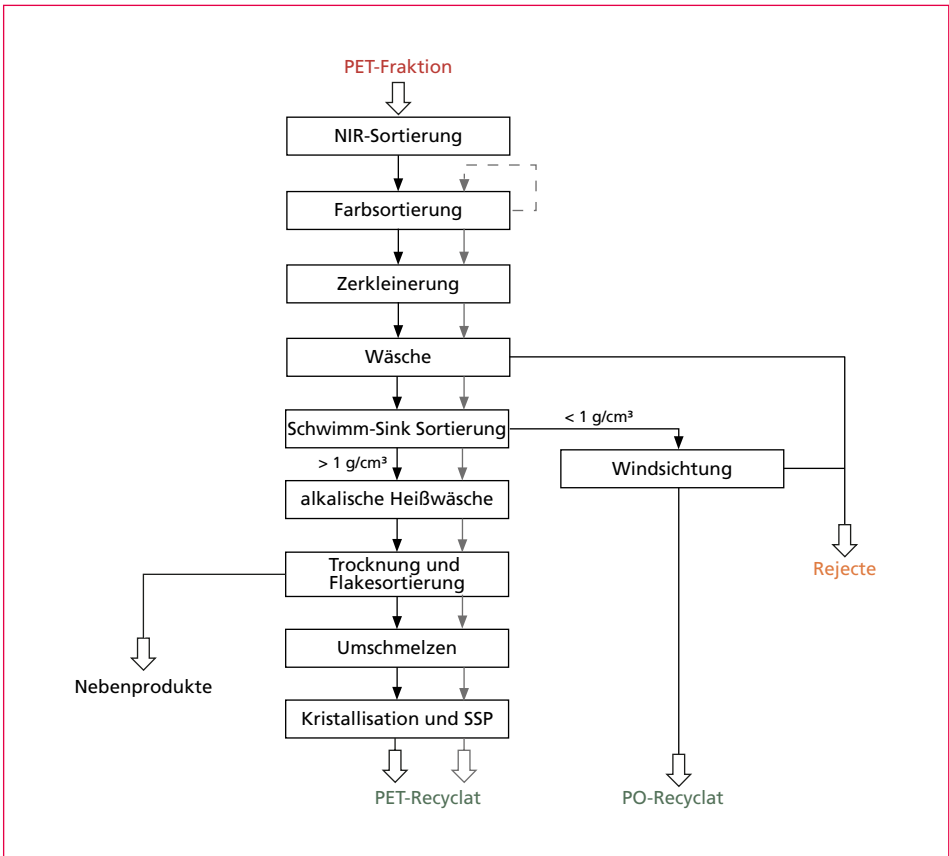


Bild 2: Vereinfachtes Fließschema des Recyclings von PET-Verpackungen

Die von den Sortieranlagen bereitgestellten Qualitäten der Sortierfraktionen PET-Flaschen (Fraktionsnr. 325) und Misch-PET (Fraktionsnr. 328) werden als Großballen angeliefert und eingelagert. Je nach Produktionsziel wird die Systemware mit PET-Fraktionen

aus anderen Quellen im Menü verarbeitet. Die eigentliche Aufbereitung beginnt mit der Ballenöffnung und Abtrennung des Bindedrahtes. Im Standardverfahrensablauf erfolgt nachgeschaltet eine Vorsortierung zur Aussortierung nicht verträglicher Komponenten. Dieser Schritt kann auch vorgelagert in einer eigenständigen Anlage erfolgen. Welche PET-Komponenten aussortiert werden, hängt maßgeblich vom Produkt ab, welches der PET-Recycler herstellt. Die höchsten Anforderungen bestehen für Flasche-zu-Flasche-Anwendungen. Die Vorsortierung zielt hierfür auf Schalen, opake PET-Flaschen und gesleepte PET-Flaschen ab. Sie wird meist mit einer Kombination von sensorgestützter Farb- und Materialsortierung mit nachgeschalteter manueller Kontrollsortierung vollzogen. Nach der Vorsortierung erfolgt die Feinzerkleinerung mittels Schneidmühlen. Ziel der Zerkleinerung ist die Erzeugung eines Mahlgutes etwa  $< 10$  mm zum weitgehenden Aufschluss der Komponenten und als Voraussetzung für die Funktionsfähigkeit der nachfolgenden Trenn- und Transportprozesse. Der sich anschließende Waschprozess ist in der Regel zweistufig ausgeführt, wobei mindestens die zweite Stufe als alkalische Heißwäsche betrieben wird. Die Abtrennung polyolefinischer Kunststoffpartikel aus Kappen, Verschlüssen und Etikettenschnipseln erfolgt meist zwischengeschaltet mittels Schwimm-Sink-Sortierung (gravimetrischer Sortierung) bei einer Trenndichte von  $1 \text{ g/cm}^3$ . Das Verfahrensprinzip der Dichtentrennung kann in unterschiedlichen Maschinentypen bzw. Sortieraggregaten umgesetzt sein; zur Anwendung kommen im PET-Recycling überwiegend Schwimm-Sink-Becken. Für den PET-Recycler ist das Schwimmgut kein Reject, aus dem polyolefinreichen Schwimmgut wird der Verschlusswerkstoff abgetrennt und bildet ein Nebenprodukt, das als Mahlgut verkauft wird. PET-Mahlgut (Flakes) wird im Sinkgut der Dichtentrennstufe ausgetragen. Die alkalische Heißwäsche macht ein Spülen der PET-Flakes erforderlich, um die Natronlauge vor dem Trocknungsprozess von den Oberflächen zu entfernen. Danach erfolgt eine in der Regel mehrstufige Nachsortierung der Flakes zur Minimierung von Fremdstoffen im Fertigprodukt. PET wird in den meisten Fällen als Mahlgut vermarktet, was insbesondere insofern problematisch ist, als relevante Unverträglichkeiten wie Klebstoffreste oder PA-Additivierung erst beim Umschmelzprozess offenkundig werden. (Bei den Umschmelztemperaturen von PET-A sind die meisten übrigen Kunststoffe thermisch nicht stabil und bilden Zersetzungsprodukte.)

Es gibt aber auch PET-Recycler, die die komplette technische Ausrüstung für eine hochgradige Rezyklatveredlung vorhalten, angefangen von der Extrusion mit Schmelzfiltration bis hin zur SSP (Solid State Polymerisation.), mit der Polymerisations- und Kristallisationsgrad von PET auf Neuwarenniveau eingestellt werden kann. Die Möglichkeit der eigenen weitergehenden, anwendungsspezifischen Qualitätssteuerung bietet a priori eine höhere Flexibilität beim Rohstoffeinsatz.

Innovationen zur weiteren Veredlung und Erweiterung der Anwendungsbereiche für die erzeugten Regranulate sind nicht evident. So stellen insbesondere Löseverfahren derzeit in der Praxis keine Optionen dar. Verfahrensschritte wie Heißwäsche, automatische Mahlgutreinigung usw., die als Stand der Technik in der Kunststoffaufbereitung einzustufen sind, sind im PET-Recycling ohnehin Standard. Der wesentliche Grund hierfür ist, wie oben bereits angeführt, darin zu sehen, dass für PET-Rezyklate von vornherein sehr anspruchsvolle Anforderungen existierten, da diese zumindest innerhalb von Europa fast nur in Verpackungsanwendungen abgesetzt werden können.

### 3.2. Folienrecycling

Die nachfolgende, vereinfachte Verfahrensbeschreibung berücksichtigt alle determinierenden Prozessschritte des eigentlichen Verwertungsprozesses.

Bild 3 zeigt das Grundverfahren des beschriebenen Aufbereitungsprozesses unter Ausweisung einer Variante mit NIR-Vorsortierung.

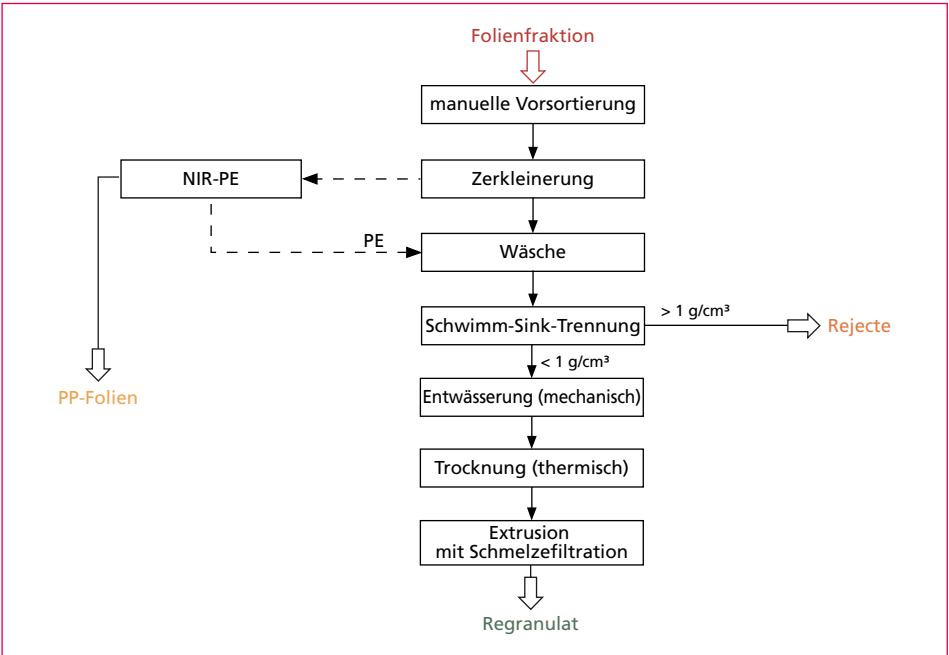


Bild 3: Vereinfachtes Verfahrensschema für das Recycling der Kunststofffolienfraktion

Die von den Sortieranlagen bereitgestellten Qualitäten der Sortierfraktion Kunststoff-Folien werden standardmäßig als Großballen angeliefert und eingelagert. Die eigentliche Verarbeitung beginnt mit der Vorzerkleinerung der Großballen mit nachgeschalteter Magnetscheidung zur Abtrennung des Bindedrahtes. Im Standardverfahrensablauf erfolgt nachgeschaltet die Feinzerkleinerung mittels Schneidmühlen gegebenenfalls nach vorheriger Windsichtung zum Verschleißschutz der Zerkleinerungswerkzeuge. Ziel der Zerkleinerung ist die Erzeugung eines Mahlgutes etwa < 10 bis 15 mm als Voraussetzung für die Funktionsfähigkeit der nachfolgenden Trenn- und Transportprozesse. Der sich anschließende Waschprozess ist in der Regel nicht als Heißwäsche ausgeführt und erfolgt ohne Zugabe von Tensiden oder sonstiger Detergenzien. Die Abtrennung nicht-polyolefinischer Kunststoffpartikel erfolgt mittels Schwimm-Sink-Sortierung (gravimetrischer Sortierung) bei einer Trenndichte von  $1 \text{ g/cm}^3$ . Das Verfahrensprinzip der Dichtentrennung kann in unterschiedlichen Maschinentypen bzw. Sortieraggregaten umgesetzt sein; zur Anwendung kommen Schwimm-Sink-Becken, Sortierzentrifugen, Hydrozyklone usw. Für den Folienrecycler ist das Sinkgut Reject, das im Schwimmgut angereicherte Polyolefingemisch wird entwässert, getrocknet und abschließend mit-

tels Extruder umgeschmolzen. Die geringe Schüttdichte von Folienmahlgut macht es erforderlich, den Extruder entweder mit speziellen Stopfwerken zu beschicken oder eine Agglomeration vorzuschalten. Nach der Extrusion mit Schmelzefiltration bei etwa 100 Micron und gegebenenfalls Homogenisierung des erzeugten Regranulates erfolgt die Bereitstellung der Verkaufseinheiten in Big Bag, Oktabins oder Silos.

Großformatige Folienkunststoffe, wie sie traditionell in der Folienfraktion angereichert werden bestehen überwiegend aus LDPE. Für den Wiedereinsatz in Folienanwendungen sind Polypropylen-Anteile limitierender Faktor, was einzelne Folienverwerter veranlasst hat, Nahinfrarot-Trennstufen zur Minimierung des PP-Anteils hinter der Vorzerkleinerung zu installieren.

Innovationen zur weiteren Veredlung und Erweiterung der Anwendungsbereiche für die erzeugten Regranulate sind nicht evident. So stellen insbesondere Löseverfahren, Heißwäsche, Farbsortierung usw. in Bezug auf die hochwertige, werkstoffliche Folienverwertung zu Regranulaten derzeit in der Praxis keine Optionen dar. Nicht, weil sie technisch-ökonomisch nicht darstellbar wären, sondern weil hierdurch bei der aktuellen Beschaffenheit des Rohstoffs keine grundsätzlich anderen Anwendungsoptionen für das Regranulat erschlossen werden können.

### 3.3. PP-/PE-Recycling

Die nachfolgende, vereinfachte Verfahrensbeschreibung berücksichtigt alle determinierenden Prozessschritte des eigentlichen Verwertungsprozesses.

Bild 4 zeigt das Grundverfahren des beschriebenen Aufbereitungsprozesses unter Ausweisung der *Variante mit Heißwäsche*.

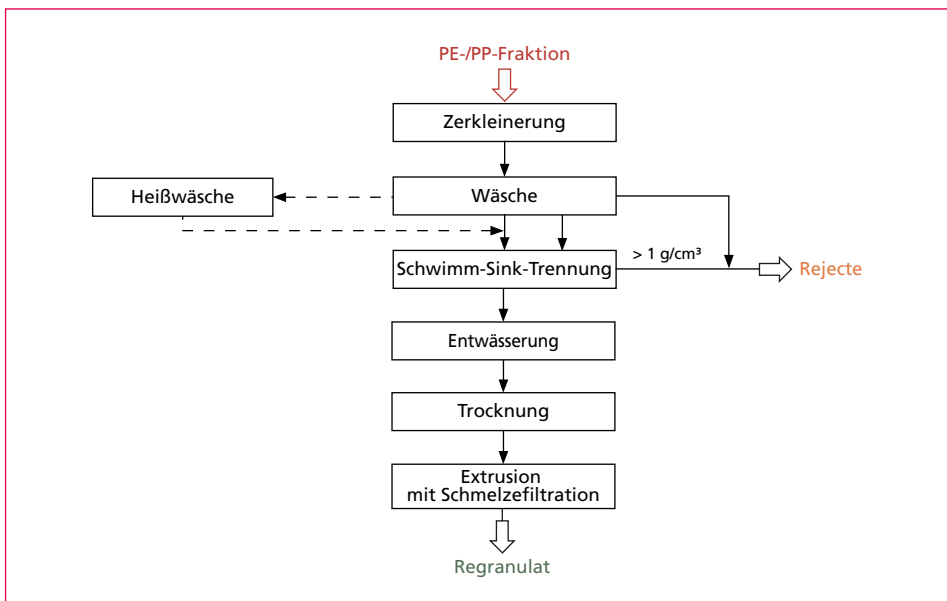


Bild 4: Vereinfachtes Verfahrensschema des PP- und PE-Recyclings



Die von den Sortieranlagen bereitgestellten Qualitäten der Sortierfraktionen PE und PP werden standardmäßig als Großballen angeliefert und eingelagert. Die eigentliche Verarbeitung beginnt mit der Vorzerkleinerung der Großballen mit nachgeschalteter Magnetscheidung zur Abtrennung des Bindedrahtes. (Bei manueller Entdrahtung entfällt gegebenenfalls die Vorzerkleinerung.) Im Standardverfahrensablauf erfolgt nachgeschaltet die Feinzerkleinerung mittels Schneidmühlen. Ziel der Zerkleinerung ist die Erzeugung eines Mahlgutes etwa  $< 10 \text{ mm}$  als Voraussetzung für die Funktionsfähigkeit der nachfolgenden Trenn- und Transportprozesse. Der sich anschließende Waschprozess ist in der Regel nicht als Heißwäsche ausgeführt und erfolgt ohne Zugabe von Tensiden oder sonstiger Detergenzien. Die Abtrennung nicht-polyolefinischer Kunststoffpartikel erfolgt mittels Schwimm-Sink-Sortierung (gravimetrischer Sortierung) bei einer Trenndichte von  $1 \text{ g/cm}^3$ . Das Verfahrensprinzip der Dichtentrennung kann in unterschiedlichen Maschinentypen bzw. Sortieraggregaten umgesetzt sein; zur Anwendung kommen Schwimm-Sink-Becken, Sortierzentrifugen, Hydrozyklone usw. Für den PE-/PP-Recycler ist das Sinkgut Reject, das im Schwimmgut angereicherte Polyolefingemisch wird entwässert, gegebenenfalls getrocknet und abschließend mittels Extruder umgeschmolzen. Hierbei werden je nach Kundenwunsch Zuschlagsstoffe wie Masterbatch und Kreide zu dosiert. Nach der Extrusion mit Schmelzefiltration und gegebenenfalls Homogenisierung des erzeugten Regranulates erfolgt die Bereitstellung der Verkaufseinheiten in Big Bags, Oktabins oder Silos.

Erzeugt wird in der Basisvariante ein mittel- bis dunkelgraues Regenerat (bei Zuschlag von Pigmenten auch weitere dunkle Farben), welches z.B. zur Produktion von Kunststoffrohren und für diverse Spritzgussanwendungen vermarktet wird. Zur Erweiterung des Anwendungsspektrums von PE- und PP-Rezyklaten sind additive Prozesse erforderlich und teilweise auch bereits umgesetzt. Hier ist zum einen die Mahlgut-Farbsortierung zu erwähnen, die es für einen Teilstrom ermöglicht, auch für hellere, farbsensiblere Anwendungen eingesetzt zu werden. Zum anderen ist die Heißwäsche zur Verbesserung der Oberflächenreinigung zu erwähnen.

Innovationen zur weiteren Veredlung und Erweiterung der Anwendungsbereiche für die erzeugten Regranulate sind nicht evident. So stellen insbesondere Löseverfahren und Vakuumextraktion in Bezug auf die hochwertige, werkstoffliche Verwertung von PE-/PP- Regranulaten derzeit in der Praxis keine Optionen dar.

Hierbei ist als eine Besonderheit zu vermerken, dass formstabile PE- und PP-Verpackungen ausgehend von der LVP- Sortierung über mehrere Sortierfraktionen einer hochwertigen werkstofflichen Verwertung zugeführt werden können.

### 3.4. MPO-Recycling

MPO (**m**ixed **p**olyolefins)-Recycling kennzeichnet eine Recyclingoption, deren Konzept es ist, unter Verzicht auf eine differenzierte Bereitstellung der polyolefinischen Grundtypen PP, HDPE und LDPE in vorangereicherten Sortierfraktionen, Regenerate aus der Mischung der Polyolefine mit definierten Verarbeitungsmerkmalen überwiegend für Spritzgussanwendungen herzustellen.

Bild 5 zeigt das Grundverfahren in schematischer Darstellung.

Die von den Sortieranlagen bereitgestellten Qualitäten der Sortierfraktion MPO werden als Großballen angeliefert und eingelagert. Die eigentliche Verarbeitung

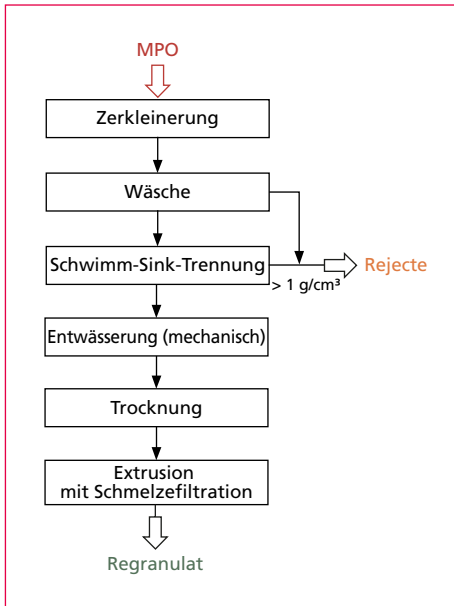


Bild 5: Vereinfachtes Verfahrensschema des MPO-Recyclings

anschließende Waschprozess ist als Kaltwäsche ausgeführt und erfolgt ohne Zugabe von Tensiden. Die Abtrennung nicht-polyolefinischer Kunststoffpartikel erfolgt mittels Schwimm-Sink-Sortierung (gravimetrischer Sortierung) bei einer Trenndichte von  $1 \text{ g/cm}^3$ . Das Verfahrensprinzip der Dichtentrennung kann in unterschiedlichen Maschinentypen bzw. Sortieraggregaten umgesetzt sein; zur Anwendung kommen schwerpunktmäßig Sortierzentrifugen. Für den MPO-Recycler ist das Sinkgut Reject bzw. Ersatzbrennstoff; das im Schwimmgut angereicherte Polyolefingemisch wird entwässert, getrocknet und abschließend mittels Extruder umgeschmolzen. Nach der Extrusion mit Schmelzefiltration und Homogenisierung des erzeugten Regranulates erfolgt die Bereitstellung der Verkaufseinheiten in Big Bags, Oktabins oder Silos.

Innovationen zur weiteren Veredlung und Erweiterung der Anwendungsbereiche für die erzeugten Regranulate sind nicht evident. So stellen insbesondere Heißwäsche, Farbsortierung usw. derzeit in der Praxis keine Optionen dar. Nicht, weil sie technisch nicht darstellbar wären. Unter betriebswirtschaftlichen Aspekten ist aber zu realisieren, dass hierdurch bei der aktuellen Beschaffenheit des Rohstoffs keine grundsätzlich anderen Anwendungsoptionen für das Regranulat erschlossen werden können.

### 3.5. PS-Recycling

Die nachfolgende, vereinfachte Verfahrensbeschreibung berücksichtigt alle determinierenden Prozessschritte des eigentlichen Verwertungsprozesses.

Bild 6 zeigt das Grundverfahren in schematischer Darstellung.

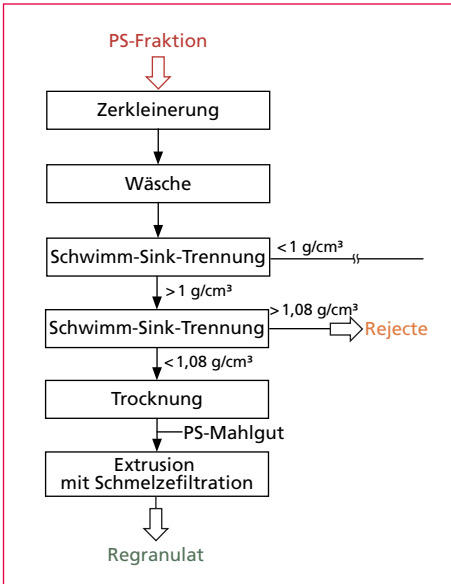


Bild 6: Vereinfachtes Verfahrensschema des PS-Recyclings

Die von den Sortieranlagen bereitgestellten Qualitäten der Sortierfraktion PS (Fraktionsnr. 331) werden als Großballen angeliefert und eingelagert. Die eigentliche Verarbeitung beginnt mit der optionalen Vorzerkleinerung der Großballen mit nachgeschalteter Magnetscheidung zur Abtrennung des Bindedrahtes oder mit der manuellen Entfernung der Bindedrähte. Im Standardverfahrensablauf erfolgt nachgeschaltet die Feinzerkleinerung mittels Schneidmühlen. Ziel der Zerkleinerung ist die Erzeugung eines Mahlgutes etwa  $< 10 \text{ mm}$  als Voraussetzung für die Funktionsfähigkeit der nachfolgenden Trenn- und Transportprozesse. Der sich anschließende Waschprozess ist als Kaltwäsche ausgeführt und erfolgt ohne Zugabe von Tensiden. Die Abtrennung von Fremdkunststoffpartikeln und Metallen (insbesondere Al-Platinen von

Joghurtbechern) erfolgt mittels zweistufiger Schwimm-Sink-Sortierung (gravimetrischer Sortierung). In der ersten Stufe werden bei einer Trenndichte von  $1 \text{ g/cm}^3$  im Schwimmgut Polyolefine und EPS separiert. In der zweiten Stufe werden bei einer Trenndichte von etwa  $1,08 \text{ g/cm}^3$  PET-, PVC-, PLA- usw. sowie Aluminium-Partikel im Sinkgut abgetrennt; als Schwimmgut dieser sog. Salzstufe (Trenndichte wird mit wässriger Salz-Lösung eingestellt) wird PS- Mahlgut erzeugt. Das Verfahrensprinzip der Dichtentrennung kann in unterschiedlichen Maschinentypen bzw. Sortieraggregaten umgesetzt sein; zur Anwendung kommen Schwimm-Sink-Becken und Sortierzentrifugen, usw. Für den PS-Recycler sind Schwimmgut der ersten Trennstufe und Sinkgut der Salzstufe Reject, das im Schwimmgut der Salzstufe angereicherte Polystyrol wird gespült, entwässert, getrocknet und abschließend mittels Extruder umgeschmolzen. Nach der Extrusion mit Schmelzefiltration und gegebenenfalls Homogenisierung des erzeugten Regranulates erfolgt die Bereitstellung der Verkaufseinheiten in Big Bag, Oktabins oder Silos.

Innovationen zur weiteren Veredlung und Erweiterung der Anwendungsbereiche für die erzeugten Regranulate sind nicht evident. So stellen insbesondere Löseverfahren, Heißwäsche, Farbsortierung usw. zu Regranulaten derzeit in der Praxis keine Optionen dar.

## 4. LVP-Sortierung

Im angestrebten Kreislauf für Kunststoffverpackungen kommt der LVP-Sortierung eine zentrale Schlüsselrolle zu.

Der Stand der Technik, der auch weitestgehend in die Praxis umgesetzt ist, wird aus Bild 7 ersichtlich.

Die Kunststoffvorkonzentrate werden im Wesentlichen über NIR-basierte automatische Klauerverfahren, bei der im Kern die Polymerart in den oberflächennahen Schichten im Reflexionsverfahren gemessen wird, mit manueller Kontrollsortierung generiert. Die Berücksichtigung der Grenzen und Möglichkeiten dieses Trennprinzips im Rahmen des Verpackungsdesigns bestimmt nicht nur die mögliche Ausbeute hochwertig rezyklierbarer Kunststoffe, auch die Qualität der Vorkonzentrate kann hiermit maßgeblich beeinflusst werden.

Ferner ist zu berücksichtigen, dass der Ausdifferenzierung von Kunststoffen nach Werkstoffart und -typ im Rahmen der Sortierung technisch-ökonomische Grenzen gesetzt sind und somit gewisse Konzentrationsgrenzen (überschlägig etwa 1 %) überschritten werden müssen, um eine separate Bereitstellung von Vorkonzentraten überhaupt darstellen zu können. Die Möglichkeiten des Kunststoffrecyclings werden also nicht zuletzt auch dadurch vorgezeichnet, ob die derzeitigen Verpackungsentwicklungen zu einer stärkeren Standardisierung bezüglich der eingesetzten Werkstoffe führen.

## 5. Fazit

Grenzen und Möglichkeiten der mechanischen Aufbereitung von Kunststoffabfällen sind werkstoffspezifisch und unter Berücksichtigung einer Vielzahl von Variablen entlang der Wertschöpfungskette zu betrachten.

Nach dem derzeitigen Stand gelingt es, die Verpackungsstandardpolymere aus nicht flexiblen Anwendungen in Monolayer-Strukturen in Rezyklate zu überführen, die Primärrohstoffe substituieren. Mit gewissen Abstrichen gelingt dies auch für flexible Kunststoffe aus LDPE. Für flexible PP-Verpackungen fehlen bedarfsgerechte Kapazitäten.

Die Rezyklatanwendungen sind gegenüber Neuware eingeschränkt; insbesondere die Primäranwendung im Lebensmittelkontakt ist zurzeit, außer für PET unter engen Voraussetzungen, nicht sinnvoll darstellbar.

Der Bedarf, zur Schließung von Kreisläufen den Werkstoff bis zum Qualitätsniveau von Neuware zu veredeln, ist aber auch spezifisch unterschiedlich. Ökonomisch und ökologisch sinnvoller ist sicherlich zunächst das Ausschöpfen von Rezyklat-Anwendungen, bei denen im Wesentlichen die Maschinengängigkeit und die mechanischen Eigenschaften von Neuware erreicht werden müssen.

Last but not least: Abfüller und Verpackungshersteller arbeiten zurzeit mit Hochdruck an der Entwicklung neuer Kunststoffverpackungen mit der Zielsetzung der Erreichung von Recyclingfähigkeit unter den Randbedingungen mechanischer Aufbereitungsprozesse.

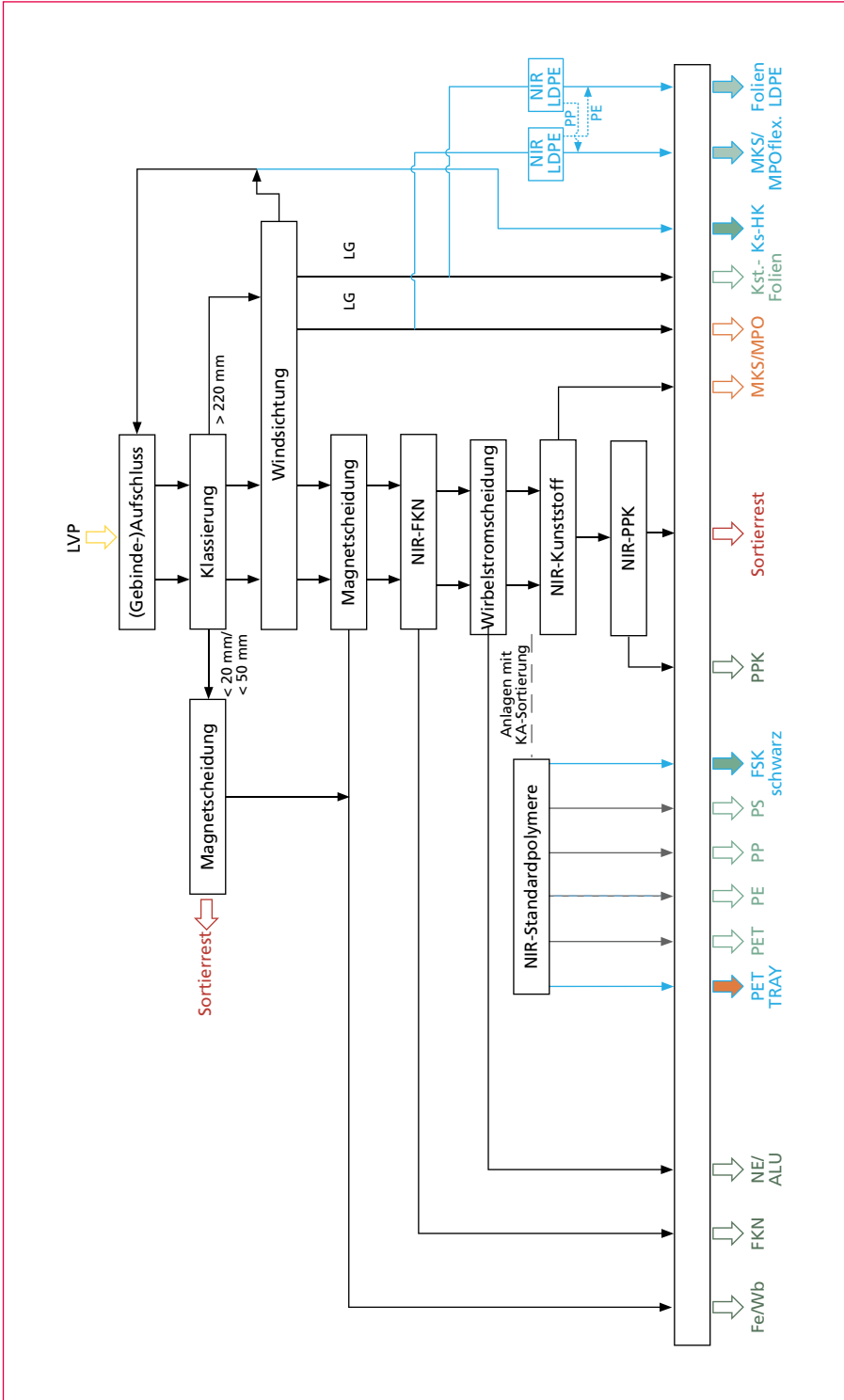


Bild 7: Schematische Darstellung der LVP-Sortierung

Dies umfasst alle relevanten Parameter angefangen von der Polymerstruktur, über Etiketten, Druck, Pigmentierung, bis hin zu Klebstoffen und Barriereausführungen. Es darf erwartet werden, dass sich mittelfristig die Optionen hochwertiger werkstofflicher Verwertung bei geänderter Rohstoffbasis maßgeblich verbessern.

## Ansprechpartner



**Dr. Joachim Christiani**  
Institut cyclos-HTP  
Geschäftsführer  
Maria-Theresia-Allee 35  
52064 Aachen, Deutschland  
+49 241949000  
info@cyclos-htp.de

Bibliografische Information der Deutschen Nationalbibliothek

Die Deutsche Nationalbibliothek verzeichnet diese Publikation in der Deutschen Nationalbibliografie; detaillierte bibliografische Daten sind im Internet über <http://dnb.dnb.de> abrufbar

Stephanie Thiel, Elisabeth Thomé-Kozmiensky, Peter Quicker, Alexander Gosten (Hrsg.):

**Energie aus Abfall, Band 17**

ISBN 978-3-944310-50-3 Thomé-Kozmiensky Verlag GmbH

Copyright: Elisabeth Thomé-Kozmiensky, M.Sc., Dr.-Ing. Stephanie Thiel  
Alle Rechte vorbehalten

Verlag: Thomé-Kozmiensky Verlag GmbH • Neuruppin 2020

Redaktion und Lektorat: Dr.-Ing. Stephanie Thiel, Elisabeth Thomé-Kozmiensky, M.Sc.

Erfassung und Layout: Elisabeth Thomé-Kozmiensky, M.Sc., Claudia Naumann-Deppe,  
Sarah Pietsch, Ginette Teske, Janin Burbott-Seidel, Roland Richter,  
Cordula Müller, Gabi Spiegel

Druck: Universal Medien GmbH, München

Dieses Werk ist urheberrechtlich geschützt. Die dadurch begründeten Rechte, insbesondere die der Übersetzung, des Nachdrucks, des Vortrags, der Entnahme von Abbildungen und Tabellen, der Funk-sendung, der Mikroverfilmung oder der Vervielfältigung auf anderen Wegen und der Speicherung in Datenverarbeitungsanlagen, bleiben, auch bei nur auszugsweiser Verwertung, vorbehalten. Eine Vervielfältigung dieses Werkes oder von Teilen dieses Werkes ist auch im Einzelfall nur in den Grenzen der gesetzlichen Bestimmungen des Urheberrechtsgesetzes der Bundesrepublik Deutschland vom 9. September 1965 in der jeweils geltenden Fassung zulässig. Sie ist grundsätzlich vergütungspflichtig. Zuwiderhandlungen unterliegen den Strafbestimmungen des Urheberrechtsgesetzes.

Die Wiedergabe von Gebrauchsnamen, Handelsnamen, Warenbezeichnungen usw. in diesem Werk berechtigt auch ohne besondere Kennzeichnung nicht zu der Annahme, dass solche Namen im Sinne der Warenzeichen- und Markenschutz-Gesetzgebung als frei zu betrachten wären und daher von jedermann benutzt werden dürfen.

Sollte in diesem Werk direkt oder indirekt auf Gesetze, Vorschriften oder Richtlinien, z.B. DIN, VDI, VDE, VGB Bezug genommen oder aus ihnen zitiert worden sein, so kann der Verlag keine Gewähr für Richtigkeit, Vollständigkeit oder Aktualität übernehmen. Es empfiehlt sich, gegebenenfalls für die eigenen Arbeiten die vollständigen Vorschriften oder Richtlinien in der jeweils gültigen Fassung hinzuzuziehen.