

Bestandsaufnahme und mögliche Perspektiven der nass-mechanischen Aufbereitung von Altkunststoffen für das rohstoffliche Recycling

Markus Bauer · Markus Lehner · Daniel Schwabl · Helmut Flachberger · Lukas Kranzinger · Roland Pomberger · Wolfgang Hofer

Online publiziert: 6. September 2017

© Der/die Autor(en) 2017. Dieser Artikel ist eine Open-Access-Publikation.

Zusammenfassung Um die Qualität einer polyolefinreichen Altkunststofffraktion für das rohstoffliche Recycling sicherzustellen und den Grundstein für eine technisch-ökonomische Machbarkeit dieser ergänzenden chemischen Kunststoffrecyclingroute zu legen, studiert dieser Beitrag bestehende mechanische Abfallaufbereitungstechnik sowie „Out of the box“-Verfahren der Kohle- und Mineralrohstoffaufbereitung.

Der umfassende Vergleich etablierter trockener und alternativer nasser mechanischer Aufbereitungsverfahren rückt insbesondere nasse Dichtentrennverfahren, im Detail die Schwimm-Sink-Scheidung in einem zylindrischen Zentrifugalkraftscheider, in den Fokus. Der Zentrifugalkraftscheider überzeugt

durch einfache, robuste Bauweise geringer Komplexität und hohe spezifische Durchsätze, gepaart mit einer selektiven Trennung durch beschleunigtes Partikelabsetzen im Zentrifugalkraftfeld, wobei der von der Trennmediumzufuhr entkoppelte Feststoffeintrag für eine gesteigerte Verweilzeit sorgt.

Diverse Versuchskampagnen in einer zur Dichteabtrennung der Polyolefine installierten Pilotanlage, mit dem Zentrifugalkraftscheider als Kernelement und einer Hydrosetzmaschine zur Vorabscheidung schwerer Partikel, führt insbesondere bei zweistufigem Betrieb zu Polyolefingehalten und -auszugsraten in das erzeugte Leichtgut von durchwegs mehr als 90 %. Dabei wurden repräsentative Abfallfraktionen mit einem anfänglichen Polyolefingehalt von ~10–50 % aufgearbeitet. Bei der einstufigen Trennung sind vor allem Abschläge bei den Polyolefingehalten im Leichtgut hinzunehmen. Hohe Scheiderlängen, geringe Neigungen und hohe Trennmediumvolumenströme konnten als vorteilhaft für eine scharfe Trennung identifiziert werden.

Die numerische Abbildung des Schwimm-Sink-Trennprozesses im Zentrifugalkraftscheider, unter Berücksichtigung wichtiger verfahrenstechnischer Einflussgrößen durch die Schleuderrzahl von 15 und die Absetzzahl von 44 (Verweilzeit/Absetzzeit) konnte nicht nur dessen durch die Versuchsergebnisse bereits dargelegten Vorzüge in der Dichtentrennung gegenüber anderen Scheidern bestätigen, sondern kann auch als veritable Grundlage für eine erfolgreiche Scale-up-Strategie und Maßstabsübertragungen bewertet werden.

A survey on wet mechanical processing of post-consumer plastics for feedstock recycling and derived prospects

Abstract This contribution focuses on current mechanical waste processing technologies as well as out of the box processes in the field of coal and mineral resources processing to ensure the quality of a polyolefin-rich post-consumer plastic fraction for feedstock recycling and moreover, to provide the basis for a technical and economic feasibility of latter chemical recycling route. When evaluating established dry and alternative wet mechanical processes especially sink-float separation in a cylindrical centrifugal force separator stands out. The centrifugal force separator representing density separation combines the advantages of a simple, rugged apparatus of low complexity and high capacities as well as a selective separation promoted by accelerated particle settling in the centrifugal field, in which the disconnection of the separation medium feed from the solid particles inlet causes increased residence times.

In reference to the above findings a pilot scale plant was built, which embraces a centrifugal force separator and a hydro jig for heavy waste components pre-separation. Conducted test campaigns to separate polyolefins from various waste fractions show polyolefine contents in the produced light fraction and total polyolefine recoveries of almost 90% when two-stage processing in the centrifugal force separator is applied. One-stage processing leads to reduced polyolefine contents in the light fraction. The processed waste fractions offered diverse initial polyolefine contents varying between 10–50%.

The calculation of the ratio centrifugal to gravitational acceleration, called z-number, and the ratio residence to

DI Dr. M. Bauer (✉) ·
Univ.-Prof. DI Dr. M. Lehner
Lehrstuhl für Verfahrenstechnik
des industriellen Umweltschutzes,
Montanuniversität Leoben,
Franz-Josef-Straße 18, 8700 Leoben,
Österreich
markus.bauer@unileoben.ac.at

DI D. Schwabl ·
Univ.-Prof. DI Dr. H. Flachberger
Lehrstuhl für Aufbereitung und
Veredlung, Montanuniversität Leoben,
Franz-Josef-Straße 18, 8700 Leoben,
Österreich

DI L. Kranzinger ·
Univ.-Prof. DI Dr. R. Pomberger
Lehrstuhl für
Abfallverwertungstechnik
und Abfallwirtschaft,
Montanuniversität Leoben,
Franz-Josef-Straße 18, 8700 Leoben,
Österreich

DDI W. Hofer
OMV Refining & Marketing GmbH,
Trabrennstraße 6–8, 1020 Wien,
Österreich

settling time, called settling number, enable a numerical transformation of the sink-float process in the centrifugal force separator by considering also crucial influence parameters. Resulting in a z-number of 15 and settling number of 44 respectively these two characteristic numbers further confirm centrifugal force separators' benefits in post-consumer plastic density separation among other separators, which has been already indicated by the introduced test results. Furthermore they can be used to develop a successful scale-up strategy.

1 Einleitung

Es ist unumstritten, dass der Werkstoff Kunststoff in seinen unterschiedlichsten Ausprägungsformen, chemischen Zusammensetzungen und leistungsfähigen Verbunden aus der heutigen hochtechnisierten Welt nicht mehr wegzudenken ist. Kunststoffe zeichnen sich durch ihre vielseitige Anwendbarkeit, einfache produktspezifische Verarbeitbarkeit, geringes Gewicht bei nahezu identischen Materialkennwerten und nicht zuletzt großen Kostenvorteilen aus.

Diese für den Anwender vorteilhaften Eigenschaften führen jedoch auch zu einer raschen und bedenkenlosen Austauschbarkeit. Darunter fällt auch der verstärkt diskutierte Begriff der Obsoleszenz. Am Ende des häufig sehr kurzen Lebenszyklus diverser Produkte und Güter stellt der enthaltene Kunststoff die Abfallwirtschaft in ihrem nachhaltigen Umgang unter dem Aspekt der Ressourcenschonung und -effizienz vor große Herausforderungen. Ziel muss es sein, durch stoffliches Recycling aus Kunststoff wieder Kunststoff – in zwar verlustbehafteten jedoch endlosen Zyklen – zu gewinnen.

Gemäß Zahlen von 2014 werden in Europa (Europäische Union (EU) 28 + Sz, Nor) 39,5% der insgesamt 25,8 Mio. t angefallener Kunststoffabfälle oder Altkunststoffe (engl. post-consumer plastics) thermisch verwertet, 30,8% deponiert und 29,7% mechanisch recycelt (Plastics Europe 2016). Für Österreich wird im mechanischen Recycling eine Quote von 33,4% nach Reh et al. (2014) angegeben. Dies bedeutet, dass trotz ständiger Zunahme des Recyclinganteils über die Jahre noch immer ca. 70% dieser wertvollen Kohlenwasserstoffe zeitlich unmittelbar durch die Oxidation in der Verbren-

nung oder durch langfristige Abbauprozesse im Deponiekörper zu CO₂ und H₂O umgewandelt werden und somit für eine stoffliche Nutzung als Sekundärrohstoff verloren gehen. Setzt man für Europa die Menge an recycelten Altkunststoffen (7,7 Mio. t) ins Verhältnis zum Kunststoffverbrauch von 47,8 Mio. t 2014 (Plastics Europe 2015) erhält man einen Anteil von ca. 16%, der durch Recycling substituiert werden konnte. Bei dieser Betrachtung bleiben natürlich wesentliche Aspekte der Qualitätsunterschiede von primären und sekundären Rohkunststoffen, z. B. als Granulate oder Pellets, sowie die detaillierte Evaluierung der Bilanzgrenzen unberücksichtigt, daher ist dieser vorherige Wert für den Substitutionsanteil auch als fiktiv zu bezeichnen. Hinsichtlich der Schließung von Stoffkreisläufen hat Stahl, der von Kunststoff zunehmend in vielen Anwendungen verdrängt wurde bzw. verdrängt wird, dem Kunststoff einiges voraus. Gemäß BIR (2014) liegt der Anteil des Einsatzes von Stahlschrotten (91,3 Mio. t) bei der gesamten europäischen Rohstahlerzeugung (169,3 Mio. t) bei 53,9%, wobei hier davon ausgegangen werden kann, dass keine Qualitätseinbußen durch das Substitut Stahlschrott als Sekundärrohstoff hinzunehmen sind.

Ein Hauptgrund für den offensichtlichen Aufholbedarf bei der Schließung des Stoffkreislaufes für Kunststoffe liegt im Mangel an Alternativen zum mechanischen Recycling. Dieses kann aber aufgrund der eingesetzten Prozesskette zum Großteil die geforderten Werkstoffqualitäten der Produkte im Vergleich zum primären Produktionsprozess nicht darstellen. Seien es nur Beeinträchtigungen in Farbe und Geruch neben den herabgesetzten mechanischen, physikalischen und chemischen Eigenschaften, die trotz des Einsatzes intensiv aufbereiteter sortenreiner Altkunststofffraktionen eine Verwendung in vielen Bereichen, insbesondere dem Hauptanwendungsgebiet Verpackungen (ca. 40% des gesamten europäischen Kunststoffverbrauches; Plastics Europe 2016), unmöglich machen. Auch im Hinblick auf die Bestrebungen der EU hin zu gesteigerten Recyclingquoten sowohl gemäß Vorschlag der Europäischen Kommission zum Kreislaufwirtschaftspaket, in welchem die Wiederverwendung und das Recycling von Siedlungsabfällen auf 70% bis 2030 (Europäische Kommission 2014) angehoben werden soll, als auch im

Vorschlag zur Änderung der Richtlinie 94/62/EG über Verpackungen und Verpackungsabfälle vom 02.12.2015 (Europäische Kommission 2015), in welchem die Recyclingquote von Kunststoffen auf 55% erhöht werden soll, rückt die Option des rohstofflichen Recyclings (Feedstock Recycling, chemisches Recycling) unter Einsatz der Verfahren der Pyrolyse oder Vergasung bzw. katalytischem oder thermischem Cracken immer mehr in den Fokus. Diese Verfahren versprechen insbesondere durch Kopplung mit klassischen Verfahren des Raffineriewesens und der Petrochemie eine endlos wiederholbare Kreislaufführung der wertvollen Kohlenwasserstoffe zur Produktqualität von konventionell erzeugter Neuware. Wie in allen Recyclingprozessen müssen natürlich gewisse Verluste in Kauf genommen werden. Zweifelsohne ist eine Annäherung oder gar ein Erreichen dieser sehr ambitionierten Recyclingziele der EU, insbesondere im Verpackungsbereich, eng mit der Steigerung des Anteils an recycelten Altkunststoffen verknüpft. Ein Blick in die Historie der zuvor erwähnten thermo-chemischen Konversionsverfahren (Depolymerisations-, Verölungsverfahren etc.) zeigt deutlich, dass die Chance auf eine erfolgreiche Umsetzung und Etablierung dieser Technologie sehr stark von der Verfügbarkeit eines definierten Einsatzstoffstroms bestimmter Qualität und Quantität abhängig ist. Des Weiteren ist bekannt, dass sich vor allem die Polyolefine PO (Polyethylen PE und Polypropylen PP), die den Hauptanteil am weltweiten Kunststoffverbrauch und -abfall ausmachen, sehr gut als Einsatzstoff für diesen Zweck eignen.

Vor diesem Hintergrund widmet sich dieser Beitrag der Sicherstellung der Qualität (Reinheit, PO-Gehalt) einer polyolefinreichen Altkunststofffraktion für das rohstoffliche Recycling durch eine umfassende Studie bestehender und potenzieller mechanischer Aufbereitungstechnik sowohl im Abfallsegment als auch mittels Blick – „out of the box“ – in den Bereich der Kohle- und Mineralrohstoffaufbereitung. Die mechanische Aufbereitung wird als wichtiger Baustein zur Erreichung der geforderten Qualitäten und somit technischen und ökonomischen Machbarkeit dieser chemischen Route des Kunststoffrecyclings gesehen. Aspekte der quantitativen Sicherung der sekundären Ressource Altkunststoffe ein-

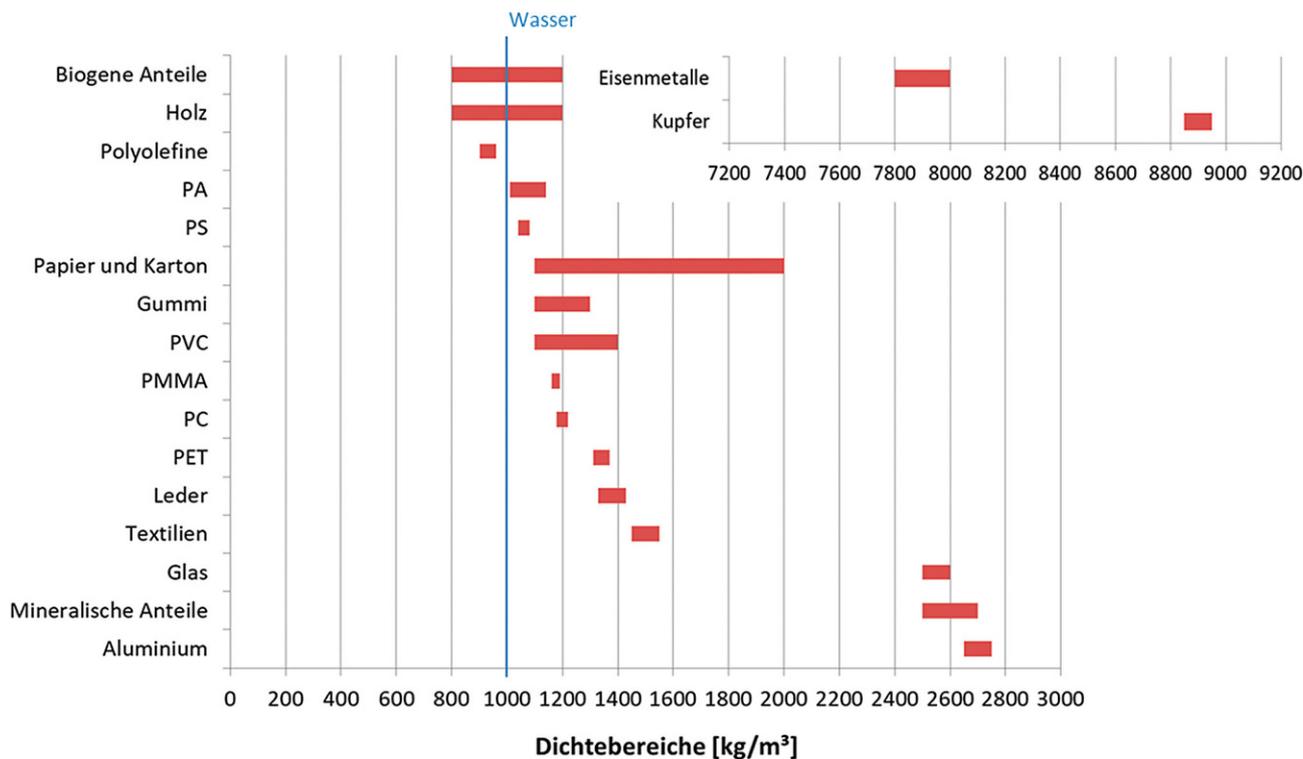


Abb. 1 Dichtebereiche häufig vorkommender Materialtypen in Siedlungsabfällen

gebettet in eine abfallwirtschaftlichen Gesamtbetrachtung werden in einem zweiten Artikel ebenfalls veröffentlicht in diesem Sonderheft dargelegt (vgl. Kranzinger et al. 2017).

1.1 Trocken versus nass – eine Bestandsaufnahme zum Vergleich

Eine umfassende Gegenüberstellung diverser mechanischer Aufbereitungsverfahren zur Kunststofftrennung und deren Vor- und Nachteile unterteilt in Trocken- und Nassverfahren kann Bauer (2014) entnommen werden. Hierbei wurde eine möglichst effiziente und vollständige Abtrennung der Altkunststofffraktion Polyolefine vom restlichen Materialstrom zugrunde gelegt. Dabei ist die höhere Trennschärfe und Selektivität der Nassverfahren hervorzuheben. Dies bedeutet, dass sich Nassverfahren durch eine erhöhte Reinheit des erzeugten gewünschten Produktes sowie eine erhöhte Ausbringung des Wertstoffes aus dem Inputmaterial in das Produkt auszeichnen. Trockenverfahren, wie z. B.: Windsichtung oder ballistische Separation, weisen eine wesentlich geringere Trennschärfe und Selektivität auf, wenn man diese überhaupt als Sortierung im engeren Sinne bezeichnen kann. Denn in diesen Ap-

paraten erfolgt primär eine An- bzw. Abreicherung der Objekte/Partikel gemäß ihrer Geometrie und Korngröße und nicht eine Unterscheidung und in Folge Trennung gemäß deren physikalischer oder chemischer Eigenschaften nach Materialtypen (Kunststoffarten, Papier, Holz etc.). Eine Ausnahme und das somit am häufigsten eingesetzte Trockenverfahren zur Sortierung von Altkunststoffen ist die sensorbasierte Sortiertechnologie im nahen infrarot Bereich (NIR-SBS), welche hinsichtlich der Sortiereffizienz mit Nassverfahren vergleichbar ist. Einzig dunkle Materialien können im Falle der NIR-SBS nicht erkannt werden und unterlaufen somit keiner Bewertung ihres Materialtyps. Im Bereich der Nassverfahren wird nahezu ausschließlich die Dichte als Trennmerkmal herangezogen, wodurch Farbgebungen keine Rolle spielen.

Weitere Vorteile der Nassaufbereitung sind die teilweise höheren spezifischen Durchsätze der Anlagen bezogen auf eine Trenneinheit, die Sortierbarkeit von Feinanteilen, keine Staubentwicklung (Explosionsschutz) und die gleichzeitige Entfernung von Verunreinigungen an den Partikeloberflächen. Dem gegenüber stehen ganz klar der Aufwand für die Entwässerung und Abwasserbehandlung. Wobei die Ent-

wässerung, sofern die erzeugten Fraktionen nicht der Verbrennung zugeführt werden, ausschließlich eine Frage der Förderbarkeit, Lagerbarkeit und Transportfähigkeit, sowie der dadurch entstehenden Kosten ist. Dies muss im Einzelfall entlang der jeweiligen Aufbereitungs- und Verwertungskette evaluiert und bewertet werden.

Als Alternative zur etablierten trockenen NIR-SBS werden vor allem die nassen Dichtentrennverfahren der Schwimm-Sink-Trennung und Schichtungstrennung (Hydrosetzmaschine) gesehen. Letzterer wird zwar eine gute Eignung zur Vorabscheidung bestimmter schwerer Komponenten altkunststoffhaltiger Abfallfraktionen, wie Glas, Steine, Metalle etc., eingeräumt, jedoch eine Abtrennung der PO von den restlichen Kunststofftypen ist aufgrund der geringen Dichtedifferenz nicht möglich. Daher werden in weiterer Folge die drei nassen Dichtentrennverfahren der Schwimm-Sink-Trennung, einmal im Schwerkraftfeld und zwei Apparate unter Ausnutzung des Zentrifugalkraftfeldes (Zyklon bzw. Sortierzentrifuge) genauer betrachtet.

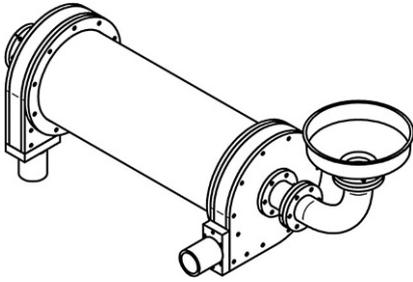


Abb. 2 Zylindrischer Zentrifugalkraftscheider

2 Nasse Dichtentrennverfahren

Gemäß Schubert (1996) zeichnet sich die nasse Dichtentrennung im Vergleich zu konkurrierenden Verfahren, wie z. B. Flotation, durch geringen Energieaufwand, geringe Investitions- und Betriebskosten sowie durch Vorteile in Umwelt- und Sicherheitsfragen wie Einsatz und Umgang mit Chemikalien und aus den Prozessen resultierenden Reststoffen oder Emissionen aus. Im Detail können die Dichtentrennverfahren unterteilt werden in

- Schwimm-Sink-Trennung (Schwerkraftscheider, Zentrifugalkraftscheider und Zyklone),
- Schichtungstrennung (Setzmaschinen und Rinnen),
- Trennung in Filmströmungen (Herde) und
- Gegenstromtrennung (Klassierer).

Wie bereits einleitend erwähnt, wird die Kategorie Schwimm-Sink-Trennung in weiterer Folge ins Zentrum dieses Beitrages gerückt.

2.1 Dichte als Trennmerkmal für gemischte Abfallfraktionen

In Abb. 1 sind die Dichtebereiche häufig vorkommender Materialtypen in Siedlungsabfällen dargestellt. Es ist klar ersichtlich, dass die PO im Vergleich zu den restlichen Fraktionen eine geringe Dichte aufweisen, welche nur von bestimmten Vertretern der biogenen Anteile und Holz unterboten wird. Dabei liegt deren Dichte auch unter jener des Wassers, welche hier durchschnittlich mit 1000 kg/m^3 angenommen wurde. Dies legt die Anwendung eines Schwimm-Sink-Prozesses zur Abtrennung der PO insbesondere aus altkunststoffhaltigen Abfallfraktionen nahe, wobei natürlich Verunreinigungen durch biogene Anteile und Holz

möglich sind. Die dem Schwimm-Sink-Prozess zugeführten altkunststoffhaltigen Abfallfraktionen können im Falle großer Heterogenität vorab größtenteils eine einfache mechanische Vorabscheidung durchlaufen, wie z. B. einem Siebschnitt, wodurch die Verunreinigungen biogene Anteile und Holz abgetrennt werden. Feine an der Oberfläche haftende Verschmutzungen werden durch das Trennmedium abgewaschen.

Dem Dichtentrennprozess soll dann natürlich nur die mit PO angereicherte Fraktion, welche den Siebrückstand bildet, zugeführt werden. Der Siebdurchgang kann wie vielerorts üblich einer biologischen Behandlung unterzogen werden. Andererseits ist nicht davon auszugehen, dass geringfügige Verunreinigungen der gewünschten PO-Fraktion mit biogenen Materialien für eine anschließende Verwendung im Bereich des rohstofflichen Recyclings zu nachteiligen Auswirkungen führen. Sollten die Verunreinigungen jedoch ein bestimmtes Maß überschreiten, können diese leicht identifiziert und einer geeigneten aufbereitungstechnischen Maßnahme zugeführt werden.

2.2 Gegenüberstellung der Vor- und Nachteile potenzieller Scheider zur Schwimm-Sink-Trennung

Wie bereits erörtert, können Schwimm-Sink-Scheider eine scharfe Trennung der PO von den restlichen Abfallfraktionen unter Einsatz des Trennmerkmals Dichte und des Trennmediums Wasser erzielen. Die dazu eingesetzten Scheider und Apparate können nun grob in jene, die unter Ausnutzung des Schwerkraftfeldes arbeiten, und jene, die sich das Zentrifugalkraftfeld zunutze machen, unterschieden werden.

Erstere können noch weiter aufgrund ihrer Bauform in Konus-, Kasten-, Trog- und Trommelscheider unterteilt werden (Schubert 1996). Da darin aber keine signifikante Auswirkung auf die Physik des Trennvorganges erkannt werden kann, werden diese in weiterer Folge unter dem Begriff Schwerkraftscheider zusammengefasst. Viele der zuvor genannten Bauformen werden in Aufbereitungsanlagen des Altkunststoffrecyclings eingesetzt.

Bei Ausnutzung des sich bildenden Zentrifugalkraftfeldes in einem strömungsinduzierten Trennmediumwirbel (Vortex) zur Dichtentrennung unterscheidet man im Detail zylindrisch-konisch gestaltete Scheider, die klassi-

schen Zyklone (hier auch als Sortierzyklone bezeichnet), welche ebenfalls bereits breit im Altkunststoffrecycling Anwendung finden, oder eng verwandte, aber rein zylindrisch geartete Scheider, deren Achse etwas von der Horizontale geneigt wird und die z. B. als LARCODEMS (Large Coal Dense Media Separator) bisher nur aus der Kohle- und Mineralrohstoffaufbereitung bekannt sind (Cammack 1987). Letztere unterscheiden sich von der auch als Gaszyklone bekannten Bauform durch eine weitere oder mehrere senkrecht zur Achse des zylindrischen Trennraumes angebrachte Öffnung, wodurch das Trennmedium im Unterschied zum klassischen Zyklon nicht zentral über das Tauchrohr, sondern tangential austritt bzw. bei bestimmten Bauformen auch mehrfach aufgegeben werden kann (Schubert 1996), vgl. Abb. 2.

Durch die zusätzliche Öffnung kann der zu trennende Aufgabestrom direkt in den Vortex aufgegeben werden, ohne zuvor die Versorgungspumpe und daran geknüpfte Mess-, Steuer- und Regeleinrichtungen passieren zu müssen, was vorteilhaft in Hinblick auf Verschleiß und mögliche Verstopfungen ist. Das Trennmedium und die zu trennenden Partikel werden dabei im Gegenstrom geführt. Des Weiteren wird davon ausgegangen, dass sich durch die im Vergleich zum gewöhnlichen Zyklon veränderte Geometrie auch die Charakteristik des Strömungsfeldes, insbesondere der zu dessen Beschreibung herangezogenen radialen, tangentialen und axialen Geschwindigkeitskomponente, ändert. Vor allem die Kenntnis zweitgenannt ist für eine Abschätzung der herrschenden Zentrifugalkraft von großer Bedeutung. In weiterer Folge werden die zylindrischen Zentrifugalkraftscheider mit ZKS abgekürzt.

Als zusätzlicher Vertreter der Schwimm-Sink-Trennung im Zentrifugalkraftfeld muss noch die Sortierzyklone ergänzt werden, die ebenfalls im Bereich der Altkunststoffaufbereitung für das mechanische Recycling im Einsatz ist.

Anschließend sollen die Vor- und Nachteile der zuvor beschriebenen Scheider und Apparate zur Schwimm-Sink-Trennung von Altkunststoffen nochmals miteinander verglichen werden, wobei man sich in diesem Überblick (s. Tab. 1) auf die gegenwärtig eingesetzten Technologien im Altkunststoffrecyclingsektor beschränkt. Ausführliche Beschreibungen der Funkti-

Tab. 1 Gegenüberstellung der Vor- und Nachteile der Schwimm-Sink-Scheider unter der Maßgabe einer Altkunststofftrennung hoher Güte

Schwimm-Sink-Scheider	Vorteile	Nachteile
Schwerkraftscheider	<ul style="list-style-type: none"> – Einfaches Verfahren – Keine bewegten Teile – Geringe Investitionskosten 	<ul style="list-style-type: none"> – Großer Raum- und Platzbedarf – Anhaftende Luftbläschen beeinträchtigen Trennvorgang – Eintrags- und Austragsorgane verursachen Turbulenzen und beeinträchtigen Trennvorgang – Geringe Strömungsgeschwindigkeiten dadurch niedrige Durchsätze bzw. große Flächen/Volumina – Arbeitet nur im Gravitationsfeld, starker Einfluss durch Korngröße und Kornform
Sortierzyklon	<ul style="list-style-type: none"> – Einfaches, raumsparendes Verfahren – Keine bewegten Teile – Erhöhte Kräfte durch Zentrifugalkraftfeld – Höhere Durchsätze pro Trennfläche – Geringe Investitions- und Betriebskosten 	<ul style="list-style-type: none"> – Zentrifugalfeld schwankt örtlich sehr stark, beeinträchtigt Trennergebnis – Hohe Kräfte nur bei hohen Strömungsgeschwindigkeiten führen zu geringen Verweilzeiten und beeinträchtigen Trennvorgang
Sortierzentrifuge	<ul style="list-style-type: none"> – Sehr hohe Kräfte im Zentrifugalkraftfeld (bis zu 1000 g) – Einfluss von Korngröße und -form vernachlässigbar – Bauform ermöglicht Entwässerung – Hohe Scherkräfte zwischen Trenngut und Flüssigkeitsring ermöglichen Oberflächenreinigung – Geringer Raum- und Wasserbedarf 	<ul style="list-style-type: none"> – Komplexes Verfahren bzw. Aggregat – Bewegte Teile, auf die große Kräfte wirken – Aufwendige Technik – Erhöhter Wartungsaufwand – Höhere Investitions- und Betriebskosten – Unflexibel gegenüber Qualitätsschwankungen im Input

Tab. 2 Vergleich der Schwimm-Sink-Scheider: Schwerkraftscheider, Sortierzyklon und Sortierzentrifuge anhand deren Absetzzahl (Feldkamp und Unkelbach 1997)

Parameter	Einheit	Schwerkraftscheider			Sortierzyklon			Sortierzentrifuge		
Mittlere Beschleunigung	[g = 9,81 m/s ²]	1 g			<100 g			1100 g		
Verweilzeit	[s]	400			1			25		
Partikelgröße ^a	[mm]	0,5	2	10	0,5	2	10	0,5	2	10
Mittlere Absetzgeschwindigkeit	[m/s]	0,006	0,03	0,12	0,14	0,50	1,2	0,86	1,55	4,0
Absetzzeit ^b	[s]	333	67	17	0,7	0,2	0,08	0,11	0,06	0,025
Absetzzahl	[–]	1	6	27	2	6	14	227	416	1000

^aAnnahme kugelförmiger Partikel^bAnnahme des Absetzweges mit 2 m für den Schwerkraftscheider und 0,1 m für Sortierzyklon und -zentrifuge

onsprinzipien, der Aufbau und Skizzen der angeführten Schwimm-Sink-Scheider können neben Schubert (1996) auch Kranert und Cord-Landwehr (2010) gefunden werden.

Die Schwerkraftscheider, am einen Ende der Skala mit einem Kraftfeld von einem g, überzeugen auf den ersten Blick durch ihre apparative Einfachheit und geringe verfahrenstechnische Komplexität. Jedoch ist in diesen Scheidern eine Dichtentrennung hoher Güte durch vielfältige Einflussfaktoren wie an der Partikeloberfläche anhaftende Luftbläschen, Kornform und Korngröße, welche insbesondere die Absetzgeschwindigkeit reduzieren können, in der Praxis mit einigen Herausforderungen verbunden. Ideale Trennbedingungen können nur durch laminare Strömungsverhältnisse bei sehr geringen Eintrittsgeschwindigkeiten erreicht werden, um Rückvermischungen durch Turbulenzen zu vermeiden. Dies steht im Widerspruch zur Anforderung beschränkter Verweilzeiten, um

bestimmte Durchsatzleistungen pro Einheit gewährleisten zu können, sowie einer damit verbundenen ökonomisch vorteilhaften Betriebsweise.

Auf der anderen Seite wartet die Sortierzentrifuge mit Beschleunigungswerten von bis zu 1000-facher Fallbeschleunigung und hohen Scherkräften auf, wodurch ein äußerst rasches Absetzen und eine Trennung der Partikel unterschiedlicher Dichte, losgelöst von Einflüssen durch Oberflächenanhaftungen und Einflüssen der Partikelgeometrie, erreicht werden. Eine effiziente Trennung ist dadurch auch bei kurzen Verweilzeiten ohne Zweifel möglich, jedoch führt die Komplexität dieses technisch aufwendigen Apparats zu einer hohen Störungsanfälligkeit, hohem Wartungsaufwand und hoher Kostenintensität bei geringen Durchsätzen pro Einheit, gepaart mit einer hoher Sensibilität gegenüber Qualitätsschwankungen des Inputs. Daher werden diese beiden Scheider nicht als erste Wahl für die Abtrennung von PO aus altkunst-

stoffhaltigen Abfallfraktionen für das rohstoffliche Recycling bewertet.

Der Sortierzyklon erweist sich als beste Lösung für die hier vorliegende Aufgabenstellung. Die Schwimm-Sink-Trennung in einem strömungsinduzierten Wirbel gewährt einerseits die Vorzüge eines ohne bewegte Teile auskommenden, platzsparenden und erprobten Apparats unter Einwirkung erhöhter Kräfte, gemäß Feldkamp und Unkelbach (1997) <100 g, wodurch eine beschleunigte Partikelreinigung ermöglicht wird. Zur Aufrechterhaltung der erhöhten Zentrifugalkräfte und der geforderten Durchsätze sind hohe Eintrittsströmungsgeschwindigkeiten bei geringen Radien notwendig. Daraus ergeben sich reduzierte Verweilzeiten. Letztgenannte Problematiken können durch den Schwenk von einem zylindrischen gewöhnlichen Hydrozyklon (Sortierzyklon) zu den bereits beschriebenen rein zylindrischen Zentrifugalkraftscheidern (ZKS) kompensiert werden. Die Erzielung großer Durchsätze

mit bis zu 250 t/h haben diese Scheider im Bereich der Kohleaufbereitung (Gent et al. 2009; Cammack 1987) bereits ein-drucksvoll bewiesen. Dies ist aufgrund des geringen Dichteunterschieds von Kunststoffen ($0,85\text{--}1,6\text{ g/cm}^3$) und Kohlen ($1,2\text{--}1,7\text{ g/cm}^3$) auch beim Einsatz in der Altkunststoffaufbereitung zu erwarten. Des Weiteren ist eine Erhöhung der Verweilzeit durch eine Verlängerung des Scheiders sehr einfach machbar, wobei – durch den Wegfall des Strömungsmediumaustritts über das Tauchrohr und der damit verbundenen radikalen Strömungsrichtungsumkehr – eine weitaus geringere Steigerung des Druckverlustes im Vergleich zum klassischen zylindrisch-konischen geformten Zyklon auftritt. Durch diese mögliche Einflussnahme auf die Verweilzeit kann von einem für eine Trennung hoher Güte essenziellen vorteilhaften Verhältnis von eben der Verweilzeit zur aus der Absetzgeschwindigkeit hervorgehenden Absetzzeit ausgegangen werden.

Letztere Hypothese wird in den folgenden Kapiteln für die diskutierten Schwimm-Sink-Scheider betrachtet und insbesondere für den ZKS rechnerisch belegt. Darüber hinaus soll die Verwendung des Verhältnisses von Verweil- zur Absetzzeit als die Trenngüte charakterisierende verfahrenstechnische Kennzahl für Maßstabsübertragungen und Auslegungen (Up-Scaling), abseits von in diesem Fall ungeeigneter bilanztechnischer Kennzahlen, vorgestellt werden.

2.3 Charakterisierung des Trennprozesses anhand verfahrenstechnischer Kennzahlen

Die Verwendung des Verhältnisses der Verweilzeit zur Absetzzeit für die Charakterisierung und zum Zwecke der Auslegung von Prozessen und Apparaten ist im Bereich der Fest-Flüssig-Trennung, z.B. Gestaltung von Sedimentationsbecken, weit verbreitet, vgl. Draxler und Siebenhofer (2014). Das Verhältnis der Verweilzeit zur Absetzzeit wird als Absetzzahl τ definiert.

$$\tau = \frac{t_v}{t_{\text{abs}}}$$

τ Dimensionslose Absetzzahl
 t_v Verweilzeit [s]
 t_{abs} Absetzzeit [s]

In Feldkamp und Unkelbach (1997) wurde dieser Ansatz gewählt, um die bereits beschriebenen Verfahren und

Apparate der Schwimm-Sink-Trennung (Schwerkraftscheider, Sortierzyklon und Sortierzentrifuge), eingesetzt im Bereich des Altkunststoffrecyclings, hinsichtlich des ablaufenden Trennvorgangs und dessen Einflüssen abzubilden (vgl. Tab. 2). Mithilfe dieser Absetzzahl ist es möglich, unter Einbeziehung verfahrenstechnischer Aspekte, eine Aussage über das zu erwartende Trennergebnis des jeweiligen betrachteten Apparats zu treffen. Dabei werden die Einflussfaktoren der zugrunde gelegten physikalischen Prozesse, wie Dichtedifferenz von Trennmedium und zu trennenden Feststoffpartikeln, Korngröße und -form, herrschende Kräfte, Apparategeometrie und Trennmedium-eigenschaften, um nur die wichtigsten zu nennen, berücksichtigt. Im Gegensatz zu bilanztechnischen Kennzahlen wie nachfolgend definierte Gehalte oder Ausbringungen, die den Status quo der Trennung für eine bestimmte Trennaufgabe eines bestimmten Apparats festhalten, kann mittels der Absetzzahl eine Vorhersage über die zu erwartende Trennleistung, zumindest in Relation zueinander zwischen diversen Apparatetypen oder deren Bauformen und -größen, getroffen werden. Daher bietet sich diese auch als Grundlage für Maßstabsübertragungen an.

Die Werte in Tab. 2 zeigen den großen Vorzug der Sortierzentrifuge. Diese weist vor allem aufgrund der hohen Zentrifugalkräfte wesentlich höhere Absetzzahlen als die anderen beiden Verfahren auf. Daher ist auch davon auszugehen, dass die Trennung eines zugeführten Partikelkollektivs nach deren Dichten mit großer Sicherheit sehr selektiv und scharf vonstatten geht. Leider kann mit den angeführten Absetzzahlen aber keine Aussage über betriebstechnische Attribute wie z.B. geringe Anlagenverfügbarkeit und Durchsätze, Sensibilität gegenüber quantitativen und qualitativen Inputschwankungen etc. getroffen werden, aufgrund dessen die Sortierzentrifuge, wie zuvor bereits ausführlich erläutert, für die Aufbereitung in diesem Falle dann doch zu heterogener altkunststoffhaltiger Abfallfraktionen ausgeschlossen wird. Jedoch weist sie den Weg für eine effiziente Abtrennung der PO, indem sie das Hauptaugenmerk auf kurze Absetzzeiten lenkt, ermöglicht durch hohe Kraftereinwirkung und lange Verweilzeiten. Neben den zuvor bereits abgewogenen Pro- und Kontra-Argumenten der einzelnen Schwimm-Sink-

Scheidertypen scheint, aufgrund der Limitierung des Schwerkraftscheiders auf 1 g, die Nutzung eines verstärkten Kraftfelds für den Schwimm-Sink-Prozess in einem Zentrifugalkraftscheider vorteilhaft. Durch dessen zylindrische Bauform wird eine Vergrößerung der Länge und in Folge eine Steigerung der Verweilzeit einfach möglich. Dadurch sollte auch das in Tab. 2 offenkundige Defizit der geringen Verweilzeit und in Folge niedrigeren Absetzzahlen der Schwerkraftscheider durch die höheren Beschleunigungen im ZKS kompensiert werden können. Dies soll im folgenden Abschnitt mittels Berechnung der Absetzzahl für den ZKS geprüft werden. Zusätzlich soll die Schleuderzahl z als Verhältnis der Zentrifugalbeschleunigung zur Fallbeschleunigung noch erwähnt werden. Diese kann ergänzend vor allem als Kennzahl zur Charakterisierung der im angewandten Schwimm-Sink-Prozess herrschenden Kräfte genutzt werden.

2.4 Setzmaschine und Zentrifugalkraftscheider – Pilotanlage Plastic Reborn

Basierend auf einer Bestandsaufnahme, dem Vergleich und der Bewertung diverser mechanischer Aufbereitungsverfahren und -apparate in Hinblick auf die Abtrennung eines polyolefinreichen Stoffstromes aus altkunststoffhaltigen Abfallfraktionen für das rohstoffliche Recycling, wurde an der Montanuniversität Leoben im Rahmen des durch die österreichische Forschungsförderungsgesellschaft (FFG) und industrielle Partner unterstützte Research Studio Austria (RSA) „Plastic Reborn“ eine Versuchsanlage im Pilotmaßstab zur nassen Dichtesortierung errichtet. In diesem neuartigen Anlagenkonzept sollen sowohl bereits vorbehandelte altkunststoffreiche Abfallströme, wie z.B. Mischkunststofffraktionen (MKF) aus der Leichtverpackungssortierung (LVP-Sortierung), homogen in ihrer Zusammensetzung und Beschaffenheit, als auch heterogene Fraktionen, wie gemischte Siedlungsabfälle und ähnliche Gewerbeabfälle, Rejekts aus dem Altpapierrecycling oder ausgewählte Fraktionen aus dem Landfill Mining, zu den drei Fraktionen Leichtgutfraktion (LGF), Mittelgutfraktion (MGF) und Schwergutfraktion (SGF) aufgearbeitet werden. Durch die SGF sollen vor allem anorganische Komponenten (Inertstoffe) wie Glas, Sand, Steine und Metal-

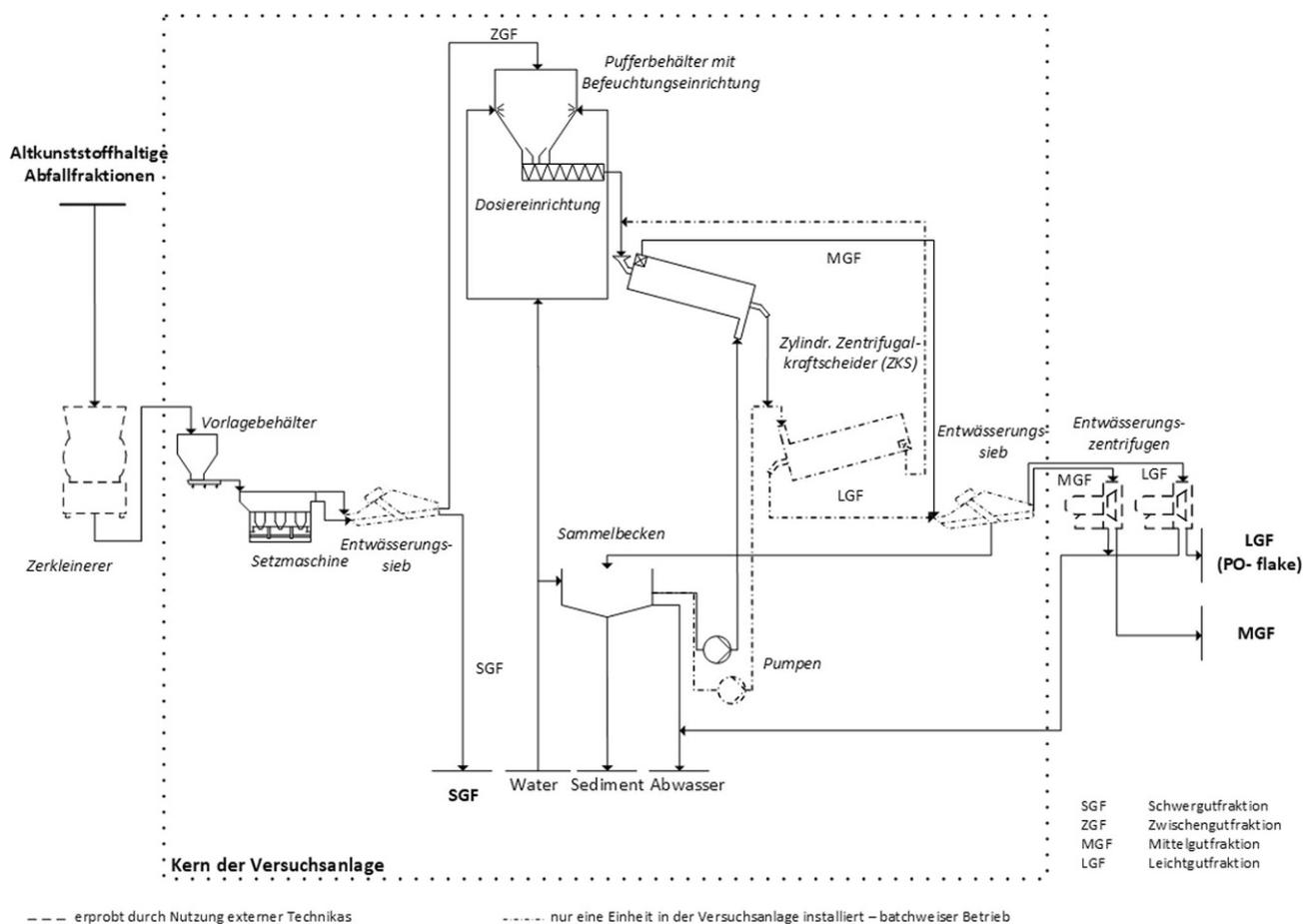


Abb. 3 Fließbild der Versuchsanlage Plastic Reborn zur Dichtentrennung altkunststoffhaltiger Abfallfraktionen (Anlagenkonzept Plastic Reborn)

le separiert werden, wobei qualitativ nach einer optionalen Metallabscheidung zumindest die Deponiefähigkeit erreicht werden soll. Eine etwaige stoffliche Verwertung als Recyclingbaustoff wird geprüft. Die MGF, überwiegend bestehend aus den restlichen Altkunststoffen und anderen heizwertreichen Bestandteilen wie z. B. Papier und Karton, soll der thermischen Verwertung oder Behandlung zugeführt werden. Die polyolefinreiche LGF, PO-Gehalt >90 Masseprozent, in weiterer Folge als PO-Flake bezeichnet, soll als Feedstock für das rohstoffliche Recycling in einer thermo-chemischen Konversion eingesetzt werden.

Die in Abb. 3 in Form eines Fließbildes dargestellte Versuchsanlage verfügt über die Kernelemente Setzmaschine und ZKS zur effizienten Dichtentrennung. Vor dem Hintergrund eines möglichen umfassenden Partikelauflusses sowie der Vermeidung eines übermäßigen Einflusses von Partikelgröße und -form, müssen die in der vorge-

stellten Anlage zu verarbeitenden festen Abfallstoffe auf <20 mm vorzerkleinert werden (nicht in die Anlage integriert). Die aufgegebenen altkunststoffhaltigen Abfallfraktionen unterziehen sich in der Setzmaschine einer Schichtung nach der Dichte, wodurch die schweren Bestandteile im unteren Bereich der Schüttung als SGF über ein sich periodisch öffnendes Wehr ausgeschleust werden können. Die leichten Anteile, das Zwischengut (ZG), insbesondere die PO, schwimmen ab und werden nachfolgend über einen Pufferbehälter mit angeschlossenem Schneckenförderer zentral über eine Öffnung im Deckel direkt in den Vortex des ZKS dosiert. Unter Einsatz des Trennmediums Wasser ist es möglich, im ZKS einen sehr polyolefinreichen LGF-Strom zu erzeugen, da die PO eine geringe Dichte als das eingesetzte Trennmedium Wasser ($\rho < 1 \text{ g/cm}^3$) aufweisen und daher schwimmen. Die überwiegende Mehrheit der restlichen Abfallstrombestandteile, wie z. B. andere Kunststoffe, verfü-

gen über eine höhere Dichte als Wasser und sinken ab bzw. werden an die Zylinderwand nach außen gedrückt. Für den ZKS bedeutet dies, dass die LGE, PO-Flake, zentral entlang der Achse des zylindrischen Trennapparates an der Grenzfläche zwischen Luft- und Wasserwirbel durch die Schwerkraft ausgelesen wird und die MGF zusammen mit dem Trennmedium den Apparat wieder tangential verlässt. Der Trennprozess mittels ZKS kann auch 2-stufig ausgeführt werden, um eine möglichst effiziente Trennung zu gewährleisten. Dazu wird in der Versuchsanlage das gewonnene Leichtgut der ersten Trennung nochmals dem ZKS zugeführt.

3 Durchgeführte Versuchskampagnen an der Pilotanlage und zugehörige Berechnungen

In diesem Abschnitt werden die Aufgabenstellung und verwendeten Rahmenbedingungen für die in der Pilotanlage

toren acht einzelne Versuche durchgeführt werden, um die Datengrundlage für eine statistische Versuchsauswertung zu schaffen. Um einer geforderten Reproduzierbarkeit der einzelnen Testergebnisse Rechnung zu tragen, wurde jeder einzelne Versuchslauf mit derselben Parametereinstellung dreimal wiederholt, wobei die Reihenfolge aller Einzeltestläufe ausgelost wurde, um wiederum systematische Fehler auszuschließen. Für die einzelnen Testläufe wurde die Länge (L) zwischen L+ und L- = 0,6 L+, die Neigung (α) zwischen $\alpha+$ und $\alpha-$ = 0,5 $\alpha+$ und der Volumenstrom (VS) zwischen VS+ und VS- = 0,8 VS+ variiert.

Als Testvariable wurde der PO-Gehalt der erzeugten LGF aus einer synthetischen 2:3-Mischung zur einfachen optischen Unterscheidung eingefärbter PO (genau PP, $\rho \sim 0,9 \text{ g/cm}^3$)-Flakes und Polyethylenterephthalat (PET, $\rho \sim 1,3 \text{ g/cm}^3$)-Flakes verwendet. Die alleinige Verwendung des PO-Gehalts zur Beschreibung der Trennschärfe wird für die Aussage über den Einfluss der drei Betriebsparameter als ausreichend zuverlässig bewertet.

Ad 2.) Im Rahmen der zweiten hier vorgestellten Versuchskampagne wurden diverse altkunststoffhaltige Abfallfraktionen unterschiedlichen PO-Gehalts, wobei hier jeweils 2 Fraktionen zu den drei resultierenden Gruppen mit ~10 %, ~30 % und ~50 % zusammengefasst wurden, in der Versuchsanlage unter den zuvor bestimmten idealen Betriebsbedingungen aufbereitet und die Güte der Trennung durch Ermittlung des PO-Gehalts in der LGF und PO-Ausbringen in die LGF aus der Massenbilanz ausgewertet.

Ad 3.) Um eine erwartete Steigerung der Trennschärfe durch eine zweistufige Trennung im ZKS zu prüfen, wurde die in der zweiten Versuchskampagne erzeugte LGF nochmals in den ZKS unter denselben Betriebsbedingungen aufgegeben, wobei hier neben der grundsätzlichen Betriebsweise im Gegenstrom die zweite Stufe auch in der Betriebsweise Gleichstrom getestet wurde (vgl. Abb. 4). Die resultierende Trennschärfe wurde wiederum wie zuvor ermittelt und bewertet.

3.2 Kennzahlermittlung für den zylindrischen Zentrifugalkraftscheider

In folgendem Abschnitt wird die Vorgehensweise bei der beispielhaften Be-

rechnung der Absetzzahl τ für den ZKS der Versuchsanlage Plastic Reborn beschrieben.

Die Eintrittsgeschwindigkeit des Trennmediums Wasser am ZKS-Einlass kann wie folgt berechnet werden.

$$w_{\text{ein}} = \frac{\dot{V}}{A_{\text{ein}}} \quad \text{mit} \quad A_{\text{ein}} = s * s$$

w_{ein}	Eintrittsgeschwindigkeit des Trennmediums [m/s]
\dot{V}	Trennmediumvolumenstrom [m ³ /s]
A_{ein}	Querschnittsfläche der Eintrittsöffnung [m ²]
s	Seitenkantenlänge der quadratischen Eintrittsöffnung [m]

Aus Belardi et al. (2014) lässt sich ein Abschwächungsfaktor δ ermitteln, der eine Abschätzung der mittleren Tangentialgeschwindigkeit w_{ϕ} in [m/s] im äußeren Trennmediumwirbel (Wasserwirbel) ermöglicht. Diese Abschätzung deckt sich auch sehr gut mit ersten eigenen CFD-Simulationsergebnissen der Strömungsverhältnisse im betrachteten ZKS.

$$w_{\phi} = w_{\text{ein}} * \delta$$

Somit kann die mittlere Zentrifugalbeschleunigung im ZKS berechnet werden zu:

$$a = \frac{w_{\phi}^2}{r_m} \quad \text{mit} \quad r_m = \frac{r_i - r_L}{2} + r_L$$

a	Zentrifugalbeschleunigung [m/s ²]
r_m	Mittlerer Radius im äußeren Trennmediumwirbel (Referenzpunkt) [m]
r_L	Radius des inneren Luftwirbels [m]
r_i	Innenradius des ZKS [m]

In Folge lässt sich die dimensionslose Schleuderzahl z aus dem Verhältnis der Zentrifugalbeschleunigung a in [m/s²] zur Fallbeschleunigung g in [m/s²], mit $g = 9,81 \text{ m/s}^2$ als $z = a/g$ bilden. Diese ermöglicht eine Charakterisierung der Stärke des herrschenden Kraftfelds, jedoch werden wesentlich weniger Einflussfaktoren auf den Trennvorgang als bei der Absetzzahl τ berücksichtigt. Nichtsdestotrotz kann auch die Schleuderzahl z als zusätzliche verfahrenstechnische Kennzahl bei Maßstabsübertragungen hilfreich sein. Die stationäre Sinkgeschwindig-

keit oder Absetzgeschwindigkeit w_{abs} in [m/s] für den allgemeinen Fall im Schwerkraftfeld kann nach Draxler und Siebenhofer (2014) wie folgt errechnet werden. Für das Zentrifugalfeld muss hier nur die Fallbeschleunigung g durch die Zentrifugalbeschleunigung a ersetzt werden.

$$w_{\text{abs}} = \sqrt{\frac{4 * d_p * g * (\rho_p - \rho_{TM})}{3 * c_w * \rho_{TM}}}$$

d_p	Partikeldurchmesser (Annahme: kugelförmiger Partikel) [m]
ρ_p	Dichte der zu trennenden Feststoffpartikel (Abfallpartikel) [kg/m ³]
ρ_{TM}	Trennmediumdichte bei 20 °C [kg/m ³]
c_w	Widerstandsbeiwert [-]

Der c_w -Wert in [-] ist für den vereinfachten Fall (starre, kugelförmige, glatte Partikel) nur von der Partikel-Reynoldszahl Re_p bzw. den Strömungsverhältnissen abhängig. Da beim ZKS im Vortex von turbulenter Umströmung der Partikel, $Re_p > 985$, ausgegangen wird, kann für den c_w -Wert ein fixer empirischer Wert festgelegt werden. Diese Annahme soll durch eine abschließende Berechnung der Partikel-Reynoldszahl geprüft werden.

Mittels der Absetzgeschwindigkeit lässt sich die Absetzzeit relativ einfach berechnen. Dazu ist nur noch die Kenntnis des mittleren Absetzwegs, l_{abs} in [m], erforderlich. Dieser wird als halbe Länge zwischen innerem Luftwirbel des Radius r_L und der Zylinderwand mit dem Radius r_i von der Zylinderachse entfernt abgeschätzt.

$$t_{\text{abs}} = \frac{l_{\text{abs}}}{w_{\text{abs}}} \quad \text{mit} \quad l_{\text{abs}} = \frac{r_i - r_L}{2}$$

Für die Ermittlung der Abscheidenzahl fehlt nun nur noch die mittlere Verweilzeit der Partikel im ZKS. Hierzu wird zum einen auf einen bei Tracer-Versuchen gemessenen Wert zurückgegriffen, welcher die Partikelverweilzeit in der grundlegenden ZKS-Betriebsweise Gegenstrom abbilden soll. Zum anderen wird die Verweilzeit der ZKS-Betriebsweise Gleichstrom über den Durchsatz (Volumenstrom) des Trennmediums Wasser durch einen idealisierten spiralförmigen Strömungskanal V_{VK} in [m³] von tangentialem Ein- bis Austritt approximiert, der den beobachteten Strömungsverlauf des Wassers im ZKS widerspiegelt. In letzterem Fall wird die Durchflusszeit des Wassers als

Tab. 3 Untersuchungsergebnisse des Einflusses der drei Betriebsparameter Länge, Neigung und Trennmediumvolumenstrom auf den Trennvorgang im ZKS mittels 2^k -faktoriellen Tests

Angewandte Parameter	PO-Gehalt [%]			Parameter	Mittlerer Effekt	Signifikanz ($\sigma = 0,01$)
	1	2	3			
L-/α-/VS-	98,8	98,4	98,0	L	11,9	Ja
L-/α-/VS+	99,5	97,9	98,4	α	-8,8	Ja
L-/α+/VS-	96,8	96,1	96,3	VS	9,0	Ja
L+/α+/VS+	99,0	98,5	99,0	L/α	5,3	Ja
L+/α-/VS+	98,0	97,8	97,5	L/VS	1,3	Nein
L-/α-/VS-	99,5	99,5	99,5	α/VS	4,7	Nein
L+/α+/VS-	97,8	98,0	98,5	L/α/VS	-1,1	Nein
L+/α+/VS+	99,5	99,5	99,5	-	-	-

Tab. 4 Erzielbare Trennschärfe bei der Aufbereitung altkunststoffhaltiger Abfallfraktionen zur PO-Abtrennung mit dem Anlagenkonzept Plastik Reborn

PO-Gehalt in der Aufgabe		Aufgabe		SGF		MGF		LGF		
		r _m [%]	g _{PO}	r _{PO}						
~50	Aa	100,0	46,6	27,4	0,2	19,3	2,4	53,3	86,4	98,9
	Ab	100,0	48,3	22,2	0,9	31,9	15,2	45,9	94,2	89,6
~30	Ba	100,0	31,4	30,9	0,5	33,8	2,8	35,3	85,8	96,5
	Bb	100,0	30,2	49,2	0,5	2,8	17,4	47,9	61,4	97,6
~10	Ca	100,0	13,4	45,7	0,7	32,0	3,6	22,3	53,5	89,0
	Cb	100,0	10,8	47,2	0,4	31,0	0,5	21,8	47,7	96,7

min. Verweilzeit der Partikel angenommen. Der geringere Wert soll dann in Form einer Worst-Case-Betrachtung für die Berechnung verwendet werden.

$$t_v = \frac{V_{VK}}{V}$$

mit

$$V_{VK} = \sqrt{\underbrace{l_{\text{ein-aus}}^2 + (n_s * 2 * r_m * \pi)^2}_{I_s} * s * 2 * l_{\text{abs}}}_{A_{VK}}$$

und

$$n_s = \frac{l_{\text{ein-aus}}}{s}$$

$l_{\text{ein-aus}}$ Länge zwischen den beiden Mittelpunkten des Trennmediumein- und -austrittes [m]

n_s Anzahl der Umdrehungen der Spirale (Helix) [-]

s Seitenkantenlänge der quadratischen Eintrittsöffnung als Ganghöhe [m]

l_s Länge der Spirale [m]

A_{VK} Querschnittsfläche des Volumenkanals [m²]

Zur Verifizierung des Ansatzes einer turbulenten Umströmung der Partikel muss noch die Partikel-Reynoldszahl

bestimmt werden. Dafür ist noch die dynamische Viskosität η_{TM} des Trennmediums Wasser bei 20 °C in [Pa s] erforderlich.

$$Re_p = \frac{d_p * w_{\text{abs}} * \rho_{TM}}{\eta_{TM}}$$

Gemäß Draxler und Siebenhofer (2014) kann die Verringerung der Absetzgeschwindigkeit durch nicht kugelförmige, z. B. flache Partikel, wie sie im Bereich der polyolefinischen Altkunststoffe sehr häufig vorkommen (Verpackungsfolien), durch einen Formfaktor (Wadell-Sphärizität) abgeschätzt werden. Experimentell ermittelte Werte des Formfaktors in Abhängigkeit von der Archimedes-Zahl sind in Draxler und Siebenhofer (2014) tabelliert.

$$Ar = \frac{3}{4} * c_w * Re_p$$

Aufgrund der turbulenten Strömung und der erhöhten Scherkräfte wird eine gegenseitige Beeinflussung der Partikel (Schwambildung) während des Absetzvorgangs ausgeschlossen.

4 Ergebnisse

In diesem Abschnitt wird auf die in den Versuchskampagnen erzielten Ergebnisse eingegangen und diese diskutiert. Des Weiteren soll die Berechnung des

Verhältnisses Verweilzeit zu Absetzzeit der Partikel, die Absetzzahl, im ZKS dargelegt werden und eine mögliche Nutzung für Maßstabsübertragungen als verfahrenstechnische Kennzahl erörtert werden.

4.1 Ergebnisse der Versuchskampagnen

Tab. 3 zeigt die Ergebnisse der ersten Versuchskampagne zur Untersuchung des Einflusses der drei Betriebsparameter Länge, Neigung und Trennmediumvolumenstrom auf den Trennvorgang im ZKS, ausgedrückt durch den PO-Gehalt der LGF bei der Abscheidung von PP aus einer 2:3-PP/PET-Mischung.

Dabei ist aus der Datengrundlage in Tab. 3 für den 2^k -faktorieller Test klar ersichtlich, dass in allen 24 Testläufen ein sehr hoher PO-Gehalt, durchwegs >96 %, erreicht werden konnte. Dank der statistischen Versuchsauswertung können aber auch hier Unterschiede ermittelt werden. So ist aus Tab. 3 abzulesen, dass die Länge den größten Einfluss auf die Trennung im ZKS hat und diese groß gewählt werden sollte, da der Wert des mittleren Effektes positiv ist. Hingegen sind Neigung und Volumenstrom als Einflussfaktor nahezu gleichwertig, wobei die Neigung klein und der Volumenstrom groß dimensioniert werden sollten. Hinsicht-

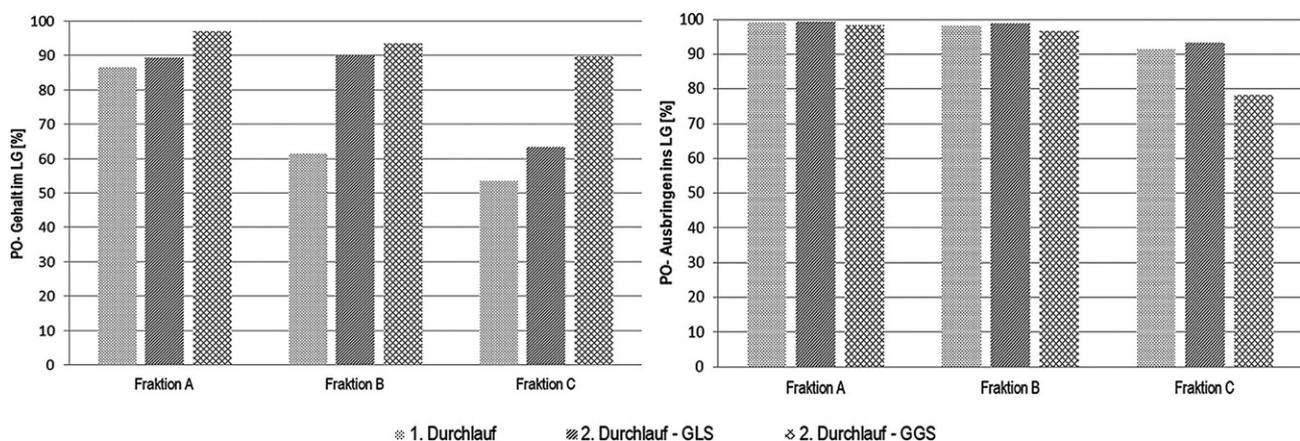


Abb. 5 Ergebnisse der 2-stufigen Trennung zur Steigerung der Trennschärfe

lich der Signifikanz des Einflusses der Parameter kann die Aussage getroffen werden, dass alle drei den Trennvorgang wesentlich beeinflussen, wobei dies in Kombination nur für Länge und Neigung gilt.

Die positive Auswirkung einer großen Länge bzw. einer geringen Neigung auf den Trennvorgang im ZKS ist auf die schon zuvor erwähnte Steigerung der Partikelverweilzeit im Scheider und der damit verbundenen erhöhten Wahrscheinlichkeit zurückzuführen, dass sich auch Partikel geringerer Absetzgeschwindigkeit in der ihrer Dichte entsprechenden Fraktion wiederfinden. Ein hoher Volumenstrom geht mit großen Tangentialgeschwindigkeiten im Vortex und dem daraus resultierenden verstärkten Zentrifugalkraftfeld einher, wodurch die Absetzgeschwindigkeit erhöht und die Absetzzeit folglich verkürzt wird. Beides stützt die zuvor geäußerte Hypothese, dass eine hohe Absetzzahl für eine scharfe Trennung förderlich ist.

Tab. 4 illustriert die erzielten PO-Gehalte in der LGF und das PO-Ausbringen in die LGF bei der Aufbereitung altkunststoffhaltiger Abfallfraktionen mit dem Anlagenkonzept Plastic Reborn. Dabei sind auch das Masseausbringen und wiederum der PO-Gehalt für die erzeugte MGF und SGF angeführt.

Ein Blick auf die Resultate zeigt, dass das PO-Ausbringen in die LGF nahezu für alle Abfallfraktionen bei 90 % oder sogar darüber liegt. Daher müssen nur geringe Verluste an Polyolefinen in den restlichen Fraktionen, insbesondere in der MGF, in Kauf genommen werden. Der PO-Gehalt der LGF liegt für die polyolefinreichen aufgegebenen Abfallfraktionen in Schlagdistanz zum

angestrebten Ziel von ebenfalls mehr als 90 %, nimmt aber für die stärker verunreinigten heterogenen Fraktionen ab und variiert hier auf einem nicht zufriedenstellenden Niveau zwischen 45 und 60 %. Dieser Effekt kann durch die von Gent et al. (2009) schon beschriebene Neigung des ZKS zur Produktion einer reinen MGF geringen PO-Gehalts in der Betriebsweise Gegenstrom erklärt werden. Durch die zentrale Aufgabe der zu trennenden Partikel über den Scheiderdeckel direkt in das Zentrum des Vortex an die Grenzfläche zwischen innerem Luftwirbel und äußerem Wasserwirbel, kann es sein, dass bestimmte Partikel z. B. aufgrund der Oberflächenbeschaffenheit (anhaftende oder eingeschlossene Luftbläschen, hydrophoben Charakter, längliche Form etc.) nicht in den Wasserwirbel eintreten, sich der Selektion der herrschenden Kräfte anhand dessen Dichte entziehen können und somit, ohne dem Schwimm-Sink-Prozess wirklich unterworfen worden zu sein, über den zentralen Leichtgutaustritt am Boden des Scheiders rasch wieder ausgetragen werden. Hier kommt wieder die Scheiderlänge ins Spiel, denn je länger der Weg zum LGF-Austrag, umso größer ist die Wahrscheinlichkeit, dass diese Partikel vom äußeren Trennmediumwirbel erfasst und ordnungsgemäß getrennt werden.

Auf ein probates Mittel zur Steigerung der Verweilzeit und in Folge der Trennschärfe nämlich die zwei- bzw. auch mehrstufige Trennung oder Prozessführung, wie es vor allem bei Anlagen mit Zyklonen üblich ist, soll auch hier zurückgegriffen werden. In Abb. 5 sind die Ergebnisse dieser Versuchskampagne dargestellt.

Die zweite Stufe der ZKS-Trennung wurde dabei wechselweise sowohl im grundlegenden Gegenstrom (GGS) als auch im alternativen Gleichstrom (GLS) auf die im 1. Durchlauf erzeugte LGF angewandt, um mögliche Schaltungsvarianten abzubilden. Die erste Stufe soll grundsätzlich im Gegenstrom betrieben werden, da diese die beschriebenen Vorteile der vom strömenden Medium entkoppelten Feststoffaufgabe in sich birgt.

Über alle Fraktionen und die beiden Schaltungsvarianten kann festgehalten werden, dass die angestrebte weitere Aufkonzentration der PO in der LGF möglich ist. Einbußen im Bereich des PO-Ausbringens können insbesondere für die Betriebsweise Gleichstrom in der zweiten Stufe mit dem zuvor konträren Effekt, in diesem Fall Favorisierung einer reinen LGF des ZKS-Funktionsprinzips im Gleichstrombetrieb und Verlust bestimmter PO-Anteile über die MGF, erklärt werden.

4.2 Ergebnisse der Kennzahlenermittlung

Die in Abschn. 3.2 vorgestellten Berechnungen der Schleuderschleuderzahl z und der Absetzzahl τ führen zu folgenden Ergebnissen für den ZKS der Versuchsanlage (siehe Tab. 5). Dabei wurden die Stoffwerte für Wasser mit $\rho_{TM} = 998,21 \text{ kg/m}^3$ und $\eta_{TM} = 1002,0 \cdot 10^{-6} \text{ Pa s}$ bei 20°C verwendet. Bei der Dichte der zu trennenden Partikel erschien es logisch, einen Bezug zu den Polyolefinen herbeizuführen, somit beläuft sich diese auf $\rho_p = 900 \text{ kg/m}^3$.

Die Partikelgröße wurde in Anlehnung an die in Tab. 2 dargestellten Werte mit 10 mm gewählt, um hier

Tab. 5 Ergebnisse der Berechnung der Schleuderzahl z und der Absetzzahl τ für den zylindrischen Zentrifugalkraftscheider (ZKS) der Versuchsanlage

Parameter	Einheit	ZKS
Mittlere Beschleunigung	[$g = 9,81 \text{ m/s}^2$]	15 g
Mittlere Schleuderzahl z	[-]	15
Verweilzeit	[s]	3
Partikelgröße	[mm]	10
Mittlere Absetzgeschwindigkeit	[m/s]	0,67
Absetzzeit	[s]	0,07
Absetzzahl	[-]	44
Re_p	[-]	6637
Ar	[-]	14.537.727

einen Bezug herstellen zu können, wobei die größten in der Versuchsanlage verarbeiteten Partikel eine Größe von 20 mm aufweisen. Bei der Verweilzeit handelt es sich um den mittels Tracer-Versuchen ermittelten kleineren Wert im Vergleich zur Trennmediumverweilzeit. Die Partikel-Reynoldszahl identifiziert die Strömungsverhältnisse klar als turbulent und bestätigt somit diese Annahme.

Die rechnerische Abschätzung der Schleuderzahl nach Abschn. 3.2 ergab einen Wert von 15 gemäß Tab. 5. Es kann klar dargelegt werden, dass eine mehrfache Steigerung des Kraftfelds über das Schwerkraftfeld hinaus im ZKS und die damit verbundene Beschleunigung des Absetzens der Partikel möglich ist. Obwohl man von einem Wert von z nahe 100, wie er in Tab. 2 angedeutet wird, weit entfernt ist, ermöglicht die Schwimm-Sink-Trennung im ZKS eine respektable Absetzgeschwindigkeit von ca. 0,7 m/s unter Berücksichtigung des relativ großen Durchmessers im Vergleich zu Sortierzyklonen. Geht man von der idealisierten Betrachtung einer Kugelform der Partikel weg und definiert deren Form als flach, so reduziert sich die Absetzgeschwindigkeit gemäß tabelliertem Formfaktor in Draxler und Siebenhofer (2014) in Abhängigkeit von der Archimedes-Zahl deutlich auf einen Wert von 0,39 des ursprünglichen Wertes.

Eine weitere Erhöhung der Zentrifugalbeschleunigung und Absetzgeschwindigkeit kann einfach durch die Vergrößerung des Trennmediumvolumenstroms (verstärkte Pumpleistung) erreicht werden, wobei dies aufgrund

der Möglichkeit der Verlängerung des ZKS nicht zwangsweise mit einer Abnahme der Verweilzeit, insbesondere in der Betriebsweise Gleichstrom, und in Folge auch der Absetzzahl verbunden sein muss. Bei der grundsätzlichen Betriebsweise Gegenstrom des ZKS kommt noch dazu der große Vorteil des ZKS durch den entkoppelten Durchsatz der zu trennenden Partikel von jenem des Trennmediums zu tragen, wodurch ebenfalls die Partikelverweilzeit nicht im unmittelbaren Zusammenhang mit der Trennmediumverweilzeit steht. Diese für einen effizienten, scharfen Trennvorgang günstigen baulichen und betriebstechnischen Eigenschaften des ZKS resultieren in einer Absetzzahl von 44 gemäß Tab. 5, welche zwar nicht in der Größenordnung der Sortierzentrifuge liegt, jedoch die Werte der Sortierzyklone und Schwerkraftscheider deutlich übersteigt. Neben der festgestellten sehr effizienten Dichtentrennung von z. B. PO aus altkunststoffhaltigen Abfallfraktionen unterschiedlichen anfänglichen PO-Gehalts, ist ein großes Potenzial einer weiteren Steigerung der Absetzzahl durch Ausnutzung dessen großen Variabilität in Bezug auf bauliche Gestaltung, Einflussparameter und Betriebsweisen in fortwährenden Optimierungszyklen festzuhalten. Darüber hinaus kann die Leistungsfähigkeit des ZKS durch eine zweistufige Ausführung weiter gesteigert werden.

Noch mehr als die Schleuderzahl und überdies die Absetzzahl eine Aussage über den ablaufenden Trennprozess und die dabei erzielbaren Trennergebnisse für eine bekannte Trennaufgabe zulassen, wiegt die mögliche Verwendung dieser – als den Trennprozess und viele seiner wichtigsten Einflussfaktoren abbildende – Kennzahlen für die Maßstabsübertragung und Auslegung (Up-Scaling) solcher Trennapparate. Denn durch Kenntnis dieser Kennzahlen für einen bestimmten funktionierenden Trennprozess, welche vor allem dessen verfahrenstechnischen Aspekte berücksichtigen und zusammenführen, kann man einer Maßstabsübertragung unter Maßgabe der groben Beibehaltung ersterer entgegen treten.

5 Schlussfolgerung

Gegenwärtig wird die mechanische Aufbereitung von festen altkunststoffhaltigen Abfallstoffen überwiegend mit trockenen Verfahren und dafür ausgelegten Apparaten vor dem Hintergrund

einer anschließenden thermischen Verwertung oder Behandlung der erzeugten Hauptprodukte (Sekundärbrennstoffe) durchgeführt. Dadurch kann ein hoher Heizwert als wichtigster Brennstoffparameter einfacher im Vergleich zur Nassaufbereitung bei ausreichender Trennschärfe gewährleistet werden. Abseits der sensorbasierten Trenntechnologie, die für die Trennung diverser Kunststofftypen sehr erfolgreich eingesetzt wird und eine komplexere Gesamtanlagenstruktur fordert, beschränken sich die restlichen trockenen Verfahren, verbaut in Anlagen geringerer Komplexität, hauptsächlich auf die Abfallstromteilung und -konditionierung. Nassverfahren, die überdies auch in der Kohleaufbereitung für die Verfeuerung in Kraftwerken breite Verwendung finden, kommen dann zum Einsatz, wenn einerseits die Erzeugung eines Produktstroms hohen Heizwerts nachrangig ist und andererseits eine sehr selektive Trennung resultierend in hohen Trennschärfen, wie für eine stoffliche Verwertung oder Recycling notwendig, gefordert wird. Weitere Aspekte, die für die Nassaufbereitung sprechen, sind die teilweise höheren spezifischen Durchsätze der Anlagen bezogen auf eine Trenneinheit, die Sortierbarkeit von Feinanteilen, keine Staubentwicklung (Explosionsschutz) und die gleichzeitige Entfernung von Verunreinigungen an den Partikeloberflächen. Dem gegenüber stehen ganz klar der Aufwand für die Entwässerung und Abwasserbehandlung. Wobei die Entwässerung, sofern die erzeugten Fraktionen nicht der Verbrennung zugeführt werden, ausschließlich eine Frage der Förderbarkeit, Lagerbarkeit und Transportfähigkeit sowie der daraus entstehenden Kosten sind.

Für die Abtrennung einer polyolefinreichen Altkunststofffraktion aus altkunststoffhaltigen Abfallströmen für das rohstoffliche Recycling, rückt in einem Vergleich diverser nasser Trennverfahren insbesondere die Schwimm-Sink-Scheidung in den Fokus. Diese ermöglicht aufgrund der geringeren Dichte der Polyolefine (PO) im Vergleich zur Mehrzahl der restlichen Stoffgruppen in Abfallfraktionen eine Trennung nach dem Trennmerkmal der Dichte. Die PO schwimmen auf. Aus einer Gegenüberstellung von Schwerkraft- und Zentrifugalkraftscheidern, die nach dem Schwimm-Sink-Prinzip trennen, zeichnet sich der zylindrische von der horizontalen Achse geneigte

Zentrifugalkraftscheider (ZKS), ein enger Verwandter des zylindrisch-konisch gestalteten, vertikal angeordneten Zentrifugalkraftscheiders ((Sortier-)Zyklon) aus. Entwickelt für die Kohleaufbereitung besticht dieser durch einfache, robuste Bauform geringer Komplexität, beschleunigtes Partikelabsetzen durch das Zentrifugalkraftfeld und hohe Durchsätze pro Einheit und daran geknüpfte zu erwartende hohe „Economy of scale“. Gepaart werden diese vorteilhaften Eigenschaften mit gesteigerten Verweilzeiten und in Folge höhere Trennschärfen als gewöhnliche Sortierzyklone, durch die mögliche Entkopplung des Feststoffeintrages von der Trennmediumzufuhr. Zur umfassenden Evaluierung dieses Trennapparats für die mechanische Aufbereitung altkunststoffhaltiger Abfallfraktionen wurde an der Montanuniversität Leoben eine Versuchsanlage im Pilotmaßstab installiert. Diese umfasst neben dem ZKS eine Hydrosetzmaschine zur Vorabscheidung schwerer Abfallkomponenten wie Glas, Steine und Metalle nach der Methode der Schichtungstrennung, wiederum mit der Dichte als Trennmerkmal.

Diverse Versuchskampagnen in der Anlage haben gezeigt, dass eine polyolefinreiche Abfallfraktion (PO-Flake) in Form einer Leichtgutfraktion (LGF) mit einem PO-Ausbringen und PO-Gehalt von nahezu über 90 % bei der Aufbereitung repräsentativer altkunststoffhaltiger Abfallfraktionen, die nach ihrem anfänglichen PO-Gehalt in drei Fraktionen mit ~10 %, ~30 % und ~50 % gruppiert wurden, möglich ist. Dieses sehr zufriedenstellende Ergebnis konnte durch eine zweistufige Trennung der Polyolefine von den restlichen Abfallbestandteilen in einer variablen Verschaltung der ZKS-Stufen, Gegenstrom – Gleichstrom bzw. Gegenstrom – Gegenstrom unter vorangegangener Schwerstoffvorabscheidung in der Setzmaschine realisiert werden. Im Falle nur einer ZKS-Trennstufe waren vor allem für die aufgegebenen polyolefinäreren Abfallfraktionen geringere

PO-Gehalte in der LGF, zwischen 50 und 65 %, zu beobachten. Das PO-Ausbringen im Gegensatz dazu lag auch bei nur einer Stufe nahezu für alle Fraktionen bei etwa 90 %. Der Abfall des PO-Gehalts in der LGF kann dadurch erklärt werden, dass bestimmte Partikel nachteiliger (Oberflächen-)Beschaffenheit (hydrophober Charakter, längliche Form etc.) nach der zentralen Aufgabe nicht in den äußeren Wasserwirbel (Vortex) eintreten, sondern an der Grenzfläche zum inneren Luftwirbel des offenen Systems verweilen, sich somit deren Selektion nach der Dichte entziehen und über den zentralen Leichtgutaustag den Scheider rasch wieder verlassen. Als wichtige Einflussfaktoren auf den Trennprozess im ZKS konnten eine hohe Länge, geringe Neigung, beide im Zusammenhang mit der Verweilzeit stehend, und ein hoher Trennmediumvolumenstrom, der mit der aufgeprägten Stärke des Zentrifugalkraftfeldes korrespondiert, identifiziert werden.

Die zur Charakterisierung des Dichtentrennprozesses in den Schwimm-Sink-Scheidern eingeführten verfahrenstechnischen Kennzahlen Schleuderzahl z als Verhältnis der wirkenden Beschleunigung (häufig die Zentrifugalbeschleunigung) zur Fallbeschleunigung, und die Absetzzahl als Verhältnis von Partikelverweilzeit zur -absetzzeit, werden als sehr hilfreich bei einer Aussage zum bzw. Vorhersage des erwarteten Trennergebnisses für einen definierten Scheider mit bestimmter Trennaufgabe bewertet. Insbesondere im Vergleich untereinander oder unterschiedlicher Bauformen und -größen wird deren leistbarer Beitrag auch für in diesem Zusammenhang stehende Maßstabsübertragungen und Neuauslegungen, die ja unter der Anforderung der Erreichung derselben Trennleistung wie das Referenzmodell stehen, mangels Alternativen als enorm hoch gesehen. Die dadurch mögliche numerische Abbildung der wichtigen Einflussgrößen auf den zu beurteilenden

Schwimm-Sink-Trennprozesses legt die Basis für eine erfolgreiche Scale-up-Strategie.

Mit der abgeschätzten Schleuderzahl von 15 für den ZKS der Pilotanlage kann die angestrebte Steigerung des Kraftfelds im Vergleich zum Schwerkraftfeld und dadurch erhöhte Absetzgeschwindigkeiten belegt werden. Eine ermittelte Absetzzahl von 44 ist nicht nur ein Indikator für die große Sicherheit, mit der die zu trennenden Partikel im ZKS anhand deren Dichte der jeweiligen richtigen Fraktion zugeordnet werden, was die beobachtete scharfe Trennung impliziert hat, sondern vereinigt auch die ausführlich beschriebenen Vorteile dieses Zentrifugalkraftscheiders gegenüber Schwerkraftscheider und gewöhnlichem Zyklon. Die richtungweisenden Absetzzahlen der aufgrund betriebstechnischer Nachteile wie hoher Störungsanfälligkeit und Sensibilität gegenüber quantitativer und qualitativer Durchsatzschwankungen ausgeschlossenen Sortierzentrifuge können nicht erreicht werden, jedoch ist beim ZKS diesbezüglich weiteres Optimierungspotenzial durch dessen Variabilität und Flexibilität bei baulicher Gestaltung, Einflussparametern und Betriebsweisen anzuführen.

Acknowledgements Open access funding provided by Montanuniversität Leoben.

Open Access Dieser Artikel wird unter der Creative Commons Namensnennung 4.0 International Lizenz (<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/deed.de>) veröffentlicht, welche die Nutzung, Vervielfältigung, Bearbeitung, Verbreitung und Wiedergabe in jeglichem Medium und Format erlaubt, sofern Sie den/die ursprünglichen Autor(en) und die Quelle ordnungsgemäß nennen, einen Link zur Creative Commons Lizenz beifügen und angeben, ob Änderungen vorgenommen wurden. ■

Literatur

- Bauer, M. (2014):** Mechanical processing of post-consumer plastics for chemical recycling. Dissertation, Montanuniversität Leoben.
- Belardi, G., Bozano, P., Mencinger, J., Piler, M., Schena, G. (2014):** Numerical simulation of water-air flow pattern in a TriFlo® cylindrical separator. Präsentation, XXVIII International Mineral Processing Congress (IMPC 2014), Santiago de Chile, 20. – 24 Oktober 2014
- BIR Bureau of International Recycling (2014):** World Steel Recycling in Figures 2010 – 2014. http://bdsv.org/downloads/weltstatistik_2010_2014.pdf. Gesehen 26. Juli. 2017
- Cammack, P. (1987):** Der LARCODEMS – ein neuer Schwertrübscheider für Rohkohle der Körnung 100 bis 0,5 mm. Aufbereitungs-Technik Nr. 8:427–434
- Draxler, J., Siebenhofer, M. (2014):** Verfahrenstechnik in Beispielen. Springer Vieweg, Wiesbaden. ISBN 978-3-658-02739-1
- Europäische Kommission (2014):** Mitteilung der Kommission an das europäische Parlament, den Rat, den europäischen Wirtschafts- und Sozialausschuss und den Ausschuss der Regionen, Hin zu einer Kreislaufwirtschaft: Ein Null-Abfallprogramm für Europa. COM/2014/0398 final. <http://eur-lex.europa.eu/legal-content/DE/TXT/HTML/?uri=CELEX:52014DC0398&from=EN>. Gesehen 28. Juli. 2017
- Europäische Kommission (2015):** Vorschlag für eine Richtlinie des europäischen Parlaments und des Rates zur Änderung der Richtlinie 94/62/EG über Verpackungen und Verpackungsabfälle. COM/2015/0596 final – 2015/0276 (COD). <http://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/ALL/?uri=CELEX:52015PC0596>. Gesehen 28. Juli. 2017
- Feldkamp, B., Unkelbach, H. (1997):** Kunststoffrecyclinganlagen mit dem Dekanter als Herzstück. Andritz separation, Köln.
- Gent, M., Mendez, M., Torano, J., Isidro, D., Torno, S. (2009):** Cylinder cyclone (LARCODEMS) density media separation of plastic wastes. Waste Management 29: 1819–1827. doi: 10.1016/j.wasman.2008.12.026.
- Kranert, M., Cord-Landwehr, K. (2010):** Einführung in die Abfallwirtschaft. Vieweg + Teubner Verlag, Wiesbaden. ISBN 978-3-8351-0060-2
- Kranzinger, L. et al. (2017):** Outputorientierte Betrachtung nass-mechanischer Aufbereitung von polyolefinreichen Abfällen aus der Abfallwirtschaft. In: *Österreichische Wasser- und Abfallwirtschaft*, 11-12/2017. <https://doi.org/10.1007/s00506-017-0423-y>
- Plastics Europe (2015):** Plastics – the Facts 2015. http://www.plasticseurope.org/documents/document/20151216062602-plastics_the_facts_2015_final_30pages_14122015.pdf Gesehen 26. Juli. 2017
- Plastics Europe (2016):** Plastics – the Facts 2016. http://www.plasticseurope.org/documents/document/20161014113313-plastics_the_facts_2016_final_version.pdf. Gesehen 26. Juli. 2017
- Reh, K., Franke, M., Baum, H., Faulstich, M. (2014):** Vergleichende Analyse der Entsorgung von Verpackungsabfällen aus haushaltsnahen Anfallstellen auf Basis der Verpackungsverordnungen in Deutschland und Österreich. In Schriftenreihe des Österreichischen Wasser- und Abfallwirtschaftsverbandes (ÖWAV) (Hrsg.), Heft 169.
- Schubert, H. (1996):** Aufbereitung fester Stoffe, Band II: Sortierprozesse. Deutscher Verlag für Grundstoffindustrie, Stuttgart. ISBN 3-342-00555-6