

Innovatives Verfahren zur Anreicherung von Polyolefin-Konzentraten aus industriellen Reststoffströmen zum Zwecke einer stofflichen Verwertung

Daniel Schwabl, Helmut Flachberger, Lukas Kranzinger, Markus Bauer und Wolfgang Hofer

1.	Aktuelle Situation.....	199
1.1.	Kunststoffproduktion	199
1.2.	Altkunststofffraktionen und -recycling.....	200
2.	RSA Plastic Reborn.....	203
2.1.	Vorangegangene Arbeiten.....	203
2.2.	Das Projekt.....	205
2.3.	Die Aufbereitungsanlage	205
2.4.	Zentrifugalkraftscheider	207
3.	Versuchsreihen und Ergebnisse	208
3.1.	Parameterstudien am Zentrifugalkraftscheider	208
3.1.1.	Verwendetes Aufgabegut.....	209
3.1.2.	Studie zu Anlagenparametern	210
3.1.3.	Studie zu Gutparametern	211
3.2.	Versuchsreihen zur Trennleistung	211
3.2.1.	Verwendetes Aufgabegut.....	212
3.2.2.	Versuchsreihen in Form eines zweistufigen Trennprozesses.....	214
3.2.3.	Versuchsreihen in Form eines dreistufigen Trennprozesses	215
4.	Zusammenfassung und Ausblick.....	217
5.	Literatur.....	217

1. Aktuelle Situation

1.1. Kunststoffproduktion

Laut des Berichtes von Plastics Europe 2016 [5], aus dem – sofern nicht anders angegeben – alle Daten dieses Kapitels stammen, betrug die weltweite Kunststoffproduktion im Jahr 2015 etwa 322 Millionen Tonnen. Davon entfallen etwa 58 Millionen Tonnen

auf Europa, wobei in dem Bericht die Daten der 28 EU-Staaten samt Schweiz und Norwegen als Europa zusammengefasst werden. In diesen europäischen Staaten gab es 2015 einen Bedarf an etwa 49 Millionen Tonnen Kunststoffen. Mit etwa 25 Prozent entfällt der größte Anteil auf Deutschland (12,0 Millionen Tonnen), gefolgt von Italien (14,3 Prozent, 7,0 Millionen Tonnen) und Frankreich (9,6 Prozent, 4,7 Millionen Tonnen). Österreich belegt mit etwa 1,1 Millionen Tonnen Platz 10. Diese Kunststoffe werden in verschiedenen Marktbereichen eingesetzt, wobei der Bereich *Verpackungskunststoffe* mit 39,6 Prozent den größten Anteil einnimmt, gefolgt von den Bereichen *Bauindustrie* und *Diverse* (Klein- und Haushaltsgeräte, Möbel, Sportutensilien, Produkte des Gesundheits- und Sicherheitsbereichs) mit jeweils etwa zwanzig Prozent. Die verbleibenden etwa zwanzig Prozent teilen sich die Bereiche *Automobil- und Elektroindustrie* sowie die *Landwirtschaft*.

1.2. Altkunststofffraktionen und -recycling

Die zuvor getroffene Betrachtung nach Einsatzgebieten der Kunststoffe ist vor allem deshalb von Interesse, weil von diesen die Produktlebenszyklen wesentlich beeinflusst werden. Kunststoffe, welche etwa im Baubereich eingesetzt werden, bleiben solange in Verwendung, bis ein entsprechendes Gebäude erneuert oder abgerissen wird, also vielfach über mehrere Jahrzehnte. Kunststoffe, welche in Haushalts- oder Elektrogeräte sowie Sportutensilien eingesetzt werden, sind üblicherweise mehrere Jahre im Einsatz. Im Gegensatz dazu haben jene 39,6 Prozent der Kunststoffprodukte, welche der Verpackungsindustrie zuzuordnen sind, meist eine sehr kurze Verwendungsdauer und fallen daher bald nach ihrem Inverkehrbringen wieder als Altkunststoffe an.

Diese in Europa im Jahr 2014 knapp 25,8 Millionen Tonnen an Altkunststoffen wurden bislang zu etwa vierzig Prozent einer energetischen Verwertung zugeführt, also zum Großteil in Zementwerken oder Verbrennungsanlagen als Ersatzbrennstoffe genutzt und somit energetisch verwertet. Mit etwas über dreißig Prozent folgte an zweiter Stelle die Entsorgung mittels Deponierung, gefolgt von den verbleibenden knapp unter dreißig Prozent, welche einem stofflichen Recycling zugeführt werden. Hierbei gibt es jedoch starke regionale Unterschiede innerhalb Europas, was in Bild 1 ersichtlich ist.

In diesem Dreiecksdiagramm sind die drei Behandlungsoptionen *Thermisches Recycling*, *Stoffliches Recycling* und *Deponierung* anteilmäßig einander vergleichend gegenüber gestellt. Die einzelnen Staaten sind dabei so angeordnet, dass an den einzelnen Skalen abgelesen werden kann, wieviel Prozent der dort anfallenden Altkunststoffe welchem Behandlungsweg zugeführt werden. Die drei Eckpunkte repräsentieren hierbei den Zustand, dass hundert Prozent der Altkunststoffe ausschließlich einem Behandlungsweg zugeführt werden. Der obere Eckpunkt steht hierbei für hundert Prozent stoffliches Recycling, der linke Eckpunkt für hundert Prozent thermisches Recycling und der rechte Eckpunkt für hundert Prozent Deponierung.

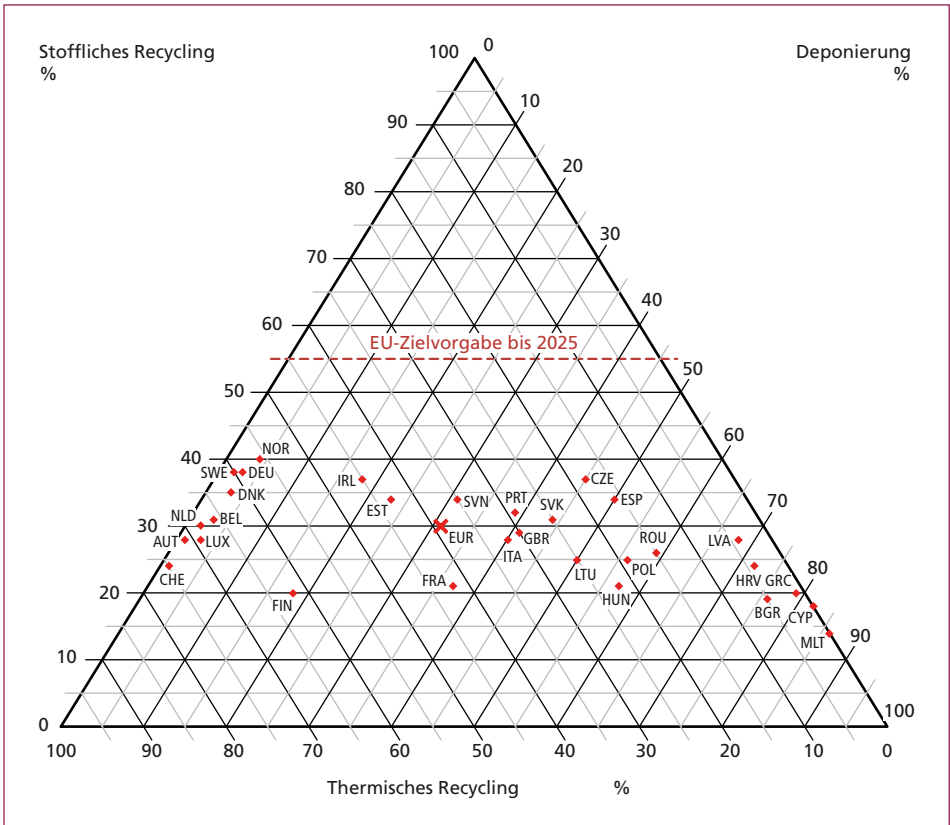


Bild 1: Verwertungswege von Altkunststoffen im Jahr 2014 und EU-Vorgabe für 2025

Quellen:

EC (Europäische Kommission): Proposal for the Directive 94/62/EG of the European Parliament and of the Council 5 Dezember 2015 on packaging and packaging waste (ed.) (2015). EC (Europäische Kommission), Brüssel, 2015

Plastics Europe: Plastics – the Facts 2016. Plastics Europe, Wemmel, Belgien, 2016

Bei Betrachtung von Bild 1 fällt auf, dass der Anteil am stofflichen Recycling der hier angeführten Staaten – abgesehen von den beiden Inselstaaten Malta und Zypern – gegenwärtig lediglich zwischen zwanzig und vierzig Prozent liegt. Auf Basis dieses Diagrammes können die Staaten drei Gruppen zugeordnet werden:

- Staaten, in welchen eine Kombination von Deponierung und stofflichem Recycling eingesetzt wird und die sich daher nahe der rechten Dreiecksseite befinden – Malta, Zypern, Griechenland, Lettland, Kroatien und Bulgarien.
- Staaten, in welchen ein Deponierungsverbot für Altkunststoffe gilt und somit eine Kombination von thermischem und stofflichem Recycling eingesetzt wird. Sie befinden sich daher nahe der linken Dreiecksseite – Norwegen, Schweden, Deutschland, Dänemark, Belgien, Niederlande, Österreich, Luxemburg und die Schweiz.

- Staaten, in welchen unterschiedliche Kombinationen aller drei Behandlungswege genutzt werden und welche daher im inneren Dreiecksbereich zu liegen kommen – Finnland, Irland, Estland, Slowenien, Frankreich, Portugal, Italien, Großbritannien, Tschechien, Spanien, Litauen, Ungarn, Polen und Rumänien.

Ein durchschnittlicher Anteil von knapp unter dreißig Prozent der in Europa anfallenden Altkunststoffe wird also unabhängig vom sonstigen Einsatz von energetischer Verwertung und Deponierung einem stofflichen Recycling zugeführt. Ein stoffliches und werkstoffliches Recycling ist somit derzeit mengenmäßig noch von untergeordneter Bedeutung, auch wenn die EU bestrebt ist, dies zu ändern. So wird etwa im überarbeiteten Kreislaufwirtschaftspaket ein stoffliches Recycling der Altkunststoffe von 55 Prozent bis 2025 als Zielvorgabe genannt [1].

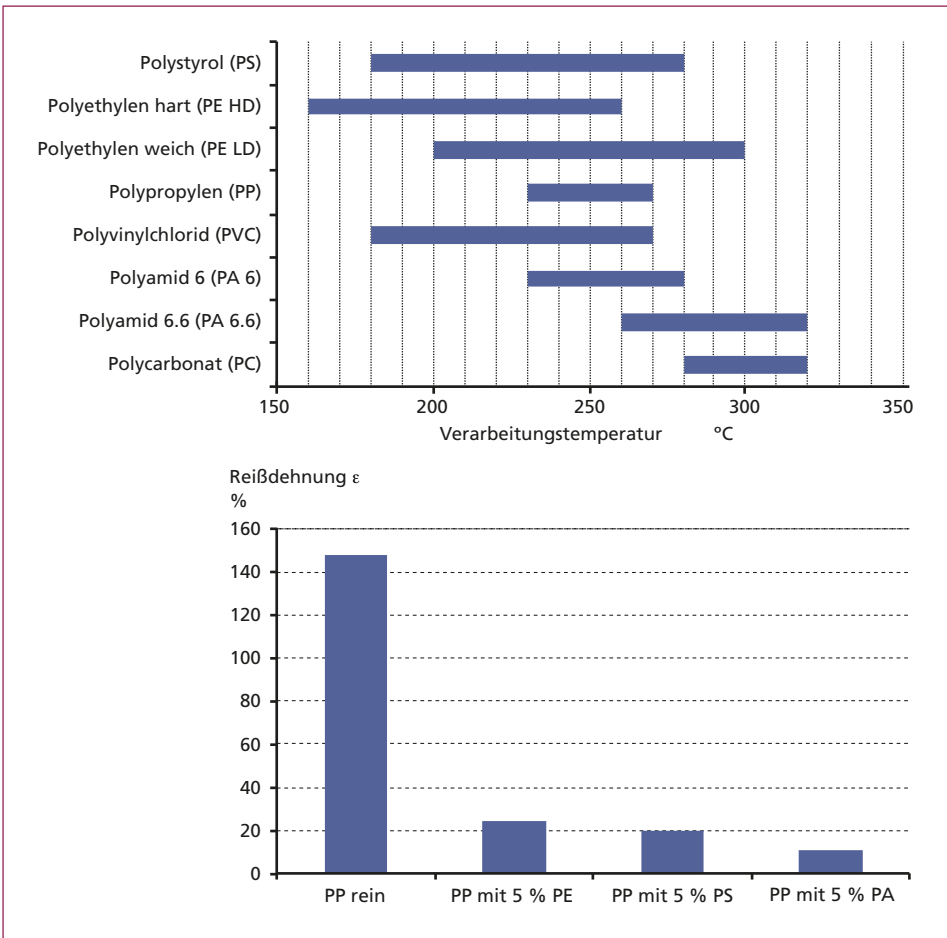


Bild 2: Verarbeitungstemperatur verschiedener Kunststoffe (oben), Änderung der Reißdehnung von Polypropylen (PP) bei Verunreinigungen mit anderen Kunststoffen (unten)

Quelle: Michaeli, W.; Bittner, M.; Wolters, L.: Grundlagen des Kunststoffrecyclings. In: Stoffliches Kunststoff-Recycling. Aachen: Carl Hanser Verlag, 1992, S. 1-10

Die Problematik des stofflichen Kunststoffrecyclings liegt vor allem darin begründet, dass der Großteil der verfügbaren Altkunststoffe in zu heterogener Form anfällt, um die geforderten Reinheitsgrade für Recyclingprodukte zu erfüllen. Die Forderung nach diesen hohen Reinheitsgraden ergibt sich, da viele entscheidende physikalische Eigenschaften von Kunststoffen – Dichte, Hitzebeständigkeit, Zugfestigkeit – bereits durch geringfügige Verunreinigungen stark beeinflusst werden können. In Bild 2 ist dieser Umstand beispielhaft durch zwei Diagramme dargestellt. Im oberen Diagramm sind die Verarbeitungstemperaturen ausgewiesen, bei welchen unterschiedliche Kunststoffe extrudiert und geformt werden können. Die Betriebsbedingungen von Extrudern sind auf die jeweils zu verarbeitenden Kunststoffe bzw. Kunststoffgemenge angepasst. Verunreinigungen können daher die Produktqualität maßgeblich beeinflussen oder den Extruder beschädigen. Im unteren Diagramm ist ersichtlich, wie drastisch sich bereits geringfügige Verunreinigungen auf die Produktqualität auswirken können. So können Prüfkörper aus Polypropylen auf bis zu etwa 150 Prozent gedehnt werden, bevor diese reißen, wohingegen Verunreinigungen von jeweils lediglich fünf Prozent an Polyethylen (PE), Polystyrol (PS) und Polyamid (PA) zu einer drastischen Reduktion der Reißdehnung auf etwa zwanzig Prozent (für PE und PS) und etwa zehn Prozent (für PA) führen [4]. Zu guter Letzt führen auch die vor allem im Bereich der Lebensmittelverpackung geltenden Hygienevorschriften dazu, dass Primärprodukte bevorzugt werden. Aktuell ist daher nur in wenigen Bereichen – wie etwa bei sortenreinen Produktionsabfällen oder bei der Sammlung von Getränkeflaschen – ein stoffliches Recycling wirtschaftlich möglich.

2. RSA Plastic Reborn

2.1. Vorangegangene Arbeiten

An diesem Punkt setzten vor einigen Jahren die Forschungsbemühungen des Lehrstuhls für Verfahrenstechnik des Industriellen Umweltschutzes (VTIU) der Montanuniversität Leoben (MUL) an, als damit begonnen wurde, ein thermochemisches Konversionsverfahren zu entwickeln. Im Gegensatz zu klassischen stofflichen Verwertungsverfahren, bei welchen Kunststoffe meist wieder aufgeschmolzen und regranuliert werden, werden die komplexen Polymerstrukturen hier chemisch in ihre Grundbausteine gespalten. Somit wird zwar nicht der Kunststoff zurückgewonnen, aber die ihm zugrunde liegenden Kohlenwasserstoffverbindungen. In diesem Zusammenhang wird daher nicht von werkstofflichem, sondern von rohstofflichem oder auch chemischem Recycling gesprochen. Im Grunde genommen findet somit die Umkehr des Herstellungsprozesses der Polymere statt. Dieser umgekehrte Prozess, die sogenannte Depolymerisation, kann auf verschiedene Arten erfolgen. Beispielhaft seien Pyrolyse, katalytisches Cracken, thermochemische Konversion oder aber auch der Alterungsprozess von Kunststoffen durch Umwelteinflüsse genannt.

Sowohl der Prozess der Polymerisation, aber noch viel mehr jener der Depolymerisation, sind komplexe Prozesse mit vielen Teilreaktionen und Zwischenprodukten. Um somit bei der Depolymerisation ein qualitativ hochwertiges Produkt zu erhalten,

muss neben einer geeigneten Prozessführung auch ein geeignetes Aufgabegut gefunden werden. Hier bieten sich polyolefinreiche Altkunststoffe an. Begründet ist dies zum einen durch deren Verfügbarkeit, da sie in Form von Verpackungsmaterial, Spiel- sachen und dergleichen nahezu die Hälfte der produzierten Kunststoffe ausmachen und ebendiese eine vergleichsweise kurze Nutzungsdauer aufweisen und früh als Altkunst- stoffe – und damit als Quelle für sekundäre Rohstoffe – anfallen. Zum anderen sind die Polymerstrukturen von Polypropylen und Polyethylen sowie deren Monomeren vergleichsweise einfach (Bild 3), wodurch als Produkte der Depolymerisation eine überschaubare Anzahl an Kohlenwasserstoffverbindungen entsteht.

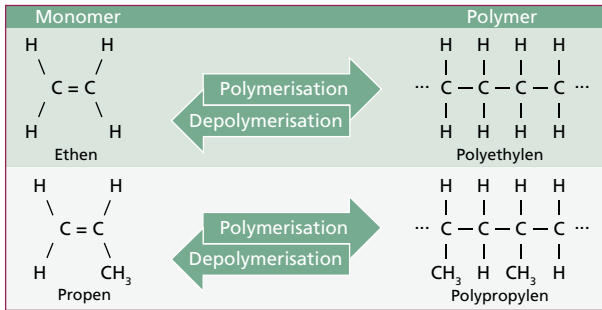


Bild 3:

Mono- und Polymere der Polyolefine

Einige Prozesse, die für das chemische Recycling von Kunststoffen entwickelt wurden, sind daran gescheitert, dass sie entweder zu homogene Altkunststoffe als Aufgabegut benötigen, welche auf Grund der ökonomisch und ökologisch günstigeren Option des werkstofflichen Recyclings nicht zur Verfügung stehen oder, dass die entstehenden Kohlenwasserstoffverbindungen die geforderten Qualitäten für Nachfolgeprozesse nicht erfüllen konnten [3]. Aufgabeseitig erscheint es daher sinnvoll, einen Prozess auf die zumeist bereits standardmäßig betriebenen mechanischen Aufbereitungsschritte von Altkunststoffen wie etwa der Zerkleinerung zur Verbesserung der Aufschlussverhältnisse oder der Magnetscheidung zur Metallentfrachtung aufzubauen. Hier zeigte sich ein nassmechanischer Prozess als besonders günstig. Dabei kann das Trennmerkmal Dichte ausgenutzt werden, da, wie in Tabelle 1 ersichtlich ist, sowohl Polypropylen als auch Polyethylen im Gegensatz zum Großteil der anderen Kunststoffe eine Dichte von kleiner 1 g/cm^3 aufweisen.

Mengenmäßig bedeutende Störstoffe wie Gestein, Glas und Metalle weisen ebenso eine höhere Dichte als Wasser auf, aber auch Papier und Holz können durch entsprechende Wassersättigung einen Dichtebereich über 1 g/cm^3 aufweisen. Somit bietet sich als Aufbereitungsverfahren eine Form der Schwimm-/Sink-Trennung mit dem Trennmedium Wasser an. Zusätzlich vorteilhaft ist hierbei, dass ein Wascheffekt mit einher geht. Der nachteilige Umstand, dass hiermit eine hochkalorische Fraktion nass gemacht und somit ihr Heizwert vermindert wird, ist für ein chemisches Recycling mittels thermochemischer Konversion kein Problem, da zum einen ein gewisser Wasseranteil benötigt wird und zum anderen ausreichend Abwärme für eine entsprechende Trocknung zur Verfügung steht.

Tabelle 1: Dichteübersicht diverser Kunst- und Störstoffe

Stoff	Dichte g/cm ³	Stoff	Dichte g/cm ³
Styropor	0,01-0,30	Schotter	1,70-1,90
Holz (lufttrocken)	0,40-0,80	Beton	1,80-2,45
Papier (lufttrocken)	0,80	Glas	2,20-2,60
Polypropylen (PP)	0,85-0,92	Aluminium	2,71
Polyethylen niedriger Dichte (LD-PE)	0,88-0,93	Granit	2,80
Polyethylen hoher Dichte (HD-PE)	0,94-0,98	Zement	3,00-3,10
Wasser	1,00	Eisenoxid (Rost)	5,10
Polyamid (PA)	1,01-1,16	Gusseisen	7,25
Polystyrol (PS)	1,03-1,08	Zinn	7,28
Polymethylmethacrylat (PMMA)	1,16-1,20	Eisenstahl	7,70
Polyvinylchlorid (PVC)	1,47-1,88	Stahl unlegiert	7,85
Polyethylenterephthalat (PET)	1,33-1,41	Stahl legiert	7,90
Polytetrafluorethylen (PTFE)	2,10-2,30	Kupfer	8,92-8,96

2.2. Das Projekt

Das RSA Plastic Reborn nahm die Forschungsaktivitäten unmittelbar nach erfolgter Förderzusage durch die österreichische Forschungsförderungsgesellschaft (FFG) im Sommer 2014 auf. Die Lehrstühle für Aufbereitung und Veredlung (AuV), Verfahrenstechnik des industriellen Umweltschutzes (VTIU) und Abfallverwertungstechnik und Abfallwirtschaft (AVAW) der Montanuniversität Leoben (MUL) sowie industrielle Partner sind im Projektkonsortium vertreten. Übergeordnetes Ziel ist die Entwicklung eines nassmechanischen Aufbereitungsverfahrens für polyolefinreiche Altkunststofffraktionen, sowohl industrieller als auch kommunaler Herkunft, als Vorbereitung für ein chemisches Recycling mittels thermochemischer Konversion. Zu diesem Zweck legt das RSA Plastic Reborn seinen Fokus auf folgende Arbeitspakete (AP):

- AP1 Identifikation potentiell interessanter Altkunststofffraktionen
- AP2 Bau, Betrieb und Optimierung einer Aufbereitungsanlage im Technikumsmaßstab
- AP3 Quantitative und qualitative Bewertung aller bei den Trennversuchen erzielten Haupt- und Nebenprodukte sowie der anfallenden Prozesswässer
- AP4 Ökologische und ökonomische Bewertung des Aufbereitungsprozesses

2.3. Die Aufbereitungsanlage

Wie aus der Prozesskette in Bild 4 ersichtlich ist, bedarf es zwischen einer i.d.R. trocken durchgeführten mechanischen Vorbehandlung von Altkunststoffen und dem thermochemischen Konversionsprozess eines nassen mechanischen Aufbereitungsschrittes.

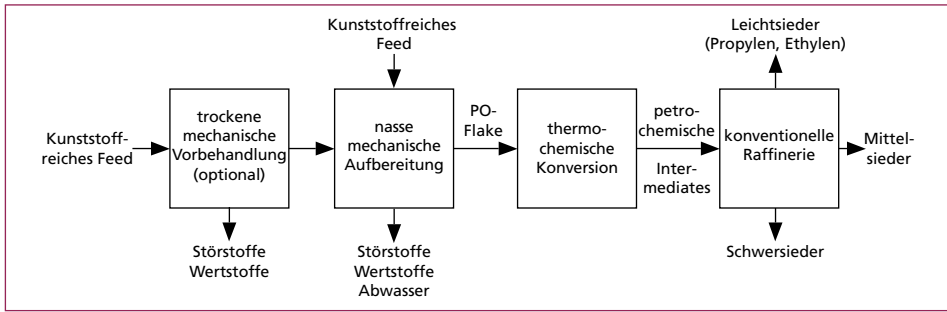


Bild 4: Prozesskette zum chemischen Recycling von Polyolefinen

Quelle: Lehner, M.; Bauer, M.; Hofer, W.: Stoffliches Recycling Polyolefin-reicher Kunststofffraktionen. In: Tagungsband zur 12. DepoTech-Konferenz. Leoben, Österreich: Lehrstuhl für Abfallverwertungstechnik und Abfallwirtschaft, 2014, S. 593-598

Die trockene mechanische Vorbehandlung soll sicherstellen, dass als Aufgabegut vornehmlich kunststoffreiche industrielle Reststoffe verwendet werden, die bereits einer Metallentfrachtung mittels Magnetscheidung sowie einer Zerkleinerung auf Partikelgrößen unter 20 mm unterzogen worden waren.

Während in den ersten Projektjahren die Identifikation potentiell interessanter Alt-kunststofffraktionen (AP 1) von Lehrstuhl AVAW federführend betrieben wurde, erfolgte Bau, Betrieb und Optimierung der Technikumsanlage (AP 2) durch die Lehrstühle AuV und VTIU. Die AP 3 und 4 werden in den folgenden Projektjahren bearbeitet werden. Mittels Verhältniszahlen, orientierenden Untersuchungen im Labormaßstab und unter Einbeziehung von Erfahrungswerten aus der Fachliteratur wurde ein mit einer Kreisel-Pumpe betriebener Zentrifugalkraftscheider ausgelegt, gebaut und in Betrieb genommen. Im Sinne der Überwachung des Trennprozesses sowie dessen Variabilität wurde dieser Zentrifugalkraftscheider zum einen aus Plexiglas angefertigt und zum anderen so gebaut und montiert, dass sowohl dessen Neigung als auch dessen Länge verändert werden konnten. Ergänzt wurde der Zentrifugalkraftscheider durch eine Setzmaschine der Firma Siebtechnik GmbH sowie eine Entwässerungs-Siebmaschine der Firma IFE Aufbereitungstechnik GmbH und diese drei Hauptaggregate zu einer funktionstüchtigen Aufbereitungsanlage verschaltet. Ein vereinfachter Aufbereitungsstammbaum der Technikumsanlage ist in Bild 5 zu sehen.

Zum Schutz der Plexiglaselemente und Schläuche wurde dem Zentrifugalscheider dennoch eine Vorabtrennung zur Ausschleusung von abrasiven Störstoffen (z.B. Metalle, aber auch Sand, Keramik, Glas), wie sie in Reststoffströmen vorkommen können, vorangestellt. Aus einfachen Verfügbarkeitsgründen wurde dazu die Setzmaschine Siebtechnik, Typ SK 3-10 (Aggregat I in Bild 5), verwendet. Diese angeschaffte Technikums-Setzmaschine wurde so ausgewählt, dass sie zur Optimierung des Trennprozesses nicht nur die Variation von Hubfrequenz und -höhe sowie der Setzbettneigung sondern auch die wahlweise Verwendung eines Vorder- oder Seitenausstrages für die Zwischengutfraktion ermöglicht. Im Setzbett ordnen sich die dichteren Störstoffpartikel im unteren Bereich und die weniger dichten Kunststoffpartikel im oberen Bereich an. Am Austrag wird das geschichtete Setzbett mittels Leitblechen in eine Zwischengutfraktion (ZGF)

und eine Schwergutfraktion (SGF) geteilt. In der erstellten Zwischengutfraktion reichern sich die verschiedenen Kunststoffe an. Die Schwergutfraktion beinhaltet Störstoffe wie Glas, Gestein und Metall.

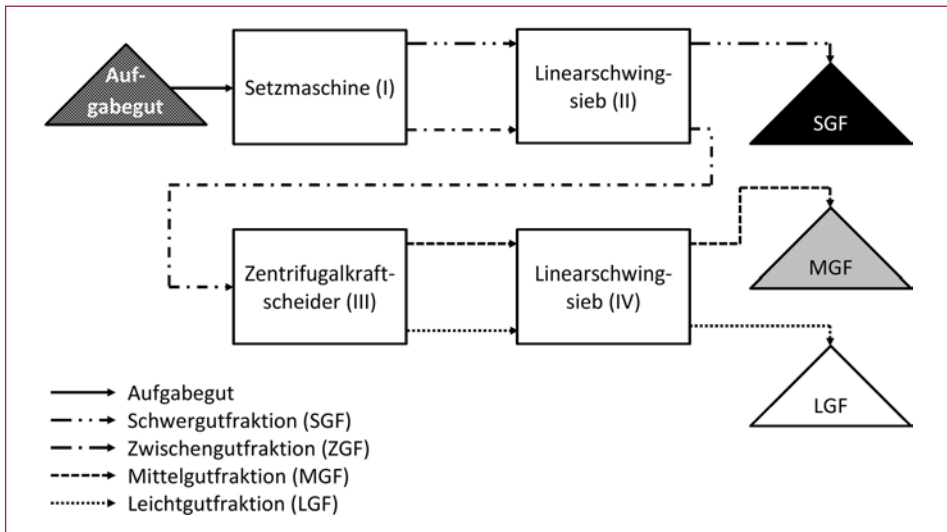


Bild 5: Vereinfachte schaubildliche Darstellung des Aufbereitungsstammbaumes der Techniksanlage Plastic Reborn

Beide Fraktionen werden über das Linearschwingsieb (Aggregat II in Bild 5) in zwei separaten Kompartimenten entwässert. Die entwässerte Schwergutfraktion wird dem Verfahren als Produkt entnommen, die Zwischengutfraktion hingegen dem Zentrifugalkraftscheider (Aggregat III in Bild 5) zugeführt. In diesem werden nun nach dem Trennmerkmal der Partikeldichte – eine genauere Beschreibung findet sich im folgenden Kapitel – mittels des Trennmediums Wasser eine polyolefinreiche Leichtgutfraktion (LGF) und eine Mittelgutfraktion (MGF) aus sonstigen Kunststoffen hergestellt. Diese beiden Fraktionen werden anschließend entwässert (Aggregat IV in Bild 5) und als Produkte entnommen.

2.4. Zentrifugalkraftscheider

Der Zentrifugalkraftscheider ist als sogenannter *Large Coal Dense Medium Seperator* oder kurz *LarCoDeMS* seit den 1980er Jahren im Einsatz. Dabei wurde er anfangs, wie der Name erahnen lässt, im Bereich der Nassmechanischen Kohleaufbereitung verwendet, vereinzelt sind Einsatzfälle in der Erz- und Industriemineralaufbereitung bekannt. Ein Einsatz in der Aufbereitung industrieller Reststoffe zu sekundären Rohstoffen wird etwa seit der Jahrtausendwende untersucht [6].

Bild 6 zeigt das grundlegende Trennprinzip für einen Zentrifugalkraftscheider, bei welchem Trennmedium und -gut im Gegenstrom geführt werden. Dazu wird das verwendete Trennmedium am unteren Ende des geneigten Scheiders tangential eingebracht,

wodurch sich im Scheider ein Fluidwirbel mit Luftkern ausbildet. Direkt in diesen Wirbel wird das zu trennende Aufgabegut am oberen Ende des Scheiders aufgegeben. Jene Anteile, die eine höhere Dichte als das Trennmedium aufweisen, durchwandern das Trennmedium – beschleunigt durch die wirkenden Zentrifugalkräfte – nach außen in Richtung Scheiderwandung und werden als Schwergutfraktion am oberen Ende des Zentrifugalkraftscheideners tangential ausgeschleust. Jene Anteile, welche eine geringere Dichte als das Trennmedium aufweisen, verbleiben im Nahbereich der Grenzschicht zwischen Trennmedium und Luftkern, bewegen sich in Folge der Neigung des Scheiders hinab und werden als Leichtgutfraktion am unteren Ende des Zentrifugalkraftscheideners ausgebracht. Der große Vorteil dieser Schaltung des Trennapparates gegenüber herkömmlichen Zyklonen besteht in der separaten Aufgabe von Trennmedium und -gut. Die verwendete Pumpe wird somit nicht durch die Feststoffpartikel beansprucht.

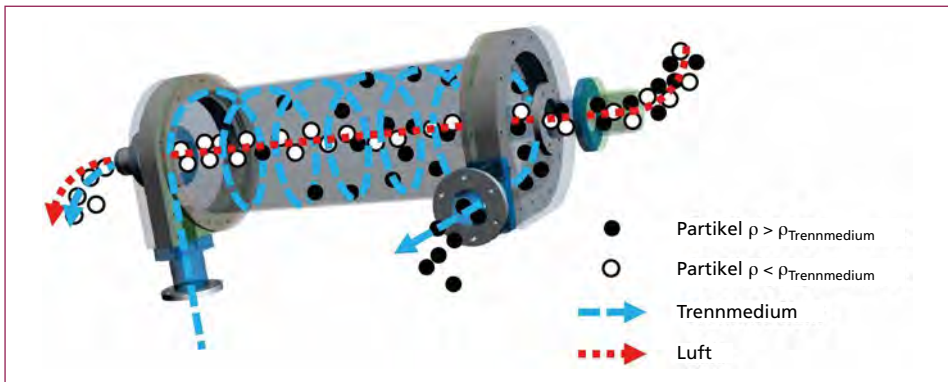


Bild 6: Prinzipdarstellung der Funktionsweise eines Zentrifugalkraftscheideners mit Trennmedium und Aufgabegut im Gegenstrom

Quelle: Schwabl, D.; Flachberger, H.; Kranzinger, L.; Bauer, M.; Hofer, W.: Weiterentwicklung eines nassmechanischen Aufbereitungsverfahrens für Altkunststofffraktionen. In: Tagungsband zur 13. Recy & DepoTech-Konferenz. Leoben: Lehrstuhl für Abfallverwertungstechnik und Abfallwirtschaft, 2016, S. 173-178

3. Versuchsreihen und Ergebnisse

3.1. Parameterstudien am Zentrifugalkraftscheider

Verfolgten erste orientierende Versuche das Ziel, die Funktionsfähigkeit des Trennaggregates zu überprüfen, so wurde in weiterer Folge bereits der Einfluss verschiedener Anlagen- und Gutparameter anhand systematischer Versuchsreihen auf die Qualität der abgeschiedenen Produkte überprüft. Der Zentrifugalkraftscheider wurde bei diesen Untersuchungen stets im Gegenstrom betrieben (Bild 6).

Den Untersuchungen am Zentrifugalkraftscheider wurde ein 2k-faktorieller Test für die Versuchsplanung und -auswertung zugrunde gelegt, da so neben den zu untersuchenden Haupteinflussfaktoren auch deren wechselweisen Beeinflussungen erforscht und

anschließend auf ihre statistische Signifikanz überprüft werden konnten. Es wurden hierfür jeweils 3 Hauptinflussgrößen – die Faktoren – bestimmt und ihnen ein hohes und tiefes Untersuchungsniveau zugeordnet (Tabelle 2).

Tabelle 2: Gewählte Faktoren und Niveaus

Prozessparameter			Gutparameter		
Faktoren	Hoch (+)	Tief (-)	Faktor	Hoch (+)	Tief (-)
A - Pumpdurchsatz	V1	0,8 • V1	A - Partikeldicke	300 µm	100 µm
B - Scheiderneigung	α1	0,5 • α1	B - Partikelgröße	> 10 mm	< 10 mm
C - Scheiderlänge	L1	0,6 • L1	C - Anmischung	Ja	Nein

So ergaben sich 8 mögliche Niveauekombinationen, welche jeweils dreimal untersucht wurden, was 24 Einzelversuche je Versuchsreihe notwendig machte. Um systematische Fehler zu minimieren, wurde die Reihenfolge der Einzelversuche durch Auslösen bestimmt. Die beiden Trennprodukte wurden zur Gänze entnommen, um einen Probenahmefehler zu vermeiden. Im Anschluss wurde die Produktreinheit mittels Schwimm-/Sink-Analyse in Wasser überprüft. In der statistischen Auswertung wurde der Gehalt an Polypropylen in der Leichtgutfraktion als Bezugsgröße gewählt.

3.1.1. Verwendetes Aufgabegut

Für die Parameterstudien wurden Folien aus reinem Polypropylen- (PP, ρ etwa $0,9 \text{ g/cm}^3$) und Polyethylenterephthalatgranulat (PET, ρ etwa $1,3 \text{ g/cm}^3$) in den Dicken 100 und 300 µm hergestellt und auf eine Partikelgröße kleiner 20 mm zerkleinert. Um die Auswertung der Versuche zu vereinfachen, wurden diese Folien jeweils in einer unterschiedlichen Farbe eingefärbt (Bild 7).



Bild 7: Kunststoffflakes PP (links) und PET (rechts)

Im Falle der Parameterstudie zu Anlagenparametern wurde als Aufgabegut jeweils eine Mischung aus 200 g PP- und 300 g PET-Flakes der Dicke 100 μm in trockenem Zustand aufgegeben. Bei der Parameterstudie zu Gutparametern wurden ebenso Mischungen aus 200 g PP- und 300 g PET-Flakes verwendet, jedoch wurden hier je nach Versuchsdurchgang 100 oder 300 μm dicke Flakes aus der Partikelgrößenklassen 20 bis 10 mm oder kleiner 10 mm in trockenem oder angemaischtem Zustand verwendet.

3.1.2. Studie zu Anlagenparametern

Obwohl die erzielten Gehalte an Polypropylen in der Leichtgutfraktion durchgehend über 96 Prozent lagen (Tabelle 3, links), konnten mittels der statistischen Auswertung signifikante Unterschiede aufgezeigt werden. Die erste wichtige Erkenntnis über die Anlagenparameter wird aus den Werten der mittleren Effekte gezogen (Tabelle 3, rechts). Die Werte der Faktoren A und C sind positiv, daher kann geschlussfolgert werden, dass eine hohe Pumpleistung und ein langer Zentrifugalkraftscheider die Aufkonzentrierung von Polyolefinen in der Leichtgutfraktion begünstigen. Der mittlere Effekt von B ist negativ, daher führt eine starke Neigung des Zentrifugalkraftscheiders zu einer stärkeren Verunreinigung der Leichtgutfraktion. Weiters kann der Einfluss der mittleren Effekte gereiht werden, indem ihre Absolutwerte einander vergleichend gegenübergestellt werden. Somit ist die Länge des Zentrifugalkraftscheiders für die Erzielung einer höheren Trenngüte von etwas größerer Bedeutung, als es dessen Neigung und die Pumpleistung sind. Bei dieser Betrachtung wird ersichtlich, dass der Einfluss von Faktorinteraktionen im Vergleich zu jenem der Faktoren selbst von untergeordneter Bedeutung ist.

Mit Hilfe einer Signifikanzanalyse (Tabelle 3, rechts) wurde im Anschluss überprüft, ob die aus den mittleren Effekten gewonnenen Schlussfolgerungen über den Einfluss der Faktoren statistisch signifikant sind. Hier ergibt sich das klare Bild, dass die drei Hauptfaktoren einen signifikanten Einfluss besitzen, die Querbeeinflussungen, bis auf das Zusammenspiel von Länge und Neigung des Zentrifugalkraftscheider, hingegen nicht.

Tabelle 3: Auswertung der Versuche zu Anlagenparametern

Variante	Faktoren*			$g_{\text{PP/LG}}$ %		Faktor*	Mittlerer Effekt**	Test der Signifikanz ($\alpha=0,01$)		
	A	B	C	μ	σ			Variable F_i	Ablehnung F_0	Signifikanz
(1)	-	-	-	98,39	0,332	A	9,00	30,66	8,53	✓
a	+	-	-	98,59	0,667	B	-8,80	29,34	8,53	✓
b	-	+	-	96,41	0,313	C	11,90	53,65	8,53	✓
c	-	-	+	98,82	0,241	AB	4,66	8,23	8,53	×
ab	+	+	-	97,76	0,202	AC	1,26	0,60	8,53	×
ac	+	-	+	99,49	0,009	BC	5,25	10,43	8,53	✓
bc	-	+	+	98,11	0,294	ABC	-1,12	0,47	8,53	×
abc	+	+	+	99,49	0,009					

* A – Pumpleistung; B – Neigung; C – Länge; AB, AC, BC, ABC – wechselweise Beeinflussung

** Zur besseren Darstellbarkeit wurde bei der Berechnung mit 10 multipliziert

Quelle: Schwabl, D.; Flachberger, H.; Kranzinger, L.; Bauer, M.; Hofer, W.: Weiterentwicklung eines nassmechanischen Aufbereitungsverfahrens für Altkunststofffraktionen. In: Tagungsband zur 13. Recy & DepoTech-Konferenz. Leoben: Lehrstuhl für Abfallverwertungstechnik und Abfallwirtschaft, 2016, S. 173-178

3.1.3. Studie zu Gutparametern

Die erzielten Gehalte an Polypropylen in der Leichtgutfraktion sind auch bei dieser Versuchsreihe ausgesprochen hoch ausgefallen, die Schwankungen zwischen den einzelnen Messwerten einer Variante sind sehr gering (Tabelle 4, links). Aus den mittleren Effekten (Tabelle 4, rechts) können einige Erkenntnisse gewonnen werden. Der Wert des Faktors A ist positiv, jener des Faktors B negativ, daher kann geschlussfolgert werden, dass dicke und kleine Partikel eher in der erwünschten Zielfraktion ausgebracht werden. Die Effekte von Dicke und Durchmesser sind nahezu gleich stark ausgeprägt und überwiegen alle anderen auftretenden Effekte. Der mittlere Effekt von C ist geringfügig negativ und würde somit sogar eine nachteilige Auswirkung des Anmischens (Aufgabegut vorab in Wasser lagern) auf den Trennerfolg andeuten. Bei Betrachtung der wechselweise wirkenden Effekte dominiert jener zwischen Partikelgröße und -größe, gefolgt von jenem zwischen Partikelgröße und Anmischen.

Tabelle 4: Auswertung der Versuche betreffs Gutparameter

Variante	Faktoren*			g _{PP, LG} %		Faktor*	Mittlerer Effekt**	Test der Signifikanz ($\alpha=0,01$)		
	A	B	C	μ	σ			Variable F _i	Ablehnung F ₀	Signifikanz
(1)	-	-	-	99,15	0,064					
a	+	-	-	99,90	0,100	A	11,69	69,22	8,53	✓
b	-	+	-	97,99	0,485	B	-12,57	79,98	8,53	✓
c	-	-	+	99,63	0,041	C	-2,19	2,43	8,53	×
ab	+	+	-	99,47	0,128	AB	6,55	21,69	8,53	✓
ac	+	-	+	99,91	0,017	AC	0,55	0,15	8,53	×
bc	-	+	+	96,97	0,567	BC	-4,64	10,90	8,53	✓
abc	+	+	+	99,13	0,209	ABC	2,91	4,30	8,53	×

* A – Dicke; B – Durchmesser; C – Anmischen; AB, AC, BC, ABC – wechselweise Beeinflussung

** Zur besseren Darstellbarkeit wurde bei der Berechnung mit 10 multipliziert

Quelle: Schwabl, D.; Flachberger, H.; Kranzinger, L.; Bauer, M.; Hofer, W.: Weiterentwicklung eines nassmechanischen Aufbereitungsverfahrens für Altkunststofffraktionen. In: Tagungsband zur 13. Recy & DepoTech-Konferenz. Leoben: Lehrstuhl für Abfallverwertungstechnik und Abfallwirtschaft, 2016, S. 173-178

Mit Hilfe der Signifikanzanalyse (Tabelle 4, rechts) ergibt sich das Bild, dass die Hauptfaktoren A und B einen signifikanten Einfluss besitzen, C jedoch nicht. Dieses Erkenntnis passt zu dem vergleichsweise niedrigen Wert von C und der Annahme, dass Kunststoffe nur sehr geringfügig durch das Anmischen beeinflusst werden, ganz im Gegenteil zu Begleitstoffen, welche auch aus Papier, Holz oder anderen biogenen Stoffen bestehen. Interessanter Weise zeigt sich, dass auch die Quereinflussungen von Dicke und Durchmesser sowie von Durchmesser und Anmischen signifikant sind.

3.2. Versuchsreihen zur Trennleistung

Im Fokus der Trennversuche mit industriellen Reststoffen stand die Frage, ob die vorhandene Technikumsanlage unter Einstellung der zuvor ermittelten optimalen Anlagenparameter in der Lage ist, diese zu verwertbaren Produkten aufzubereiten.

Als Zielwerte für eine verwertbare Leichtgutfraktion wurden ein Polyolefingehalt und ein Polyolefinausbringen von mindestens neunzig Prozent entsprechend den Anforderungen des Nachfolgeprozesses festgelegt.

3.2.1. Verwendetes Aufgabegut

Die zu behandelnden industriellen Reststoffe wurden in BigBags in metallentfrachteter und vorzerkleinerter Form angeliefert. Bild 8 zeigt Teilproben der drei ausgewählten industriellen Reststoffe. Sie wurden für diese Veröffentlichung ausgewählt, da sie repräsentative Vertreter für industrielle Reststoffe mit sehr hohem (A), durchschnittlichem (B) und sehr niedrigem (C) Polyolefingehalt sind.



Bild 8: Industrielle Reststoffe A, B und C (von links nach rechts)

Um Vergleichswerte für die unter idealen Bedingungen bestenfalls erzielbare Trennergebnisse zur Verfügung zu haben, wurden zuvor systematische Rohgutcharakterisierungen aller verwendeten industriellen Reststoffe mittels aufbereitungstechnischer Merkmalsklassenanalyse vorgenommen. Als Ergebnis der im Aufbereitungslabor des Lehrstuhls AuV durchgeführten Rohgutcharakterisierungen wurden Schaubilder hinsichtlich Partikelgrößen- sowie Polyolefinverteilung angefertigt. Die Partikelgrößenverteilungen sind in Bild 9 bis Bild 11 (jeweils linkes Diagramm), die Polyolefinverteilungen in Bild 9 bis Bild 11 (jeweils rechtes Diagramm) auf grafischem Wege veranschaulicht. Die mittleren Polyolefingehalte \bar{g}_{PO} sind als gestrichelte Linien in den Diagrammen dargestellt.

Tabelle 5 weist die d_{80} -Werte bzw. die mittleren Polyolefingehalte der drei ausgewählten industriellen Reststoffe aus.

Tabelle 5: Aufbereitungstechnische Kennwerte der Reststoffe

Reststoff	d_{80} mm	\bar{g}_{PO} %
A	7,8	55,8
B	9,8	34,4
C	10,9	11,8

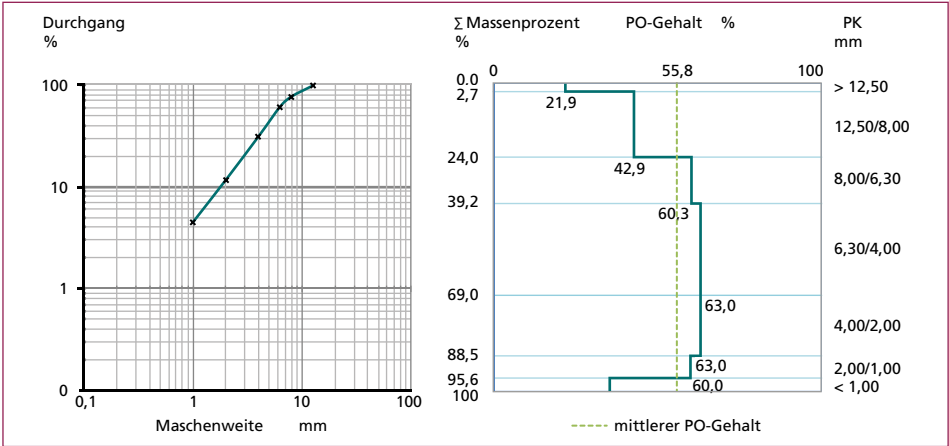


Bild 9: Partikelgrößen- (links) und Polyolefinverteilung (rechts) für Reststoff A

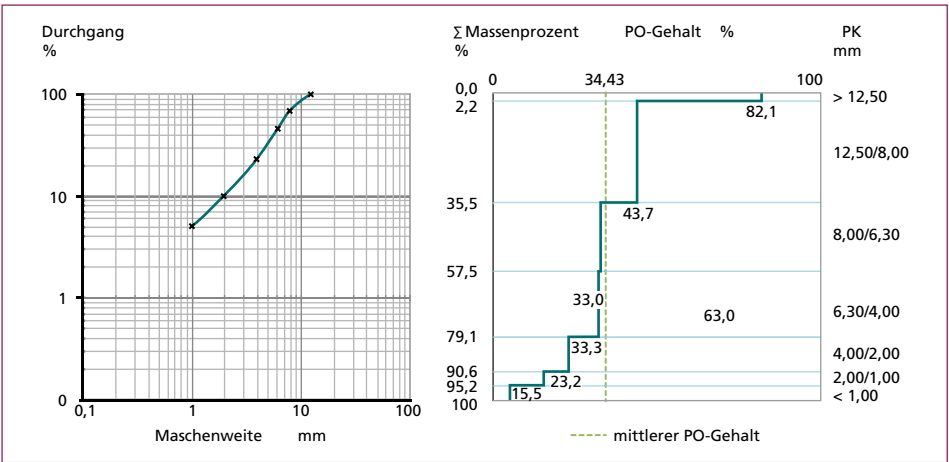


Bild 10: Partikelgrößen- (links) und Polyolefinverteilung (rechts) für Reststoff B

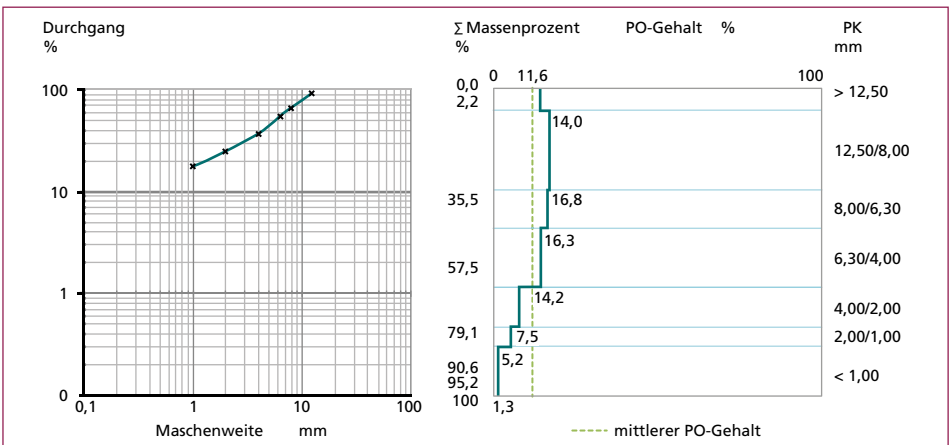


Bild 11: Partikelgrößen- (links) und Polyolefinverteilung (rechts) für Reststoff C

3.2.2. Versuchsreihen in Form eines zweistufigen Trennprozesses

Mit jedem der auf Aufbereitbarkeit geprüften Reststoffe wurden zwei Versuchsdurchläufe durchgeführt, wobei im Zuge des Ersten, Proben zur Schadstoffanalytik gezogen und im Zuge des Zweiten die Produkte zur Qualitätsüberprüfung und Erstellung von Bilanztafeln entnommen wurden. Das jeweils zuvor angemischte Aufgabegut wurde zunächst der Setzmaschine zugeführt, aus der im Batch-Betrieb eine kunststoffreiche Zwischen- und eine störstoffreiche Schwergutfraktion ausgetragen wurden. Die Zwischengutfraktion wurde hierauf dem Zentrifugalkraftscheider aufgegeben, welcher eine polyolefinreiche Leicht- und eine mit anderen Kunststoffen angereicherte Mittelgutfraktion erzeugte (Bild 5). Für die Erstellung der Bilanztafeln wurde jeweils die gesamte Menge der drei erhaltenen Trennprodukte entnommen und einer Schwimm-/Sink-Analyse mit Wasser unterzogen. Die so gewonnenen Fraktionen wurden getrocknet, ausgewogen und daraus die Bilanztafel erstellt.

Bei diesen Versuchen wurde auf Ausbringen gefahren, d.h. es wurde versucht, die Wertstoffpartikel möglichst vollständig in die Leichtgutfraktion auszubringen. Hierzu wurde die Betriebsweise im Gegenstrom gewählt (Bild 6), dabei werden alle Partikel in den Grenzbereich zwischen Luftkern und Trennmedium eingebracht, welcher direkt in den Austrag der Leichtgutfraktion mündet. Die Polyolefinpartikel müssen somit im Gegensatz zu den Störstoffpartikeln das Trennmedium nicht durchwandern. Damit wird erreicht, dass nahezu alle Polyolefinpartikel in die Leichtgutfraktion übergehen, wodurch sehr hohe Werte an Inhaltsausbringen – Anteil der Polyolefinpartikel, die von der Aufgabe in die Leichtgutfraktion gelangen – erreicht werden. Nachteil dieser Betriebsweise ist, dass Fehlausträge von Störstoffen in die Leichtgutfraktion in Kauf zu nehmen sind.

Bild 12 stellt die erhaltenen Ergebnisse hinsichtlich Masseausbringen und erzielten Polyolefingehalten für die drei Reststoffe A (blau), B (grün) und C (rot) einander vergleichend gegenüber. In diesem Diagramm sind das Aufgabegut (Raute), die Schwer- (Dreieck), Zwischen- (Kreuz), Mittel- (Kreis) und Leichtgutfraktion (Quadrat) dargestellt. Das Aufgabegut wird mittels der Setzmaschine in eine Schwer- und Zwischengutfraktion getrennt, die gestrichelten Pfeile repräsentieren diesen Trennvorgang. Die Zwischengutfraktion wird mittels Zentrifugalkraftscheider in eine Leicht- und Mittelgutfraktion getrennt, was durch die punktierten Pfeile dargestellt ist.

Diese Darstellung lässt erkennen, dass bereits die nassmechanische Vorstufe eine signifikante Aufkonzentrierung an Polyolefinen in der Zwischengutfraktion bewirkt. Alle Schwergutfractionen befinden sich im Nahbereich der Ordinate was zeigt, dass lediglich geringe Anteile an Polyolefinen verloren gingen. Der Einsatz des Zentrifugalkraftscheiders bewirkte bei Reststoff A und C eine signifikante Erhöhung des Polyolefingehaltes in der Zielfraktion. Bei Reststoff B konnte dies hingegen nicht festgestellt werden.

Es zeigte sich, dass der zweistufige Trennprozess erfolversprechend ist. Störstoffe wurden überwiegend in die Schwer- und Mittelgutfractionen ausgetragen, ohne dabei signifikante Mengen an Polyolefinen zu verlieren. Die erzeugten Leichtgutfractionen wiesen doppelt bis vierfach höhere Gehalte an Polyolefinen als das entsprechende Aufgabegut auf.

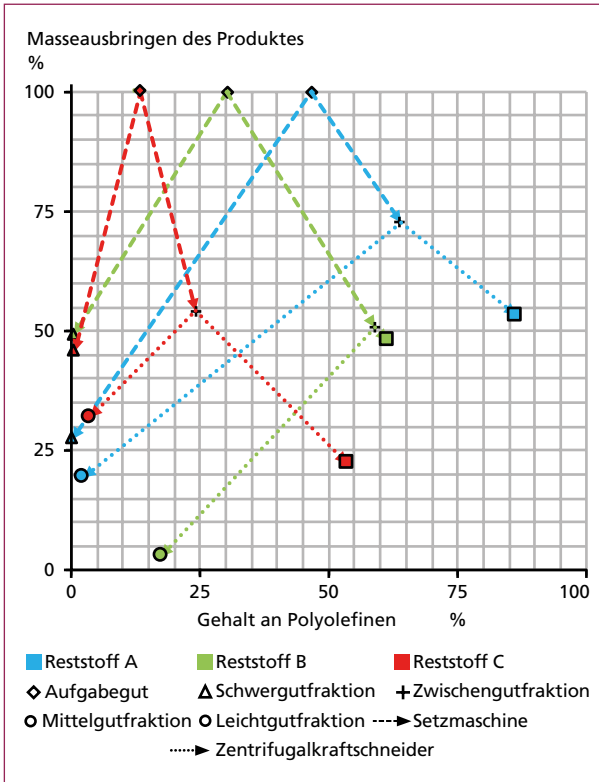


Bild 12:

Ergebnisse des zweistufigen Trennprozesses

Für die Erzielung höherer Gehalte wurde eine Nachreinigungsstufe in Form einer weiteren Zentrifugalkraftscheiderstufe durchgeführt (siehe 3.2.3), die auf Anreicherung gefahren wurde, um die für den Nachfolgeprozess geforderten Polyolefingehalte von neunzig Prozent zu erreichen.

3.2.3. Versuchsreihen in Form eines dreistufigen Trennprozesses

Da die geforderten Polyolefingehalte für das thermochemische Konversionsverfahren in der zweistufigen Verschaltung nicht erreicht werden konnten, war der Einsatz einer weiteren Anreicherungsstufe erforderlich. Die einfachste Variante stellt die Ergänzung um eine weitere Zentrifugalkraftscheiderstufe dar. Da aber bisher nur ein Prototyp zur Verfügung steht, wurde eine zweite Stufe dadurch simuliert, dass Mittel- und Leichtgutfraktion nochmals in separaten Versuchsläufen dem Zentrifugalkraftscheider aufgegeben wurden. In beiden Fällen wurde abermals der Gegenstrombetrieb (vergleiche Bild 6) gewählt.

In Bild 13 sind Verschaltungsvarianten 1 und 2 vereinfacht dargestellt. Sie bilden als Reinigungsstufe eine Erweiterung des in Bild 5 ersichtlichen Aufbereitungsprozesses wo sie zwischen dem Zentrifugalkraftscheider (Aggregat III) und dem Entwässerungssieb (Aggregat IV) angesiedelt sind.

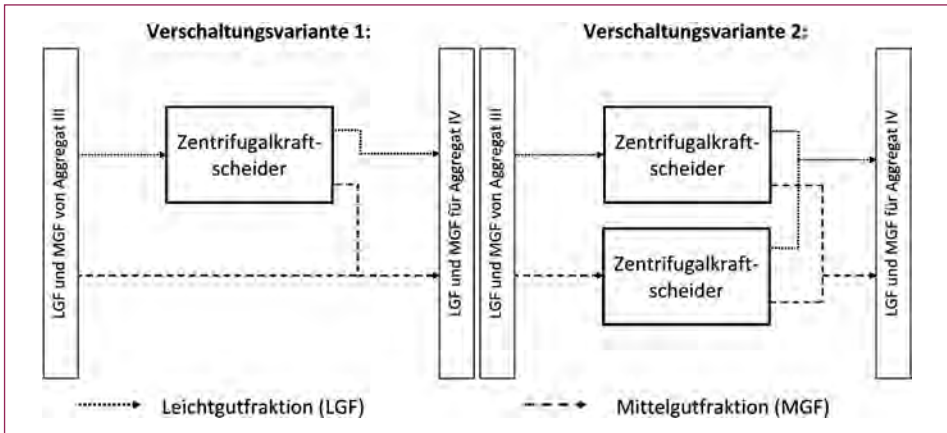


Bild 13: Verschaltungsvarianten für Reinigungsstufe im Gegenstrombetrieb

Bei einer Reinigungsstufe nach Verschaltungsvariante 1 (Bild 13, links) wird ausschließlich die aus dem Zentrifugalkraftscheider (Aggregat III) erhaltene Leichtgutfraktion einer Nachreinigung durch einen weiteren Zentrifugalkraftscheider unterzogen. Es entsteht somit eine nachgereinigte Leichtgutfraktion, aus der weitere Störstoffe abgeschieden und in die ansonsten nicht behandelte Mittelgutfraktion ausgetragen wurden. Beide Fraktionen werden zur Entwässerung in das Linearschwingsieb (Aggregat IV) überführt.

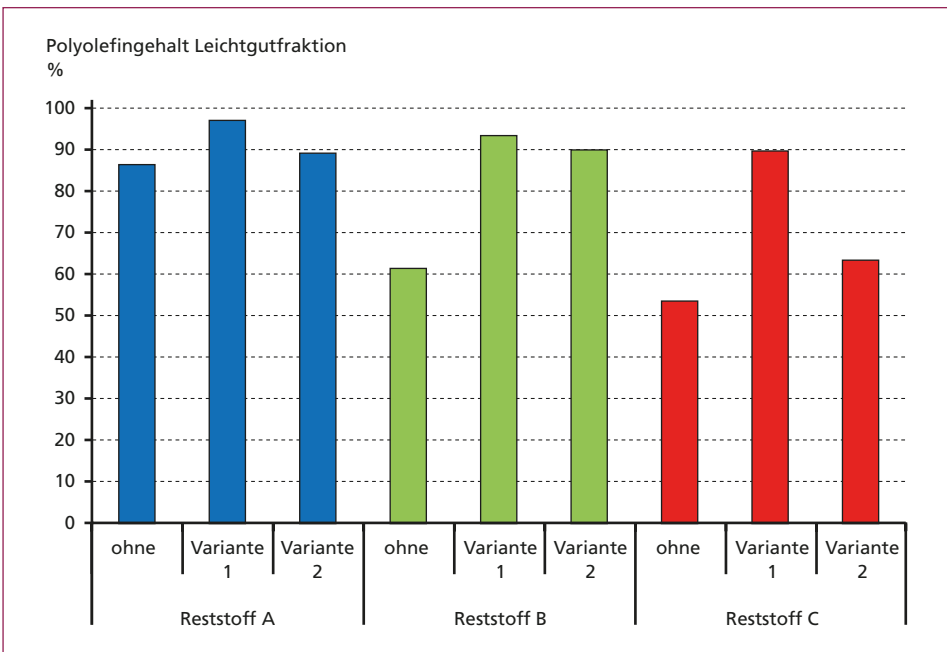


Bild 14: Polyolefingehalte in der Leichtgutfraktion ohne und mit Reinigungsstufe

Wird die Reinigungsstufe nach Verschaltungsvariante 2 (Bild 13, rechts) aufgebaut, so werden sowohl die aus dem Zentrifugalkraftscheider (Aggregat III) erhaltene Leicht- als auch die Mittelgutfraktion in separaten Zentrifugalkraftscheidern behandelt. Die erhaltenen Schwimmanteile werden zu einer nachgereinigten Leichtgutfraktion, die erhaltenen Sinkanteile zu einer nachgereinigten Mittelgutfraktion vereint. Diese Fraktionen werden zur Entwässerung in das Linearschwingsieb (Aggregat IV) ausgetragen.

Wie in Bild 14 ersichtlich ist, eignet sich Verschaltungsvariante 1 besser zur Steigerung der Qualität der Leichtgutfraktionen. Mit dieser Reinigungsstufe wurden für alle drei industriellen Reststoffe die für eine Verwendung im thermochemischen Konversionsprozess verlangten Gehalte an Polyolefinen von neunzig Prozent erreicht.

4. Zusammenfassung und Ausblick

Durch einfache Orientierungsversuche sowie umfassende Versuchsreihen mit Kunststoffflakes und deren statistische Auswertung konnte die grundsätzliche Eignung eines Zentrifugalkraftscheiders zur Trennung verschiedener Kunststoffgemenge anhand des Trennmerkmals Dichte nachgewiesen werden, da stets Polyolefingehalte in der Leichtgutfraktion von über 96 Prozent erreicht wurden. Durch statistische Auswertung der Versuchsreihen mit Kunststoffflakes konnten auch optimierte Anlagen- und Gutparameter erarbeitet werden. So erwies sich der Betrieb eines langen, wenig geneigten Zentrifugalkraftscheiders mit hoher Pumpleistung als vorteilhaft. Ebenso konnte festgestellt werden, dass kleine, aber dicke Partikel besser für dieses Trennaggregat geeignet sind. Darauf aufbauende Trennversuche mit industriellen Reststoffen als Aufgabegut konnten mit ihren ersten Ergebnissen bestätigen, dass ein nassmechanisches Aufbereitungsverfahren – das sich aus einer Kombination von Setzmaschine und zwei in Serie verschalteten Zentrifugalkraftscheidern zusammensetzt – genutzt werden kann, um hochwertige Polyolefinkonzentrate zu erzeugen. Die Versuchsreihen zeigten auf, dass (unter Inkaufnahme von Wertstoffverlusten im Ausmaß von im Schnitt lediglich fünf Prozent) Produkte mit Polyolefingehalten von etwa neunzig Prozent erzielt werden können, wodurch eine Verwendung in einem thermochemischen Konversionsprozess möglich ist.

Das gegenständliche nassmechanische Aufbereitungsverfahren kann somit als Brückenprozess zwischen der bereits verbreiteten trocken betriebenen mechanischen Vorbehandlung kunststoffreicher Reststoffe und einem werkstofflichen Recycling mittels thermochemischer Konversion eingesetzt werden. Es ist somit dazu geeignet zusätzliche Altkunststofffraktionen für ein rohstoffliches Recycling zugänglich zu machen und damit ganz im Sinne des Kreislaufwirtschaftsplanes der EU [1] eine Steigerung der stofflichen Verwertungsquote von Altkunststoffen zu ermöglichen.

5. Literatur

- [1] EC (Europäische Kommission): Proposal for the Directive 94/62/EG of the European Parliament and of the Council 5 Dezember 2015 on packaging and packaging waste (ed.) (2015). EC (Europäische Kommission), Brüssel, 2015
- [2] Lehner, M.; Bauer, M.; Hofer, W.: Prozesskette zum stofflichen Recycling von Kunststoffabfällen. Berg- und Hüttenmännische Monatshefte, Mai 2016, S. 246-251

- [3] Lehner, M.; Bauer, M.; Hofer, W.: Stoffliches Recycling Polyolefin-reicher Kunststofffraktionen. In: Tagungsband zur 12. DepoTech-Konferenz. Leoben, Österreich: Lehrstuhl für Abfallverwertungstechnik und Abfallwirtschaft, 2014, S. 593-598
- [4] Michaeli, W.; Bittner, M.; Wolters, L.: Grundlagen des Kunststoffrecyclings. In: Stoffliches Kunststoff-Recycling. Aachen: Carl Hanser Verlag, 1992, S. 1-10
- [5] Plastics Europe: Plastics – the Facts 2016. Plastics Europe, Wemmel, Belgien, 2016
- [6] Schubert, H: Dichtesortierung, Zentrifugalkraftscheider. In: Aufbereitung fester Stoffe Band II: Sortierprozesse. Stuttgart: Deutscher Verlag für Grundstoffindustrie, 1996, S. 26-34
- [7] Schwabl, D.; Flachberger, H.; Kranzinger, L.; Bauer, M.; Hofer, W.: Weiterentwicklung eines nassmechanischen Aufbereitungsverfahrens für Altkunststofffraktionen. In: Tagungsband zur 13. Recy & DepoTech-Konferenz. Leoben: Lehrstuhl für Abfallverwertungstechnik und Abfallwirtschaft, 2016, S. 173-178