

# Charakterisierung und Potential polyolefinreicher Abfallströme für die rohstoffliche Verwertung

Lukas Kranzinger, Roland Pomberger, Daniel Schwabl, Markus Bauer und Wolfgang Hofer

1.	Von der Entdeckung bis zur ressourcenschonenden Verwertung.....	219
2.	Material und Methoden .....	221
2.1.	Anlagenkonzept und Verwertungswege der Trennfraktionen.....	221
2.2.	Analytisches Monitoring.....	222
2.3.	Identifikation der relevanten Abfallströme.....	222
3.	Erste Ergebnisse und Verwertungspotential der Trennfraktionen.....	223
3.1.	Schadstoffbelastung des Prozessabwassers .....	223
3.2.	Jährliches Polyolefinpotential in Österreich .....	223
3.3.	Schadstoffkonzentrationen laut Abfallverbrennungsverordnung .....	223
3.4.	Mitverbrennung als Verwertungspotential.....	225
4.	Zusammenfassung und Ausblick .....	227
5.	Literatur.....	227

## 1. Von der Entdeckung bis zur ressourcenschonenden Verwertung

Vor ungefähr 150 Jahren wurde der erste uns bekannte Kunststoff synthetisiert. Damals wurde durch Zugabe von Salpetersäure und Lösungsmittel aus Cellulose *Parkesine* (Celluloid) gewonnen. Die technische Entwicklung der Polymerisationskunststoffe benötigte aber weitere 50 Jahre, um 1912 Polyvinylchlorid (PVC) herzustellen (in Deutschland). Weitere zwanzig Jahre wurden benötigt bis die Hochdruckpolymerisation von Ethylen und eine vollautomatische Spritzgießmaschine entwickelt wurde. Ab diesen Zeitpunkt stiegen die jährlichen Produktionsmengen stetig und erstmals 1983 überstiegen der weltweite Bedarf an Kunststoffen jenen von Stahl (in m<sup>3</sup>) [11]. Von diesem Zeitpunkt an wurde klar, dass Kunststoff als neuer Werkstoff für nahezu alle Anwendungsbereiche einsetzbar ist [4].

Im Jahr 2015 wurde weltweit 322 Millionen Tonnen Kunststoff produziert, Tendenz steigend. Davon kamen etwa 1,1 Millionen Tonnen in Österreich zum Einsatz. Von diesen wurden wiederum etwa. 40 Ma.-% in der Verpackungsindustrie verwendet,

wofür hauptsächlich Polyolefine (mengenmäßig vor allem Polyethylen (PE) und Polypropylen (PP)) zum Einsatz kamen. Diese Kunststoffe zählen zu den Thermoplasten und können im Gegensatz zu den Duroplasten und Elastomeren durch Erwärmung beliebig oft umgeformt oder neu geformt werden [15].

Am Ende des Lebenszyklus eines Kunststoffbauteils, landet dieses bestenfalls im getrennten Abfallsammelsystem und wird recycelt. Im Jahr 2014 wurden in Österreich etwa 225.000 Tonnen an Leichtverpackungen von Haushalten, Industrie und Gewerbe gesammelt [2]. Ein Drittel, also 75.000 Tonnen, wurden davon für das Recycling aussortiert [16]. Der Rest wurde trotz des hohen Polyolefingehalts von > 40 Ma.-% (Fraktion: Mischkunststoffe aus der Leichtverpackungssortierung) [13] energetisch verwertet, wenngleich eine zukunftsorientierte Abfallwirtschaft unter Berücksichtigung der Abfallhierarchie lt. EU-Abfallrichtlinie 2008/98/EG das Recycling anstelle von anderen Verwertungsmöglichkeiten (z.B. energetische Verwertung) vorsieht. Umgerechnet entgeht dem stofflichen oder rohstofflichen Kunststoffrecycling ein Polyolefinpotential von über 60.000 Tonnen pro Jahr.

Parallel dazu werden aus den gemischten Siedlungsabfällen weniger als 5 Ma.-% Wertstoffe (davon hauptsächlich Metalle) aussortiert und stofflich recycelt. Die restlichen 95 Ma.-% werden direkt thermisch bzw. indirekt über Mechanische- oder Mechanisch-Biologische-Abfallaufbereitungsanlagen energetisch verwertet. Folglich kommt ein Großteil der noch im Restmüll befindlichen Wertstoffe dem stofflichen Recycling abhanden. [13] berichtet von einem Polyolefinpotential von über 110.000 Tonnen pro Jahr in den gemischten Siedlungsabfällen. Es zeigt sich, dass das Polyolefinpotential im Restmüll beinahe gleichgroß ist wie in der getrennten Sammlung. Lediglich mit dem Unterschied, dass die Polyolefine im Restmüll keineswegs recycelt werden.

Ungeachtet des großen noch ungenutzten Rohstoffpotentials gibt es momentan wenig Anreize die Polyolefinfraktionen verstärkt von der energetischen Verwertung in das Recycling umzulenken. In naher Zukunft könnte aber der am 02.12.2015 veröffentlichte Vorschlag der Europäischen Kommission zum Kreislaufwirtschaftspaket neue Dynamik in die derzeit noch ausbaufähige österreichische Kunststoffrecyclinglösung bringen. Das Paket sieht nämlich eine neue europaweit gültige Vorgabe zur Erhöhung der Recyclingziele vor. Für Siedlungsabfälle ist eine Recyclingquote von 60 Ma.-% bis zum Jahr 2025 und bis 2030 eine Recyclingquote von 65 Ma.-% angestrebt [9]. Laut [5] erfüllt Österreich bereits jetzt diese Recyclingvorgaben. Aufgrund einer möglichen Änderung der Berechnungsmethode der Recyclingquote, könnte es aber passieren, dass Österreich unter das geforderte Niveau von 60 Ma.-% sinkt und bis 2025 diese Differenz ausgleichen muss. Sollte sich das bewahrheiten, würde Österreich zusätzliche Recyclingmengen benötigen.

Einen Beitrag dazu, könnten speziell die hochwertigen und recyclingfähigen Polyolefine liefern, welche einen Großteil der im Restmüll und getrennten Verpackungssammlung befindlichen Kunststoffe darstellen. Das vielversprechende Research Studio Austria (RSA) *Plastic Reborn* prüft mit einer nassmechanischen Aufbereitungsanlage wie gut diese Polyolefinfraktionen aus kunststoffreichen Abfallströmen rückgewinnbar sind.

Während die trockenmechanischen Prozesse bereits standardmäßig bei der Aufbereitung von Abfällen zu hochkalorischen Ersatzbrennstoffen eingesetzt werden, stellt der nassmechanische Aufbereitungsschritt eine Neuheit dar.

Im Forschungsprojekt arbeiten drei Lehrstühle der Montanuniversität Leoben, der Lehrstuhl für Aufbereitung und Veredlung (AuV), der Lehrstuhl für Verfahrenstechnik des industriellen Umweltschutzes (VTIU) und der Lehrstuhl für Abfallverwertungstechnik und Abfallwirtschaft (AVAW), sowie industrielle Partner, zusammen. Das Konsortium befasst sich mit der Fragestellung ob die Abtrennung hochreiner Polyolefinfraktionen als Vorbereitung für ein rohstoffliches Recycling mittels thermochemischer Konversion, technisch und wirtschaftlich umsetzbar ist. In den ersten Projektjahren wurden potentiell interessante Abfallströme mit einem hohen Kunststoffanteil vom Lehrstuhl AVAW identifiziert. Der Bau, Betrieb und die Optimierung einer Technikumsanlage wurde von den Lehrstühlen AuV und VTIU ausgeführt.

Vorliegende Arbeit umreist im ersten Abschnitt den nassmechanischen Aufbereitungsprozess, danach wird der methodische Ansatz zur Auswahl der potentiellen Abfallfraktionen erläutert. Zum Schluss werden die ersten wirtschaftlichen Verwertungspotentiale der neu produzierten Outputfraktionen diskutiert.

## 2. Material und Methoden

### 2.1. Anlagenkonzept und Verwertungswege der Trennfraktionen

Die nassmechanische Aufbereitung, dargestellt als Teilsegment der Prozesskette zur Herstellung eines recycelten Kunststoffs auf Basis der thermochemischen Konversion, ist in Bild 1 dargestellt. Der vorgeschaltete trockenmechanische Aufbereitungsprozess (Zerkleinerung und Magnetscheidung) und der nachgeschaltete thermochemische Konversionsprozess sowie die konventionelle Raffinerie sind nicht dargestellt, da diese Prozesse in anderen Forschungsprojekten untersucht werden.

Im ersten Trennschritt werden die kunststoffhaltigen Abfallströme aus den Bereichen Leichtverpackung, Ersatzbrennstoffe, Rejects (Spuckstoffe) und dem Landfill Mining einer Behandlung mit einer Setzmaschine von Siebtechnik zugeführt um abrasive Störstoffe, welche für nachgeschaltete Anlagenteile gefährlich sein können, als die Schwergutfraktion (SGF: Metalle, mineralische Rohstoffe, Glas, usw.) abzutrennen. Dabei wird in der Setzmaschine ein sogenanntes Setzbett (durch Absinken der Partikel) ausgebildet, in dem sich durch Hubfrequenzen des Prozesswassers dichtere Störstoffe in der unteren Schicht und die weniger dichteren Kunststoffe in der oberen Schicht anordnen. Am Austrag der Setzmaschine wird das Setzbett mittels Leitblechen in die SGF und in die Zwischengutfraktion (ZGF) geteilt. Die beiden Fraktionen werden über ein Linearschwingsieb entwässert. Die entwässerte SGF wird dem Aufbereitungsprozess an dieser Stelle entnommen, die ZGF hingegen dem Zentrifugalkraftscheider zugeführt.

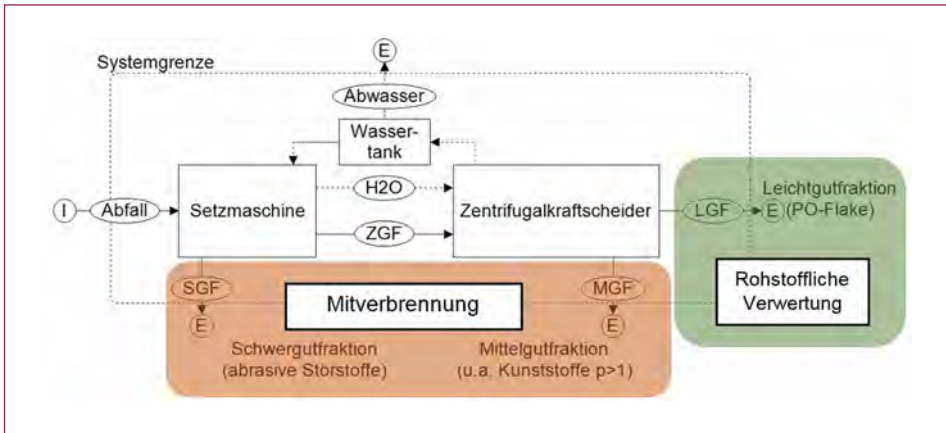


Bild 1: Vereinfachtes Prozessschema der Nassmechanischen Aufbereitungsanlage mit den Verwertungswegen der Trennfractionen sowie dem Abwasser. SGF: Schwergutfraktion, ZGF: Zwischengutfraktion, MGF: Mittelgutfraktion, LGF: Leichtgutfraktion, H<sub>2</sub>O: Prozesswasser

Im Zentrifugalkraftscheider werden durch den Dichteunterschied des Trennmediums (Wasser) und der Abfallpartikel eine spezifisch leichtere Fraktion (Polyolefine) und eine spezifisch schwere Fraktion (andere Kunststoffe und Störstoffe) produziert. Dabei stellt die spezifisch schwerere Fraktion die Mittelgutfraktion (MGF) dar und die spezifisch leichtere, die polyolefinreiche Leichtgutfraktion (LGF). Beide Fraktionen werden im letzten Prozessschritt über das Linearschwingsieb entwässert.

## 2.2. Analytisches Monitoring

Für die Verwertung der MGF und SGF ist die Mitverbrennung in Anlagen gemäß § 3 (6) Abfallverbrennungsverordnung (AVV) [6] angedacht. Die beiden Outputfraktionen werden auf die Einhaltung der gesetzlichen Grenzwerte analysiert. Die Leichtgutfraktion, die als Feedstock für die thermochemische Konversion eingesetzt werden soll, wurde ebenfalls nach AVV analysiert.

Das Prozesswasser aller in der Pilotanlage getesteten Abfallströme wurde auf potentielle Grenzwertüberschreitungen nach Anlage A § 4 der Abwasseremissionsverordnung (AAEV, BGBl. 186/1996) analysiert. Die Ergebnisse lassen abschätzen inwieweit Abwassernachbehandlungsanlagen (mechanische- oder chemisch/biologische Reinigung) zur Begrenzung der Frachten und Konzentrationen schädlicher Inhaltstoffe nötig sind, um umweltverträglich bzw. gebührenfrei in die Kanalisation einzuleiten.

## 2.3. Identifikation der relevanten Abfallströme

Unter Berücksichtigung des Abfallkatalogs nach ÖNORM S2100 [3] und einer anschließenden Literaturrecherche sind aus über 1.500 Abfallschlüsselnummern jene polyolefinreichen Abfallströme ausgewählt worden, die anhand von vordefinierten Ausschlusskriterien [13] für die Nassmechanische Aufbereitung einsatzfähig sind.

Sieben potentielle Abfallströme, aus den Bereichen Leichtverpackungssortierung, Ersatzbrennstoffe, Rejects (Spuckstoffe) und dem Landfill Mining, konnten ausfindig gemacht werden. Ein genauer PO-Gehalt der Abfallströme ist in der Literatur nicht aufzufinden. Infolgedessen sind Proben mit einer am Lehrstuhl für Abfallverwertungstechnik und Abfallwirtschaft in Entwicklung befindlichen Beprobungsmethode *Press-and-Drill* genommen worden [1]. Die Proben wurden einer Dichtentrennung (Schwimm-/Sink-Trennung) unterzogen. Die Ergebnisse zeigen PO-Gehalte in einer Bandbreite von über 80 Ma.-% bis etwa 10 Ma.-%.

### 3. Erste Ergebnisse und Verwertungspotential der Trennfractionen

#### 3.1. Schadstoffbelastung des Prozessabwassers

Erste Ergebnisse zeigen ein erhöhtes BSB5:CSB Verhältnis (Biologischer- und Chemischer-Sauerstoffbedarf) bei allen Abfallströme. Einzelne erreichen ein Verhältnis von bis zu 1:26. Ein Verhältnis von bis zu 2 deutet auf ein biologisch gut abbaubares Abwasser hin. Je größer das Verhältnis wird, desto schlechter wird die Abbaubarkeit [14]. Bei einigen Abfallströme ist auch der Grenzwerte der absetzbaren Stoffe überschritten. Außerdem weist ein Abfallstrom eine erhöhte Konzentration von organischen Halogenverbindungen (0,7 mg/l AOX) auf. Der Grenzwert lt. AAEV liegt für AOX bei 0,5 mg/l.

Eine Möglichkeit um dem erhöhten CSB und den AOX Konzentrationen entgegen zu wirken, könnten nachgeschaltete physikalisch-chemische Abwasserbehandlungsmethoden (Adsorption, Flotation, Ionenaustauscher, Nassoxidation, Filtration, usw.) sein. Zusätzlich würde ein Sedimentationsbecken die Konzentration der absetzbaren Stoffen verringern.

#### 3.2. Jährliches Polyolefinpotential in Österreich

Durch die Einteilung der Abfallströme in Primär- oder Sekundärabfälle (zur Vermeidung einer doppelten Mengenerfassung) sowie die Zurechnung der im Labor bestimmten PO-Gehalte, kann ein theoretisches Jahrespotential an Polyolefinen in der österreichischen Abfallwirtschaft berechnet werden. Insgesamt kann von einem Potential von etwa 310.000 t/a ausgegangen werden [13]. Erste Trennergebnisse der Pilotanlage zeigen, dass beinahe alle im Abfallstrom vorhandenen Polyolefine in die Leichtgutfraktion übergeführt werden können. Wobei für den thermochemischen Konversionsprozess die LGF einen Polyolefingehalt (PO-Gehalt; Massenanteil an Polyolefinen im Produkt in Bezug zur Gesamtmasse des Produktes) von wenigstens 90 Ma.-% aufweisen muss. Mit einem durchschnittlichen Störstoffanteil von  $\leq 10$  Ma.-% erfüllt die Leichtgutfraktion die geforderte Spezifikation, um als Input für die rohstoffliche Verwertung eingesetzt werden zu können.

#### 3.3. Schadstoffkonzentrationen laut Abfallverbrennungsverordnung

Die wirtschaftliche Verwertbarkeit der nicht-polyolefinhaltigen Schwer- und Mittelgutfraktion ist ein wichtiger Faktor für die Realisierbarkeit der nassmechanischen Aufbereitung. Ziel ist es, die beiden Fraktionen in der Zementindustrie als Ersatzbrennstoff

zum Einsatz bringen. Im Gegensatz zur direkten energetischen Verwertung sind für die Mitverbrennung allerdings Grenzwerte für die Abfälle vorgegeben. In Anlage 8 der Abfallverbrennungsverordnung sind die Anforderungen aufgelistet [6].

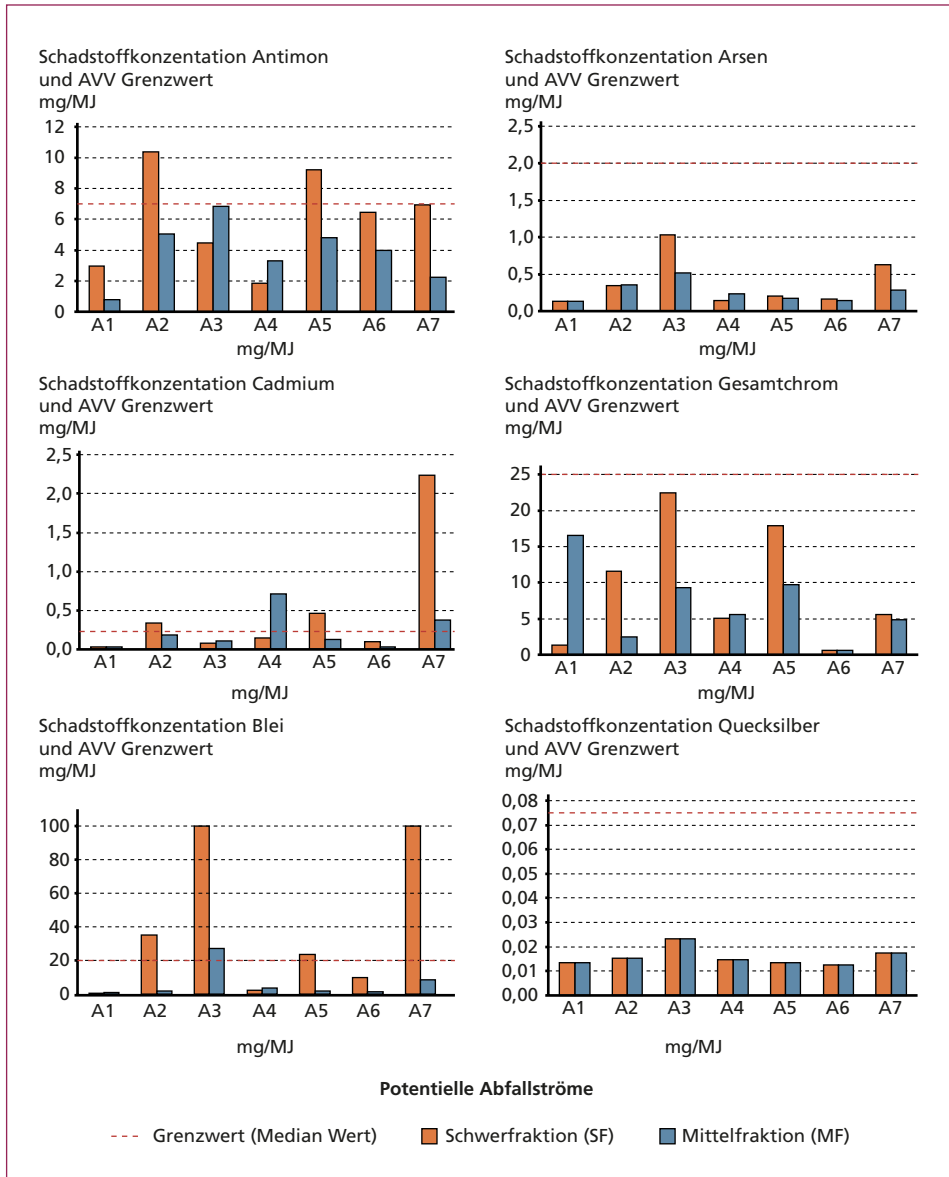


Bild 2: Schadstoffkonzentrationen der Mittel- und Schwergutfraktion im Vergleich zu den Grenzwerten (Median Wert) für Ersatzbrennstoffe beim Einsatz in Anlagen zur Zement-erzeugung laut Abfallverbrennungsverordnung

Quelle: eigene Darstellung

Die Grenzwerte von Arsen, Chrom<sub>gesamt</sub> und Quecksilber zeigen in Bild 2 bei allen Abfallströmen (A1 bis A7) keinerlei Grenzwertüberschreitungen. Für den Grenzwert Antimon sind jedoch bei Abfallstrom A2 und A5 Überschreitungen bei der Schwergutfraktion auffällig. Außerdem sind die Schadstoffkonzentration bei der Mittelgutfraktion von A3 und die Schwergutfraktion A6 und A7 knapp unter dem gesetzlichen Grenzwert. Die erhöhte Schadstoffkonzentration bzw. die Grenzwertüberschreitung können auf einen hohen Polyvinylchlorid (PVC) und Polyethylenterephthalat (PET) Gehalt zurückzuführen sein, weil Antimon als Stabilisator in der PVC Herstellung zum Einsatz kommt und bei der PET Herstellung als Katalysator. Zusätzlich kann bei A2 das Bindemittel in Druckfarben erhöhend auf die Schadstoffkonzentration wirken.

Die Grenzwertüberschreitung bei dem Schwermetall Blei ist bei A3, A4, A5 und A6 auf den PVC Anteil zurückzuführen. Das Schwermetall kommt, wie auch Antimon, bei der Herstellung des Kunststoffes als Stabilisator zum Einsatz. Bei A2 ist die Überschreitung auf das Bindemittel bei Druckfarben zurückzuführen statt auf PVC Partikel wie bei den anderen Abfallströmen.

Die hohe Cadmiumkonzentration von A5 und A7 kann auf die Funktion des Schwermetalls als Stabilisierungsmittel bei PVC begründet werden. Bei A2 kann der höhere Cadmiumwert mit dem Bestandteil des Schwermetalls in Druckfarben erklärt werden. Durch das Aufschwimmen von PS im Trennmedium Wasser, kann PS von der Setzmaschine nicht ausgetragen werden und wird in die Mittelgutfraktion weitertransportiert. Diese Begebenheit kann die hohe Cadmiumkonzentration in der von A4 erklären.

### 3.4. Mitverbrennung als Verwertungspotential

Für die energetische Verwertung der SGF und MGF in Mitverbrennungsanlagen müssen einerseits die gesetzlichen Grenzwerte der Schadstoffkonzentrationen eingehalten werden und andererseits die von der Mitverbrennungsanlage geforderten Spezifikationen (Aschegehalt, Schwefelgehalt, Heizwert, Chlor, Korngröße usw.) an die Ersatzbrennstoffe erfüllt werden. Eine der wichtigsten Spezifikationen für die Anlagenbetreiber ist der ausreichende Energiegehalt bzw. Heizwert des Ersatzbrennstoffs. Zum Beispiel wird für die Mitverbrennung in der Sekundärfeuerung (Brennstoff für die Calzinatorfeuerung oder für den Drehrohreinlauf) eines Zementwerks einen Heizwert von 10 bis 12 MJ/kg der Originalsubstanz (OS) [7, 17] benötigt. In der Primärfeuerung werden noch höhere Energiegehalte ab 18 MJ/kg<sub>(OS)</sub> gefordert [7, 18].

Nach der Entwässerung über das Linearschwingsieb könnte für die SGF A4 bis A7 und die MGF A4 der Einsatz als Ersatzbrennstoff für die Sekundärfeuerung überlegt werden. Die anderen SGF sowie MGF wären für die Mitverbrennung in einer Wirbelschichtverbrennung einsetzbar. Wobei A2 und A3 aufgrund deren niedrigen Heizwertes lediglich in einer Rostbettfeuerung beseitigt werden könnten (Bild 3).

Da die Zuzahlungen für die energetische Verwertung als Ersatzbrennstoff in der Sekundärfeuerung niedriger sind als für die Wirbelschichtverbrennung, sollten die Abfallströme aus wirtschaftlicher Sicht weit konditioniert werden. Eine nachgeschaltete

Entwässerung erscheint dafür sinnvoll. Ausgehend von Entwässerungsversuchen kann ein realistischer Minimalwassergehalt von 10 Ma.-% für die Schwer- und 35 Ma.-% für die Leichtgutfraktion angenommen werden. Anhand der Formel

$$Hu [kJ/kg] = (1 - wBr) * hTS - wBr * 2,442$$

konnte ein neuer Heizwert (Hu) für die SGF und die MGF berechnet werden, wobei *wBr* der Wassergehalt des Brennstoffes ist und *hTS* der Heizwert der Trockensubstanz ist und 2,442 die Verdampfungsenthalpie des Wasserdampfes in MJ/kg ist [12].

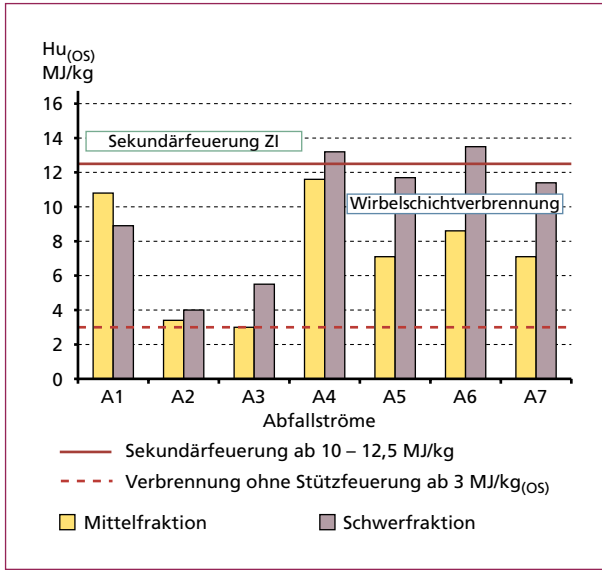


Bild 3:

Energetisches Verwertungspotential der Abfallströme bezogen auf den jeweiligen Energiegehalt der Schwer- bzw. der Mittelfraktion. ZI: Zementindustrie,  $Hu_{(OS)}$ : Heizwert der Originalsubstanz

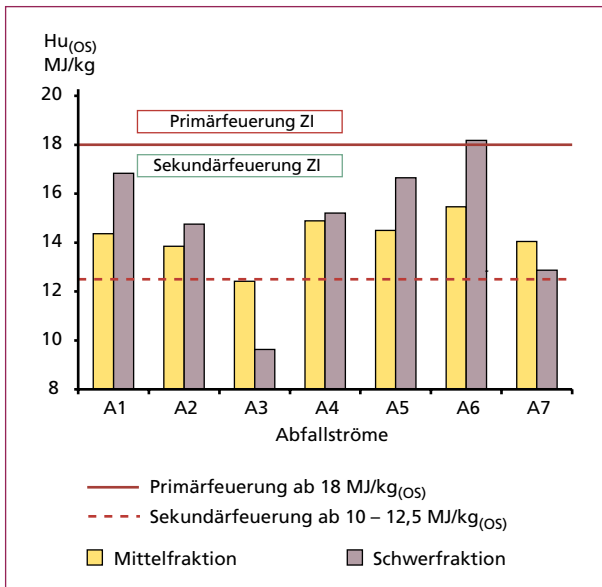


Bild 4:

Energetisches Verwertungspotential der Abfallströme nach Entwässerung, bezogen auf den jeweiligen Energiegehalt der Schwer- bzw. der Mittelfraktion. ZI: Zementindustrie,  $Hu_{(OS)}$ : Heizwert der Originalsubstanz



Die Ergebnisse in Bild 4 zeigen, dass durch eine zusätzliche Entwässerung der Hu bei fast allen Abfallströmen um mehr als 3 MJ/kg ansteigt. Auffällig ist die extreme Energiezunahme bei A2 und A3. Das kann auf den hohen Cellulose- und Textilanteil zurückgeführt werden. Dieses Material ist stark Wasser aufnahmefähig was wiederum zu einem durchschnittlich höheren Wassergehalt führt.

Insgesamt kann davon ausgegangen werden, dass die SGF und MGF nach einer zusätzlichen Entwässerung als Ersatzbrennstoff in der Zementindustrie zum Einsatz kommen können. Allerdings müssen noch weitere Spezifikation ausgewertet werden. Ein besser entwässerter Abfallstrom verringert außerdem die Transportmengen und spart somit Kosten und CO<sub>2</sub>-Emissionen (in Form von eingespartem Treibstoff).

### 4. Zusammenfassung und Ausblick

Grundsätzlich zeigen die vorläufigen Ergebnisse des Forschungsprojekts, dass in Österreich trotz einer gut funktionierenden Abfalltrennung, in der Leichtverpackungssammlung und in der Restmüllsammlung noch ein großes ungenutztes Kunststoffpotential vorhanden ist. Speziell die hochwertigen und recyclingfähigen Polyolefine werden derzeit in den konventionellen trockenmechanischen und biologischen Abfallbehandlungsanlagen überwiegend zu hochkalorischen Ersatzbrennstoffen aufbereitet und entgehen so dem Recycling. Die Trennversuche mittels des neuartigen nassmechanischen Aufbereitungsverfahrens von *Plastic Reborn* zeigen eine sehr gute Abscheidung der Polyolefinfraktionen. Für die Restfraktionen kann sehr wahrscheinlich weiterhin die Mitverbrennung in Zementwerken vorgenommen werden.

Die Europäischen Kommission hat 2014 einen Vorschlag zu einem Richtlinienpaket der Kreislaufwirtschaft (*Towards a circular economy: a zero waste programme for Europe*) [9] vorgelegt und dieses Paket 2015 überarbeitet (*Closing the loop*) [8]. Es kann erwartet werden, dass weitere Stoffströme aus der Deponierung und der Verbrennung in das Recycling umgelenkt werden müssen, um die höheren Recyclingziele zu erreichen. Eine nassmechanische Aufbereitung und die rohstoffliche Verwertung dieser neu generierten Polyolefinkonzentrate könnten zur Erreichung höherer Recyclingraten einen wesentlichen Beitrag leisten.

Gegenstand der weiteren Forschungsaktivitäten ist die ökonomische und ökologische Bewertung, in Hinblick auf die Auswirkungen der Anlage auf die abfallwirtschaftliche Situation in Österreich. Außerdem wird die bestehende Pilotanlage auf Basis der bisherigen Erkenntnisse modifiziert und erneute Trennversuche gestartet. Das Projektende ist für Mitte 2018 geplant, bis dahin sollte eine Grundlage für das Basic Engineering einer Demonstrationsanlage geschaffen sein.

### 5. Literatur

- [1] Aldrian, A.; Wellacher, M.; Pomberger, R.: Development and validation of a new direct sampling method for coarse mono- and mixed waste fractions bound in bales. *International journal of environmental analytical chemistry* (95)15. 2015, S. 1502-1522
- [2] Altstoff Recycling Austria AG (ed.): Leistungsreport 2014. Wien, Österreich: ARA, 2015

- [3] Austrian Standards Institut (ASI) (ed.): ÖNORM S2100 Abfallverzeichnis. Wien, Österreich: ASI, 2005
- [4] Braun, D.: Zeittafel zur Geschichte der Kunststoffe. 2006; Verfügbar unter: <http://www.deutsches-kunststoff-museum.de/rund-um-kunststoff/zeittafel-zur-geschichte/> (aufgerufen am 30.12.2016)
- [5] Bundesministerium für Land- und Forst-, Umwelt und Wasserwirtschaft (BMLFUW) (ed.): Die Bestandsaufnahme der Abfallwirtschaft in Ö., Statusbericht 2015. Vienna, Austria: BMLFUW, 2015
- [6] Bundesministerium für Land- und Forstwirtschaft, Umwelt und Wasserwirtschaft (BMLFUW) (ed.): BGBl. II Nr. 476/2010 Verordnung über die Verbrennung von Abfällen (Abfallverbrennungsverordnung – AVV). Wien, Österreich: BMLFUW, 2010
- [7] Deditz, J.; Pinkel, M.; Pomberger, R.: Concepts for Processing Solid Recovered Fuels of Different Waste Origins for Waste-to-Energy Plants. In: Thomé-Kozmiensky, K. J.; Thiel, S. (Hrsg.): Waste Management, Band 4. Neuruppin: TK Verlag Karl Thomé-Kozmiensky, 2014. ISBN: 978-3-944310-15-2
- [8] Europäische Kommission (ed.): Closing the loop: Commission adopts ambitious new Circular Economy Package to boost competitiveness, create jobs and generate sustainable growth. 2015, Verfügbar unter: [http://europa.eu/rapid/press-release\\_IP-15-6203\\_en.htm](http://europa.eu/rapid/press-release_IP-15-6203_en.htm)
- [9] Europäische Kommission (ed.): Communication from the Commission to the European Parliament, the Council, The European economic and social committee and the committee of the regions: Towards a circular economy: A zero waste programme for Europe. 2.7.2014, Brüssel, Belgien, 2014
- [10] Europäische Kommission (ed.): Proposal for the Directive 94/62/EG of the European Parliament and of the Council 5 Dezember 2015 on packaging and packaging waste. Brüssel, Belgien: EC, 2015
- [11] Feuchter, M.: Kunststoffproduktionsmengen. Skriptum zur Lehrveranstaltung *Kunststoffrecycling* an der Montanuniversität Leoben, 2016
- [12] Karl, J.: Dezentrale Energiesysteme: Neue Technologien im liberalisierten Energiemarkt. Oldenbourg Verlag, 2012
- [13] Kranzinger, L.; Pomberger, R.; Schwabl, D.; Bauer, M.: Quo vadis Kunststoffrecycling – Bestandsaufnahme der polyolefinen Kunststoffe in der österreichischen Abfallwirtschaft. In: Pomberger, R. et al. (Hrsg.): RecyDepoTech 2016. Lavanttal, Österreich: Christian Theiss GmbH, 2016, S. 583-588; ISBN: 978-3-200-04777-8
- [14] N.N.: Abbaubarkeit. Wasser-Wissen, Institut für Umweltverfahrenstechnik – Universität Bremen, 2000; <http://www.wasserwissen.de/abwasserlexikon/a/abbaubarkeit.htm> (aufgerufen November 13, 2016)
- [15] Plastics Europe (ed.): Plastics – The Facts 2016; An Analysis of European plastics production, demand and waste data. Brüssel, Belgien: Plastics Europe, 2016; Verfügbar unter: <http://www.plasticseurope.org/Document/plastics-the-facts-2016.aspx> (aufgerufen November 12, 2016).
- [16] Reh, K.; Franke, M.; Baum, H.G.; Faulstich, M.: Studie *Vergleichende Analyse der Entsorgung von Verpackungsabfällen aus haushaltsnahen Anfallstellen auf Basis der Verpackungsverordnungen in Deutschland und Österreich*. In: Wien: ÖWAV (Serie von Österreichischen Wasser- und Abfallwirtschaftsverbandes (ÖWAV), Magazine 169. 2014
- [17] Sarc, R.; Lorber, K.E.: Production, quality and quality assurance of Refuse Derived Fuels (RDFs). In: Waste Management 33, 2013; ISSN: 0956-053X. S. 1825-1834
- [18] Sarc, R.; Lorber, K.E.; Pomberger, R.; Rogetzer, M.; Sipple, E.M.: Design, Quality and Quality Assurance of Solid Recovered Fuels (SRF) for the Substitution of Fossil Feedstock in the Cement Industry. In: Waste Management & Research 32 (7), 2014, S. 565-585