



Departmentübergreifende Masterarbeit

# **Vergleich der Verwertungssysteme werkstoffliches und rohstoffliches Polyolefinrecycling anhand von ausgewählten Abfallströmen**

verfasst von

Selina Möllnitz, BSc.

In Kooperation zwischen den Lehrstühlen für:

Abfallverwertungstechnik und Abfallwirtschaft



Univ.-Prof. Dr. mont. Roland Pomberger

Kunststoffverarbeitung



Univ.-Prof. Dr. mont. Clemens Holzer

Betreuer:

Univ.-Prof. Dr. mont. Clemens Holzer

Univ.-Prof. Dr. mont. Roland Pomberger

eingereicht am

Lehrstuhl für Kunststoffverarbeitung

Leoben, 07. Juni 2017



## **Eidesstattliche Erklärung**

Ich erkläre an Eides statt, dass ich diese Arbeit selbstständig verfasst, andere als die angegebenen Quellen und Hilfsmittel nicht benutzt und mich auch sonst keiner unerlaubten Hilfsmittel bedient habe.

## **Affidavit**

I declare in lieu of oath, that I wrote this thesis and performed the associated research myself, using only literature cited in this volume.

---

Datum

---

Unterschrift

## Danksagung

Vorab möchte ich mich bei meinen beiden, betreuenden Professoren, Prof. Pomberger und Prof. Holzer, für die Möglichkeit und die Betreuung, dieser fachübergreifenden Masterarbeit bedanken.

Weiteres möchte ich mich bei den Herren Hofer und Herrn Schöffel bedanken, die mich von Seiten der OMV Refining & Marketing GmbH zuverlässig mit Informationen und Daten versorgt haben.

Auch danke ich all meinen Interviewpartnern, die sich bereitwillig die Zeit genommen haben, mich durch die Anlagen zu führen, sowie meine Fragen zu beantworten.

Ein großes Dankeschön geht auch an meine Kollegen, die mich über die letzten drei Jahre am Lehrstuhl für AVAW begleitet und tatkräftig unterstützt haben. Besonders hervorheben möchte ich Frau Mag. Therese Schwarz, die die Betreuung dieser Masterarbeit übernommen hat und mich, besonders in der Abschlussphase, stark unterstützt hat. Ebenso geht mein Dank an Herrn Thomas Nigl, der diese Arbeit korrigiert hat und mir mit hilfreichen Tipps und Anregungen unter die Arme gegriffen hat. Auch möchte ich mich bei Frau Astrid Arnberger, die zu Beginn meine Mentorin war und von der ich viel lernen konnte, bedanken.

Mein besonderer Dank geht an meine lieben Bürokolleginnen, die mir im Laufe der gemeinsamen Zeit sehr ans Herz gewachsen sind. Ich bedanke mich bei euch, für eure Unterstützung in allen Lebenslagen und für die lustigen Spieleabende, die wir gemeinsam verbracht haben.

Mein größter Dank gilt meiner Familie, die mich immer unterstützt hat. Ihr habt mir beigebracht, alles, was man beginnt, auch abzuschließen, egal wie anstrengend dies manchmal sein mag.

Mein lieber Bernhard, dir bin ich für so viele Dinge während unserer gemeinsamen Studienzeit dankbar. An dieser Stelle fehlt der Platz alles aufzulisten, daher bedanke ich mich für deine Geduld mit mir.

# Kurzfassung

## Vergleich der Verwertungssysteme werkstoffliches und rohstoffliches Polyolefinrecycling anhand von ausgewählten Abfallströmen

Auf Grund der stetig steigenden Mengen an kunststoffhaltigen Abfällen sowie der gesetzlich zu erfüllenden Recyclingquoten, ist es notwendig geworden, dass gewisse Abfallströme geeigneten Recyclinganlagen zugeführt werden. Da in den untersuchten Abfällen die Polyolefine mengenmäßig die größte Kunststoffsorte darstellen, werden diese in dieser Arbeit in den Mittelpunkt gestellt.

Das werkstoffliche Recycling ist nicht für alle Abfallströme geeignet, wodurch die Entwicklung neuer Recyclinglösungen für altkunststoffhaltige Abfälle notwendig wird. Die OMV Refining & Marketing GmbH hat deswegen eine auf dem rohstofflichen Recyclingprinzip basierende Pilotanlage für das Polyolefinrecycling – das ReOil Verfahren – entworfen und gebaut.

Zur Abklärung, ob geeignete Abfallströme in entsprechenden Mengen in Österreich als Inputmaterial für diese Anlage vorliegen, wurden in dieser Arbeit vier ausgewählte Abfallströme (Leichtstoffverpackungen, gemischte Siedlungsabfälle, Reststoffe aus dem Altpapier- bzw. Altkartonrecycling (Rejekt) und abgegrabenes Deponiegut) hinsichtlich ihrer allgemeinen Zusammensetzung sowie dem Polyolefingehalt analysiert. Anhand der gewonnenen Ergebnisse aus den Sortieranalysen wurde deren Eignung für die beiden Recyclingoptionen untersucht. Dabei wurde festgestellt, dass sich die Leichtstoffverpackungen bevorzugt für ein werkstoffliches Recycling eignen. Die aus den gemischten Siedlungsabfällen gewonnene Fraktion eignet sich für beide Recyclingoptionen. Die Rejekte sowie die aus dem Deponiegut gewonnenen Fraktionen sind nur für das rohstoffliche Verfahren geeignet.

Zur Bewertung, ob ein großindustrieller Einsatz (Durchsatz von rd. 200.000 t/a) der ReOil Anlage im Vergleich zum Extrudersystem des werkstofflichen Recyclings zielführend ist, wurden die beiden Verfahren einander gegenübergestellt. Für diesen Vergleich wurden sowohl die jeweils vorangestellten Abfallbehandlungslinien (trocken- und anschließend nassmechanisch), als auch die beiden Hauptaggregate Extruder und ReOil Prozess miteinander verglichen und bewertet.

Der qualitative Vergleich der Aufbereitungslinien ergab, dass die trockenmechanische Aufbereitung, welche vor dem ReOil Prozess eingesetzt wird, einen einfacheren Aufbau aufweist und für alle Abfallströme geeignet ist. Die beiden nassmechanischen Aufbereitungslinien weisen zwar einen vergleichbaren Aufbau auf, aber auf Grund der unterschiedlichen Aggregate beider Anlagen sind der Energieverbrauch sowie die CO<sub>2</sub>-Emissionen beim ReOil Verfahren geringer.

Der quantitative Vergleich beider Hauptprozesse ergab, dass für hohe Durchsätze beide Verfahren geeignet sind.

# **Abstract**

## **Comparison of mechanical and feedstock recycling systems for polyolefins on the basis of selected waste flows**

Due to constantly increasing amounts of waste flows containing discarded plastics as well as to legal recycling quotes needing to be fulfilled, it is necessary to redirect certain waste flows to suitable recycling facilities. Since the biggest mass fraction of the investigated waste flows consists of polyolefins, these were focused upon within this thesis.

Mechanical recycling is not suitable for all sorts of waste flows; thus, the development of innovative recycling solutions for plastic containing waste flows is necessary. Therefore, the OMV Refining & Marketing GmbH planned and constructed a pilot plant – the ReOil process – for polyolefin processing, based on chemical recycling principles.

For determination of whether suitable waste flows in appropriate amounts are present in Austria and can be used as input material, the four waste flows light packaging, mixed municipal wastes, rejects from paper/cardboard wastes recycling, and landfill-mining wastes, were selected for this thesis and analysed with regards to their general composition and polyolefin content.

Based on the results gained from sorting analyses, their suitability for the two recycling options were investigated. It was determined that light packaging waste is most suitable for mechanical recycling; the fraction gained from mixed municipal waste is suitable for both recycling options; and rejects as well as fractions gained from landfill mining wastes are only suitable for chemical recycling.

To evaluate whether the industrial scale application (throughput of 200.000 t/a) of the ReOil plant was expedient as opposed to extruder systems of mechanical recycling plants, both systems were juxtaposed. For this comparison, the respective upstream installed waste treatment lines as well as both main units (extruder; ReOil plant) were compared and assessed.

The qualitative comparison of waste treatment lines concluded that dry mechanical waste treatment, as used before the ReOil process, displays a simple structure and is suitable for all waste streams. The wet mechanical treatment lines of both processes show comparable structures, yet due to varying units within those lines the energy consumption as well as CO<sub>2</sub>-emission are lower for the ReOil process.

The quantitative comparison of both main treatment processes finally concluded that both plants are suitable for high throughput.

## Inhaltsverzeichnis

<b>1</b>	<b>EINLEITUNG UND ZIELSETZUNG .....</b>	<b>3</b>
<b>2</b>	<b>KUNSTSTOFF UND ABFALLWIRTSCHAFT .....</b>	<b>5</b>
2.1	POLYOLEFINE .....	7
2.2	ABFALLHIERARCHIE .....	14
<b>3</b>	<b>BESCHREIBUNG DER ABFALLSTRÖME .....</b>	<b>19</b>
3.1	LEICHTSTOFFVERPACKUNGSABFÄLLE .....	19
3.2	GEMISCHTER SIEDLUNGSABFALL (RESTMÜLL) .....	21
3.3	REJEKT .....	22
3.4	DEPONIEGUT AUS DEM LANDFILL MINING .....	23
<b>4</b>	<b>VERFAHRENSÜBERBLICK .....</b>	<b>25</b>
4.1	WERKSTOFFLICHES RECYCLING .....	29
4.1.1	Mechanische Vorbehandlung .....	29
4.1.2	Rezyklatherstellung mittels Extruderlinie .....	37
4.2	ROHSTOFFLICHES RECYCLING .....	40
4.2.1	Mechanische Vorbehandlung .....	42
4.2.2	Thermochemische Konversion von Altkunststoffen (ReOil Verfahren) .....	44
4.3	PRODUKTE AUS DEM WERKSTOFFLICHEN RECYCLING .....	46
4.4	PRODUKTE AUS DEM ROHSTOFFLICHEN RECYCLING .....	47
<b>5</b>	<b>METHODIK .....</b>	<b>48</b>
5.1	LITERATURRECHERCHE UND EXPERTENINTERVIEWS .....	48
5.2	AUSWAHL DER ABFALLSTRÖME .....	49
5.3	AUSWAHL DER BEHANDLUNGSANLAGEN UND AGGREGATE .....	51
5.3.1	Werkstoffliches Recycling .....	51
5.3.2	Rohstoffliche Recycling .....	52
5.4	BEPROBUNG .....	52
5.5	EXPERIMENTELLER VERSUCHSAUFBAU .....	55
<b>6</b>	<b>ERGEBNISSE UND DISKUSSION .....</b>	<b>60</b>
6.1	BEWERTUNG DER ABFALLSTRÖME .....	60
6.1.1	Ergebnisse der Literaturrecherche und Interviews .....	60
6.1.2	Ergebnisse der manuellen Sortierung .....	67
6.1.3	Ergebnisse der Dichtentrennung im Schwerfeld .....	76
6.2	BEWERTUNG DER AUFBEREITUNGSLINIEN .....	82
6.3	BEWERTUNG DER HAUPTAGGREGATE .....	84
<b>7</b>	<b>ZUSAMMENFASSUNG UND AUSBLICK .....</b>	<b>90</b>
7.1	AUSGEWÄHLTE ABFALLSTRÖME .....	90
7.2	BEHANDLUNGSLINIEN .....	92
7.3	RECYCLINGAGGREGATE .....	93

<b>8</b>	<b>VERZEICHNISSE</b> .....	<b>I</b>
8.1	LITERATURVERZEICHNIS.....	I
8.2	ABKÜRZUNGEN UND SYMBOLE.....	VI
8.3	TABELLENVERZEICHNIS.....	VIII
8.4	ABBILDUNGSVERZEICHNIS.....	X
	<b>ANHANG</b> .....	<b>XIII</b>

# 1 Einleitung und Zielsetzung

*„Der Mensch kann ohne die Natur nicht leben, die Natur aber sehr wohl ohne den Menschen!“*  
[1]

Leben ohne den Verbrauch von Ressourcen sowie Energie und ohne den Anfall von Abfall gibt es nicht. Auch in den Kreisläufen und Prozessen der Natur fallen Abfälle an. Ein solcher Abfall, den die Natur auf Deponien „zwischenlagert“ ist z.B. Kohlendioxid (CO<sub>2</sub>), welches in Form von Kalkfelsen abgelagert wird. Anorganisches Material findet man in Form von Erzlagerstätten und Sedimenten wieder und organische Materie in Form von Kohle, Erdöl und Erdgas. [1]

Der überwiegende Teil der Kunststoffe wird aus eben diesem Erdöl hergestellt. Allerdings werden nur ca. 4 – 6 % [2] des europäischen Mineralölverbrauches für die Kunststoffherstellung aufgewendet. Da jedoch rund ein Drittel des globalen Primärenergieverbrauchs durch Erdöl gedeckt wird, ist es somit der wichtigste Energierohstoff der modernen Industriegesellschaft. Doch steht uns dieser fossile Rohstoff nicht unbegrenzt zur Verfügung. Dadurch hat die stoffliche, ebenso wie die energetische Verwertung von Kunststoffen eine hohe rohstoffwirtschaftliche Relevanz. Für die Herstellung von Kunststoff-Regranulaten aus Sekundärrohstoffen d.h. aus Altkunststoffen, entfallen die energie-, und umweltintensiven Vorketten wie Erdölförderung, Rohöltransport, Raffination, sowie die Polymerisation. Durch Kunststoffrecycling wird letztlich eine endliche Georessource und die sie umgebende Umwelt geschont.

Viele Kunststoffe sind äußerst resistent gegen Umwelteinflüsse und werden von der Natur nur schlecht abgebaut. Viele Jahre wurden in Österreich Kunststoffe auf Mülldeponien abgelagert und in weiten Teilen Europas ist diese Praxis bis heute noch Stand der Technik. Die in den Deponien zwischengespeicherten Altkunststoffe könnten in Zukunft einen Teil des Bedarfs an Sekundärrohstoffen decken, sofern eine geeignete Verwertungs- bzw. Recyclinglösung existiert.

Es sind bereits eine Vielzahl an Verwertungs- und Recyclingoptionen vorhanden, welche sich einer der drei Kategorien: werkstoffliches Recycling, rohstoffliches Recycling und thermische Verwertung zuordnen lassen. In dieser Arbeit werden die beiden erstgenannten Recyclingoptionen anhand von zwei Anlagenbeispielen, welche mit vier ausgewählten Abfallströmen beschickt werden, im Detail betrachtet. Bei den ausgewählten Abfällen handelt es sich um Leichtstoffverpackungen, gemischte Siedlungsabfälle, Reststoffe aus dem Altpapier- bzw. Altkartonrecycling (Rejekt) sowie abgegrabenes Deponiegut. Aus diesen Abfällen sollen Altkunststoffe, im Speziellen die Polyolefine für das Recycling zurückgewonnen werden. Im Falle des werkstofflichen Recyclings wird die gesamte, zuvor notwendige mechanische Abfallbehandlung mit anschließender Extruderlinie betrachtet. Als Vertreter für das rohstoffliche Recycling wird ein von der OMV Refining & Marketing GmbH neu entwickeltes Verfahren, der „ReOil Prozess“ (thermochemische Konversion), ebenso mit vorgeschaltener mechanischer Behandlungsanlage gewählt.

Der Untersuchungsumfang beider Recyclingoptionen für die aus den Abfällen gewonnenen Polyolefine kann dabei in drei Forschungsfragen untergliedert werden:

### **Geeignete Abfallströme**

Zur Beurteilung der Eignung von Abfällen als Sekundärrohstoff für das werkstoffliche bzw. rohstoffliche Recycling, sollen vier Abfallströme ausgewählt und untersucht werden. Dabei werden zusätzlich zur klassischen Datenerhebung mittels Literaturrecherche auch Sortierversuche durchgeführt, um die Zusammensetzung des jeweiligen Abfalls, sowie den Polyolefingehalt zu bestimmen. Basierend auf den erhaltenen Informationen und Sortiererergebnissen soll folgende Forschungsfrage beantwortet werden:

**Frage 1:** *Welche der beiden Verwertungsoptionen ist basierend auf der Charakteristik des jeweiligen Abfallstromes zu bevorzugen?*

### **Aufbereitungslinien**

Die Abfallströme müssen je nach Anforderungen der jeweiligen Recyclingoption entsprechend aufbereitet werden. Das heißt, dass das aufzubereitende Material zerkleinert, Feingut und Störstoffe abgetrennt und die Zielfraktion (Polyolefine) schrittweise aufkonzentriert werden muss. Es soll untersucht werden, ob es bereits geeignete Aufbereitungslinien für die ausgewählten Abfallströme gibt. Ansonsten sollen diese in vereinfachter Form mit den wichtigsten Verfahrensschritten entworfen werden. In diesem Zusammenhang soll folgende Forschungsfrage beantwortet werden:

**Frage 2:** *Worin unterscheiden sich die Aufbereitungslinien für das werkstoffliche und rohstoffliche Recycling und wie lautet das Ergebnis eines direkten Vergleichs?*

### **Recyclinganlagen**

Der aufbereitete und aufkonzentrierte Abfallstrom wird anschließend in der jeweiligen Recyclinganlage (Extruderlinie bzw. ReOil Prozess) endaufbereitet, um den Rohstoffkreislauf schließen zu können. Es soll eine geeignete Extruderlinie gefunden werden, welche dem bereits im Versuchsmaßstab existierenden ReOil Prozess gegenüber gestellt werden kann. Die Forschungsfrage, die hierbei beantwortet werden soll, lautet wie folgt:

**Frage 3:** *Welches der beiden Hauptaggregate (Extruder und ReOil Verfahren) des werkstofflichen und rohstofflichen Recyclingprozesses ist für den großindustriellen Einsatz besser geeignet?*

## 2 Kunststoff und Abfallwirtschaft

Kunststoff ist ein Begriff für eine sehr große Werkstoffgruppe, die aus einer Vielzahl an unterschiedlichsten Stoffen besteht. Gemein ist ihnen, dass sie aus organischen Ausgangsmaterialien wie zum Beispiel Zellulose, Gas und hauptsächlich Rohöl hergestellt werden. Dabei sind Kunststoffe nicht nur in ihrer Herstellung, sondern auch in der Nutzungsphase sehr ressourceneffizient. Für die Kunststoffherstellung in Europa (EU28+2) werden nur 4 % - 6 % [2] der insgesamt verbrauchten Öl- und Gasmengen eingesetzt. In der Nutzungsphase schützen Hightech-Verpackungen aus Kunststoff die Waren und Lebensmittel vor Beschädigungen und Verderben, wodurch Abfälle vermieden werden.

Die Kunststoffe sind aus unserem Alltag auf Grund ihrer einzigartigen Eigenschaftsprofile nicht mehr wegzudenken und es ergeben sich täglich mehr neue Anwendungsbereiche (z.B.: Sport- oder Medizinesektor) für diese Stoffklasse. Gleichzeitig mit der wachsenden Zahl an Kunststoffprodukten werden auch kontinuierlich neue Kunststoffe, die den neuen Anforderungen gerecht werden müssen, entwickelt. Somit ist klar, dass wir bereits jetzt mit den Problemen der stetig steigenden Menge und Diversität der Kunststoffabfälle konfrontiert sind.

Im Jahr 2015 wurden weltweit 322 Millionen Tonnen Kunststoff (ohne PET-, PA-, PP- und Polyacryl-Faserproduktion) produziert. Im Vergleich dazu wurden 2015 in Europa 58 Millionen Tonnen produziert. Während für Europa die produzierte Kunststoffmenge seit 2011 nahezu konstant bleibt, steigt die weltweite Kunststoffproduktion. [2]

Der Bedarf an Kunststoffen in Europa belief sich im Jahr 2015 auf 49 Millionen Tonnen, wobei 70 % davon auf nur sechs Länder (Deutschland, Italien, Frankreich, Spanien, Großbritannien und Polen) entfielen. Der Bedarf an Kunststoff in Österreich belief sich 2015 auf ca. 1 Mio. Tonnen. [2]

Im Jahr 2014 fielen in Europa 25,8 Millionen Tonnen Kunststoffabfall an [2]. Davon wurden 39,5 % (10,2 Mio. t) der Energierückgewinnung zugeführt und 29,7 % (7,7 Mio. t) recycelt [2]. Die restlichen 30,8 % (8 Mio. t) wurden überwiegend in Ländern ohne Deponieverbot abgelagert [2]. Die Entwicklung der Kunststoffabfallbehandlung in Europa in den Jahren 2006 bis 2014 ist im nachstehenden Ternärdiagramm (vgl. Abbildung 1) gezeigt. Es ist ein deutlicher Trend, der weg von der Deponierung und hin zum Recycling führt, zu erkennen. Dennoch wird in der EU28+2 aktuell immer noch sehr viel Kunststoffabfall deponiert und thermisch verwertet.

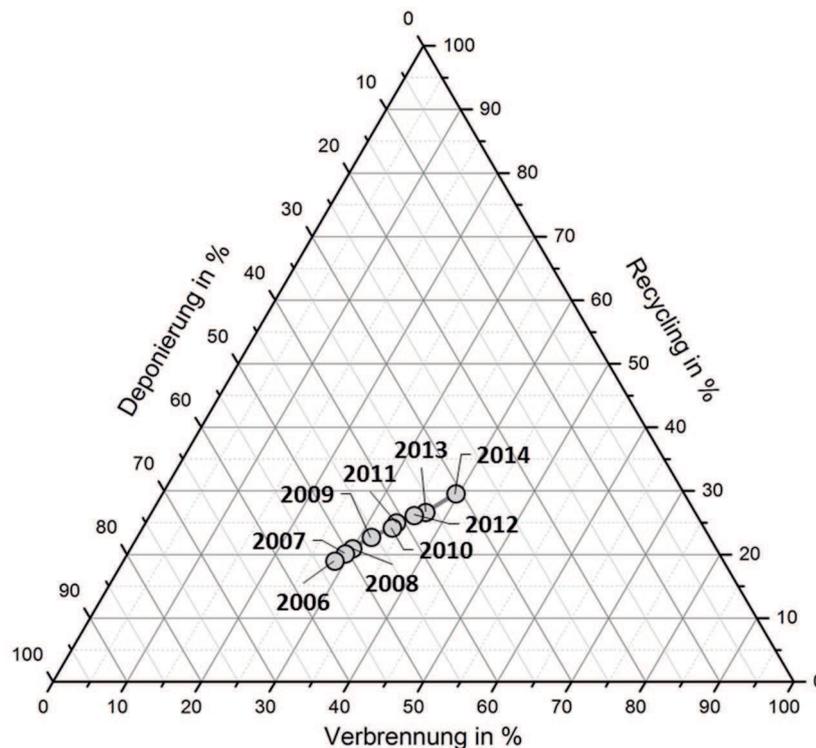


Abbildung 1: Darstellung der Entwicklung der Kunststoffabfallbehandlung in Europa in Form eines Ternärdiagramms [3]

In Österreich fielen im Jahr 2014 291.968 Tonnen Verpackungsabfälle aus Kunststoff an. Davon gingen 33,6 % (98.101 t) ins Recycling und die verbleibenden 66,4 % (193.867 t) wurden einer thermischen Verwertung zur Energierückgewinnung zugeführt. Seit dem Deponierungsverbot 2004 dürfen in Österreich keine Kunststoffabfälle abgelagert werden. [4]

### Spannungsfeld Kunststofftechnik und Abfallwirtschaft

Um das Spannungsfeld, in dem sich die vorliegende Arbeit bewegt, besser zu verstehen, wird an dieser Stelle auf einige allgemeine und grundlegende Unterschiede dieser beiden Fachbereiche eingegangen. Die Kunststofftechnik als produktionsorientiertes Fachgebiet und die Abfallwirtschaft als End-of-Life Betrachtung von Produkten stehen vor unterschiedlichen Herausforderungen und beschäftigen sich mit dem Thema Kunststoff aus anderer Perspektive.

In der Kunststofftechnik sind die Stoffströme (Kunststoffe) klar definiert und innerhalb gewisser Grenzen konstant. Der Anwender weiß, welches Material verarbeitet wird und es existieren in der Regel Sicherheitsdatenblätter zu diesen Kunststoffen. In der Abfallwirtschaft handelt es sich bei den Stoffströmen um Abfälle. Abfälle sind vielfach Mischungen aus verschiedenen Teilfraktionen. Diese Abfälle weisen eine meist schwankende, unbekannte sowie heterogene Zusammensetzung auf und es obliegt dem Anwender, herauszufinden, welche Komponenten enthalten sind und wie damit weiter verfahren werden muss. Zusätzlich ist die Abfallzusammensetzung nicht nur von der Abfallart, sondern zumeist auch von Faktoren wie geographischer Lage des Anfallortes, Jahreszeit, sozio-ökonomischer Struktur, regional unterschiedlichen Abfallsammelsystemen, usw. abhängig. Es handelt sich daher bei Abfällen um undefinierte Stoffströme. Die jährlich anfallenden Abfallmengen sind aus eben diesen Gründen teilweise starken Schwankungen unterworfen. Daher ist es schwer, in kurzer Zeit an

belastbare Daten (z.B. Stoffstromzusammensetzung, Mengenerhebungen) zu gelangen bzw. diese selbst zu generieren. Zudem sind abfallwirtschaftliche Daten zumeist mit großen Unsicherheiten behaftet. Im Gegensatz dazu, lässt sich eine Materialcharakterisierung eines Kunststofftyps im Labor für Werkstoffprüfung und Rheologie in einem relativ kurzen Zeitraum durchführen. Die daraus gewonnenen Daten sind genau, belastbar und werden sich innerhalb dieses Kunststofftyps in gewissen definierbaren Grenzen bewegen.

Entsprechend der genannten Probleme müssen auch abfallwirtschaftliche Betriebe, in welchen die Abfälle behandelt werden, flexibel sein. Ein kunststoffverarbeitender Betrieb beispielsweise bestellt genau jene Bedarfsmenge von genau jenen Kunststofftypen, welche er für die Jahresproduktion benötigt. Hier zeigt sich gut, dass in der Kunststofftechnik ein methodischeres, definierbarer und besser zu planendes Vorgehen möglich ist.

Auf Grund der genannten Unterschiede ergibt sich, dass in diesen beiden Fachbereichen verschiedene Herangehensweisen an Problemstellungen praktiziert werden. Die allgemeine Kunststofftechnik arbeitet vorrangig prozessorientiert, d.h. das Wissen um den Prozess, dem der Kunststoff unterworfen ist, bildet den Kern der Problembearbeitung. Die Abfallwirtschaft hingegen erschließt Problemstellungen, welche sich auf die jeweiligen Abfallströme beziehen, primär input-/outputorientiert.

Ebenso sind die Rahmenbedingungen beider Fachbereiche verschieden. Die Abfallwirtschaft ist in erheblichem Maße gesetzlichen Rahmenbedingungen unterworfen. Eine Vielzahl an Verordnungen und Gesetzen, welche oft regional, national und international unterschiedlich sind, reglementieren alle abfallwirtschaftlichen Prozesse. Die Rahmenbedingungen für die Verfahren in der Kunststofftechnik sind, neben den in den meisten Fachbereichen üblichen Gesetzen wie z.B. Arbeitssicherheit primär durch die werkstofflichen, verfahrens- und produktionstechnischen Grenzen abgesteckt. Somit ist es eine Herausforderung, diese beiden unterschiedlichen Fachbereiche mit einander zu vergleichen.

Da in dieser Arbeit nur die Gruppe der Polyolefine für den Recyclingprozess betrachtet wird, wird im nachfolgenden Kapitel auf diese speziell eingegangen.

### 2.1 Polyolefine

Polyolefine (PO) ist ein Sammelbegriff für aus Alkenen wie beispielsweise Ethen, Propen, 1-Buten u.a. durch Polymerisation hergestellte Polymere wie Polyethylen (PE), Polypropylen (PP) und Polybutylen (PB). Die Gruppe der Polyolefine stellt im Jahr 2015 mit ca. 23 Millionen Tonnen etwa 47 % des europäischen Gesamtjahresbedarfs an Kunststoffen von 49 Millionen Tonnen dar und macht daher die größte Gruppe der Kunststoffe aus [2]. Die wichtigsten Vertreter der Gruppe der Polyolefine sowie deren Dichte und Schmelztemperaturbereich sind der nachstehenden Tabelle 1 zu entnehmen.

*Tabelle 1: Die wichtigsten Vertreter der Polyolefine [5]*

Polymer	Akronym	Dichte g/cm <sup>3</sup>	Schmelztemperatur °C
PE niederer Dichte (low density)	PE-LD	0,915 - 0,935	105 - 115
Lineares PE niederer Dichte (linear low density)	PE-LLD	0,90 - 0,93	120 - 130



<ul style="list-style-type: none"> <li>• Lebensmittelechtheit</li> <li>• Sterilisierbarkeit</li> <li>• Vielseitige Einsatzmöglichkeiten durch einstellbares Eigenschaftsprofil</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Sehr gutes elektrisches und dielektrisches Verhalten</li> <li>• Gutes Gleitverhalten, geringer Verschleiß</li> </ul>
---	---

Im Nachfolgenden werden drei essentielle Stoffeigenschaften von Kunststoffen angeführt, die das Recycling, im Besonderen das werkstoffliche Recycling erschweren.

**Verträglichkeit der Kunststoffsorten untereinander**

Viele Kunststoffe sind nicht miteinander verträglich und dies bedeutet keine Mischbarkeit und keine Verarbeitung als Mischung. Derartige Kunststoffe liegen somit in der Mischung (Polymerblend) als getrennte Phasen vor. Um eine Haftung zwischen diesen Phasen zu erzielen und die Ausdehnung dieser Phasen auch möglichst klein zu halten, können sogenannte Phasen- bzw. Verträglichkeitsvermittler (Pfcopopolymere oder Blockcopopolymere) eingesetzt werden. Die nachstehende Tabelle 3 zeigt die Verträglichkeitsmatrix verschiedenster Thermoplaste. Deutlich zu erkennen ist, dass Blends aus PE und PP eine geringe Mischbarkeit (Kennzahl 2 - 3) bis hin zur Unverträglichkeit (Kennzahl 4) aufweisen können. Diese Blends sind in Tabelle 3 mit rot eingerahmt.

*Tabelle 3: Verträglichkeitsmatrix für Thermoplaste [8]*

Zumisch-Werkstoffe	Hauptwerkstoff							
	PE	PP	PS	PVC	PET	PC	PA	PBT
PE	1	3...4	4	4	4	4	2...4	4
PP	2...4	1	4	4	4	4	2...4	4
PS	4	4	1	4	3	2...4	3...4	3...4
PVC	4	4	2...4	1	4	3...4	4	4
PET	4	4	4	4	1	1	3...4	4
PC	4	4	2...4	4	1	1	3...4	1
PA	4	4	3...4	4	3	4	1	3
PBT	4	4	2...4	4	4, 3	1	3...4	1

1 = gut verträglich; 2 = mischbar bis ca. 20 %; 3 = mischbar bis ca. 5 %; 4 = unverträglich

Dies zeigt, dass die Herausforderung im Kunststoffrecycling darin besteht, möglichst sortenreine Altkunststoffe ohne unerwünschte Fremd(kunst)stoffe zu erzeugen bzw. den Anteil dieser auf ein Minimum zu reduzieren. Nur so können hochwertige Rezyklate für wertige Produkte erzeugt werden.

**Alterung von Kunststoffen**

Ebenso wie bei anderen Materialien treten auch bei Kunststoffen Alterungserscheinungen auf, woraus eine Verschlechterung der Gebrauchseigenschaften oder sogar eine Verkürzung der Lebensdauer resultieren kann. Polymerwerkstoffe weisen wesentlich geringere Bindungskräfte und Packungsdichten der Makromoleküle als vergleichsweise Metalle oder keramische Werkstoffe auf. Dadurch haben Wärme-, Licht-, Sauerstoff-einwirkung etc. einen wesentlich

größeren Einfluss als bei Metallen oder mineralischen Werkstoffen, wodurch die Alterungsproblematik hier deutlich an Bedeutung gewinnt. Zudem sind Diffusionsvorgänge von niedermolekularen Stoffen begünstigt. Eine umfassende Erforschung und Beschreibung der Kunststoffalterung gestaltet sich zudem sehr schwierig. Grund sind die sehr komplexen Alterungsvorgänge, welche experimentell nur schwer nachzubilden sind und sehr zeitaufwändige Versuche erfordern. [9]

Der Begriff Alterung ist in der DIN 50035 definiert als die „*Gesamtheit aller im Laufe der Zeit in einem Material irreversibel ablaufenden chemischen und physikalischen Vorgänge.*“ Durch diese Alterungsprozesse ändern sich die Eigenschaften der Kunststoffe über ihre Lebensdauer zum Teil beträchtlich. [10]

Die Alterungsursachen können in innere und äußere eingeteilt werden. Innere Alterungsursachen beruhen auf thermodynamisch instabilen Zuständen des Materials. Diese können unvollständige Polymerisation, Eigen- und Orientierungsspannungen, mangelnde Kristallisation, unzureichende Verträglichkeit bzw. Mischbarkeit zwischen Additiven und Polymermatrix, u.a. sein. Äußere Alterungserscheinungen werden durch chemische und physikalische Umgebungseinwirkungen auf das Material verursacht. Beispiele hierfür sind Energiezufuhr durch Wärme oder Strahlung, Temperaturänderungen, chemische Einflüsse, mechanische Beanspruchung, etc. Unter Bewitterung wirken mehrere alterungsfördernde Faktoren kombiniert auf das Material ein. Die genannten Alterungsursachen führen zu Alterungsvorgängen, welche meistens parallel ablaufen und in chemische und physikalische Alterungsvorgänge unterteilt werden. [10]

Chemische Alterungsvorgänge sind alle Prozesse, welche eine irreversible Veränderung der Molekülstruktur des Polymers zur Folge haben. Diese Vorgänge können entweder nur eine Komponente (bei Mehrphasensystemen) des Polymers, partiell die Bauteiloberfläche oder auch das ganze Bauteil betreffen. Typische chemische Alterungsvorgänge sind Oberflächenkorrosion, Autooxidation, Nachpolymerisation und Abbaureaktionen. Bedeutende Abbaureaktionen sind Kettenspaltung, Vernetzung oder Ringbildung, Abspaltung von Monomeren oder anderen niedermolekularen Stoffen sowie Bildung bzw. Veränderung funktioneller Gruppen. Für die meisten Abbaureaktionen sind Sonnenlicht und Sauerstoff relevante Faktoren. Änderungen des molekularen Aufbaus können sich auf die mechanischen Eigenschaften (Bruchdehnung, Schlagzähigkeit, Zug- und Biegefestigkeit) auswirken. Wird das kritische Molekulargewicht unterschritten, nehmen die mechanischen Eigenschaften drastisch ab. Auch die rheologischen Eigenschaften (z.B. Nullviskosität) werden durch Änderungen der Molmasse stark beeinflusst. [9]

Vorgänge, welche Veränderungen der physikalischen Struktur des Kunststoffs hervorrufen ohne den chemischen Aufbau zu beeinflussen, werden unter physikalische Alterungsvorgänge zusammengefasst. Diese können in Veränderungen des Gefüges bzw. molekularer Ordnungszustände oder Konzentrationsverhältnisse bei Mehrstoffsystemen resultieren und sind i.d.R. über die Schmelze reversibel. Beispiele für physikalische Alterungsvorgänge sind Nachkristallisation, Relaxation von Orientierungen, Spannungsabbau, Entmischung, Migration von Additiven (besonders bei Weichmachern) und Agglomeration. [9]

Aus den Alterungsvorgängen, welche auszugsweise in Abbildung 3 veranschaulicht sind, resultieren sichtbare und messbare Erscheinungen wie Riss- und Bruchbildung (lokale

Versprödung, Ermüdung), Quellung, Schwindung, Abscheidungen, Verfärbungen, veränderte Materialeigenschaften (mechanische, elektrische, rheologische, u.a.) sowie verändertes chemisches Verhalten. Eine Unterscheidung der Auswirkungen, physikalischer und chemischer Alterungsvorgänge ist nur schwer möglich, da diese zumeist gleichzeitig ablaufen und somit komplexe Alterungseffekte auftreten. [10, S. 100]

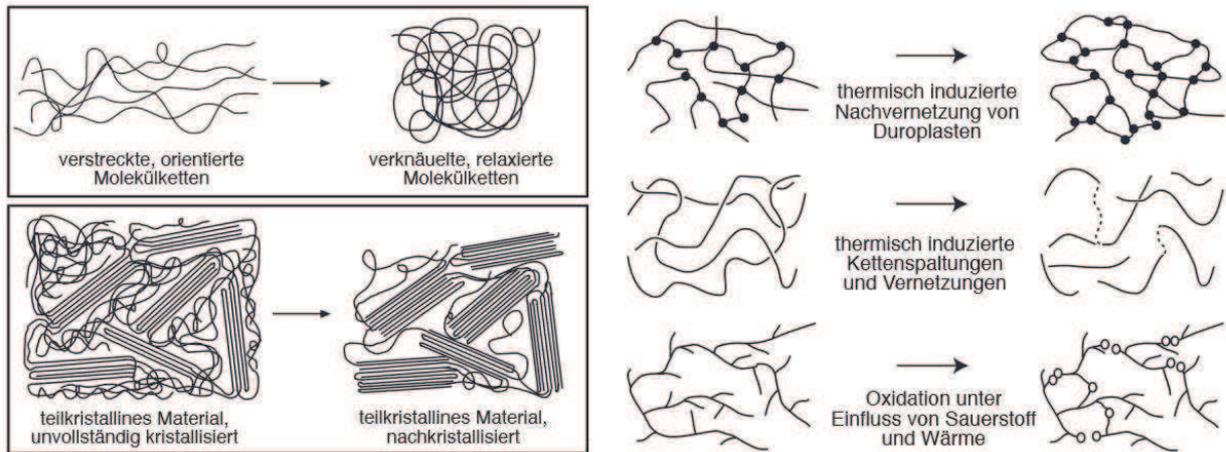


Abbildung 3: Effekte der Alterung [11]

links: Effekte physikalischer Alterungsvorgänge (oben: Relaxationsprozesse, unten: Nachkristallisation)

rechts: Chemische Alterungsvorgänge bzw. chemischer Abbau von Kunststoffen

Die Alterung von Kunststoffen wird sowohl von äußeren als auch inneren Faktoren (siehe Tabelle 4) beeinflusst.

Tabelle 4: Einflussfaktoren auf die Alterung von Kunststoffen [11]

Äußere Faktoren	Innere Faktoren
<ul style="list-style-type: none"> <li>• Temperatur</li> <li>• Sauerstoffkonzentration</li> <li>• Atmosphärische Belastung (UV-Licht, Luftfeuchtigkeit, Umgebungsmedien, Verunreinigungen)</li> <li>• Strahlung (Wellenlänge, Intensität, Strahlungsart)</li> <li>• Mechanische Belastung</li> <li>• Biologische Belastung</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Chemischer Aufbau (Molmasse und Molmassenverteilung, Feinstruktur der Kette)</li> <li>• Physikalische Struktur (Kristallinität, Morphologie, freies Volumen, Orientierungen, Eigenspannungen)</li> <li>• Sonstiges (Verunreinigungen, Stabilisatoren, Katalysatorreste)</li> </ul>

Neben der durch mechanische Belastung verursachten Alterung (z.B. Kriechen) haben im Hinblick auf Bewitterung im Freien die beiden chemische Alterungsvorgänge Photodegradation (Alterung durch energiereiche Strahlung) und thermooxidative Alterung einen besonderen Stellenwert.

Wird vom Polymer eine energiereiche Strahlung absorbiert, welche die Bindungsenergie übertrifft, können photochemische Reaktionen wie Kettenspaltung, Nachvernetzung und Bildung oder Änderung funktioneller Gruppen ausgelöst werden. Dabei ist neben der Energiedichte der Strahlung und der Bestrahlungsdauer, der Wellenlängenbereich, welcher vom Polymer absorbiert werden kann, entscheidend. Der Wellenlängenbereich in dem

photochemische Reaktionen initiiert werden können, ist stark von der chemischen Struktur bzw. Zusammensetzung des jeweiligen Polymers abhängig. Eine besondere Bedeutung hat die energiereiche, kurzwellige UV-Strahlung im Hinblick auf Bewitterung im Freien, da die absorbierte Energie die jeweilige Bindungsenergie leicht übertreffen und somit Reaktionen auslösen kann. Da bei einer photochemischen Reaktion i.d.R. reaktive Zwischenstufen gebildet werden, kann sie in Primär- (Bildung von Zwischenprodukten) und Sekundärvorgänge (Zwischenprodukte reagieren zu stabilen Endprodukten) unterteilt werden. [9]

Thermooxidativer Abbau wird durch die kombinierte Einwirkung von Wärme durch hohe Verarbeitungstemperaturen, zu lange Verweilzeiten, hohe mechanische Energie und Sauerstoff ausgelöst. Wärmeeinwirkung kann eine Bindungsspaltung in den Makromolekülen (R-H) auslösen und dadurch Radikale (R\*) erzeugen. In Folge werden durch Sauerstoffanlagerung ans Radikal Peroxidradikale (ROO\*) gebildet, welche ihren Radikalcharakter auf intakte Makromoleküle übertragen und als Hydroperoxide (ROOH) zurückbleiben können. Durch die nachfolgende Autooxidation (vgl. Glg. (1) und (2)) werden reaktive Abspaltungsprodukte gebildet, welche Kettenspaltungen und andere Prozesse auslösen. Durch Radikalkombination wird die Oxidationskette abgebrochen. [9]



Die biradikalische Struktur des Sauerstoffs ermöglicht durch Abstraktion von H-Atomen der Makromoleküle, eine direkte Reaktion mit deren Ketten, wodurch ebenso Radikale und Wasserstoffperoxidradikale entstehen (Glg. (3)) [9].



Diverse Verunreinigungen (z.B. Metallionen), Additive oder hohe Temperaturen können die Zerfallsgeschwindigkeit von Hydroperoxiden und Peroxiden katalytisch beschleunigen. Somit kann auch bei niedrigen Temperaturen eine thermooxidative Alterung ausgelöst werden. Als Folge der Oxidationsvorgänge kann beispielsweise eine Änderung der Viskosität, Schlagzähigkeit und Zugfestigkeit und Oberflächenrissbildung beobachtet werden. [9]

Um die Gebrauchstauglichkeit sowie Lebenszeit der Produkte zu verlängern, werden sog. Stabilisatoren (Verarbeitungs- und Alterungsschutzmittel) dem Kunststoff bei der Herstellung bzw. Verarbeitung zugegeben. Diese haben die Aufgabe in den Alterungsprozess hemmend einzugreifen und diesen somit zu verzögern. Dabei ist die Kenntnis von Produkteinsatzbereich, Umgebungseinflüssen, etc. entscheidend, da nur so eine geeignete Stabilisatorauswahl getroffen werden kann. Stabilisatoren werden in zwei Gruppen eingeteilt: Lichtschutzmittel und Antioxidantien. Lichtschutzmittel werden zur Verbesserung der Lichtbeständigkeit von Kunststoffprodukten, welche für natürliche Bewitterung im Freien tauglich sein sollen, eingesetzt. Dafür kommen zwei Typen zum Einsatz: UV-Absorber, welche die schädliche UV-Strahlung in Wärme transformieren, und Quencher (Löcher), welche die bereits vom Makromolekül absorbierte Photonenenergie in Wärme umwandeln und somit eine Kettenspaltung verhindern. Diese Lichtschutzmitteltypen schützen das Produkt über die gesamte Lebenszeit, da sie durch Lichteinwirkung nicht inaktiviert werden können. Hingegen werden Antioxidantien (Radikalfänger) mit der Zeit, je nach Belastung irreversibel aufgebraucht. Sie sollen während der Herstellung, Formgebung und Gebrauchszeit vor

oxidativen Abbau durch Sauerstoff und anderen Oxidationsmitteln schützen. Dabei wird die Kettenreaktion während des Autooxidationsprozesses abgebrochen und sehr stabile Radikale gebildet. [10]

Der oxidative Abbau, den das Material während seiner Lebenszeit von der Produktion über die Nutzungsphase bis hin zum Abfallstoff erfährt, ist i.d.R. bei dünnwandigen Produkten (z.B. Folien) mit großer Oberfläche sehr hoch. Wohingegen die Recyclingeigenschaften bezüglich Alterung für dickwandige Altkunststoffprodukte besser sind. [11]

### **Additivierung von Kunststoffen [8]**

Neben der oben aufgeführten Alterungsproblematik sind für die Recyclingeigenschaften von Kunststoffen außerdem die notwendigen Zusatzstoffe bzw. Additive, wie z.B.: Füll-, Farb-, Verstärkungsstoffe etc. von großer Bedeutung und müssen deshalb der Vollständigkeit halber an dieser Stelle aufgelistet werden. Für die Verbesserung der verarbeitungstechnischen Eigenschaften der Schmelze (z.B. Gleitfähigkeit, Trennverhalten, etc.) sowie zur Erzielung gewünschter Endprodukteigenschaften (Farbe, Festigkeit, Flammenschutz, etc.) existiert eine Vielzahl an Additiven. Eine Auswahl an Additiven mit kurzer Beschreibung ist nachfolgend aufgelistet:

*Gleit-, Antiblock-, Trennmittel:* Durch Zugabe von Additiven dieser Gruppe, wird die Verarbeitbarkeit der Kunststoffschmelze sichergestellt. Beispielsweise können damit die Gleit- und Hafteigenschaften zwischen Kunststoff und Werkzeugoberflächen eingestellt werden. Durch die Verwendung „innerer Gleitmittel“ wird die Viskosität der Schmelze erniedrigt, um höhere Durchsätze und geringere Verweilzeiten zu erzielen.

*Stabilisatoren (Antioxidantien, UV- und Wärmestabilisatoren):* Diese Additive werden eingesetzt um den oxidativen Abbau (siehe Alterung von Kunststoffen) der Makromoleküle, der durch die Bildung von freien Radikalen (z.B.: durch UV-Strahlung) ausgelöst wird, entgegenzuwirken. Als Antioxidantien dienen z.B. aromatische Amine, organische Phosphite und Lactone. Als UV-Stabilisatoren werden z.B. Benzophenone eingesetzt. Als Schutz vor thermisch induziertem Abbau (besonders wichtig für Polyvinylchlorid (PVC)) kommen Wärmestabilisatoren zum Einsatz.

*Antistatika:* Diese Additive sollen die statische Aufladung verhindern bzw. abschwächen. Sie werden entweder in den Kunststoff miteingemischt oder die Bauteiloberflächen werden nachträglich beschichtet (z.B. Aufdampfen von Aluminium). Zur Anwendung kommen hier Fettsäureester, Amine, Sulfonate oder leitfähige Zuschlagstoffe wie Ruß, Karbon- und Metallfasern.

*Flammschutzmittel:* Früher wurden als organische Flammschutzmittel oft halogenhaltige Verbindungen (z.B.: Cl-, Br-Verbindungen) eingesetzt, die mittlerweile durch halogenfreie und anorganische Verbindungen (z.B.: Al-Hydroxid, Zn-Borat) ersetzt werden.

*Farbmittel:* Diese dienen der Einfärbung von Kunststoffen. Eingesetzt werden anorganische oder organische Pulverpigmente. Titandioxid (Weißpigment) ist der wichtigste Vertreter.

*Weichmacher:* Sie werden eingesetzt um harte und spröde Kunststoffe, wie beispielsweise PVC, weich und elastisch zu machen. Weichmacher spielen bei Polyolefinen auf Grund der sehr seltenen Anwendung in Spezialfällen keine Rolle.

Haftvermittler: Diese Additive sorgen für eine bessere Benetzung zwischen schwer verträglichen Kunststoffen bei Kunststoffmischungen, –verbunden sowie für bessere Haftung zwischen Fasern und Kunststoffmatrix in Verbundwerkstoffen. Angewendet werden hier z.B. modifiziertes PE oder modifiziertes PP.

Füll- und Verstärkungsstoffe: Diese sind unlösliche Zusatzstoffe und werden in hohem Gehalt der Kunststoffmatrix zugegeben und beeinflussen u.a. die mechanischen, elektrischen oder Verarbeitungseigenschaften. Sie dienen häufig auch als Streckmittel, da sie den Anteil der i.d.R. teureren Kunststoffmatrix deutlich verringern. Vorwiegend werden dazu anorganische Füller in Pulverform eingearbeitet (z.B. Kreide, Kaolin, Talk). Durch die Einarbeitung von faserigen Verstärkungsstoffen (Länge: wenige Millimeter), wie Glas-, Kohle- oder Naturfasern, können mechanischen Eigenschaften (z.B. Festigkeit) gesteigert werden.

Antimikrobielle Mittel: Diese wirken vorbeugend gegen das Wachstum eines breiten Spektrums an Mikroorganismen, wie Bakterien, Schimmel und Pilzen. Verwendung finden hier beispielsweise Schwefel, Arsen, Quecksilber, Kupfer oder Silber.

Antibeslagmittel: Sie werden zur Vermeidung von Beschlagbildung an Kunststofffolien eingesetzt.

Die große Vielfalt an möglichen Zuschlagstoffen, die häufig in gelöster oder feindispersierter Form in der Kunststoffmatrix vorliegen, macht sowohl eine Identifizierung als auch eine Reinigung nur schwer möglich. Größere Verunreinigungen und Verstärkungsfasern können durch Druckfiltration der Kunststoffschmelze abgetrennt werden. Eine weitere sehr effektive Möglichkeit zur Reinigung ist das selektive Lösen des Kunststoffgemisches mit organischen Lösungsmitteln und anschließender Abfiltration fester Bestandteile. Dieses Verfahren ist aber sehr kostenintensiv und daher kaum im Einsatz.

Im nachstehenden Kapitel folgt eine allgemeine Einführung in die Abfall- und Recyclingthematik von Kunststoffen.

## 2.2 Abfallhierarchie

Das Abfallwirtschaftsgesetz 2002 (AWG) definiert die Abfalleigenschaft wie folgt:

*„§ 2. (1) Abfälle im Sinne dieses Bundesgesetzes sind bewegliche Sachen,*

*1. deren sich der Besitzer entledigen will oder entledigt hat oder*

*2. deren Sammlung, Lagerung, Beförderung und Behandlung als Abfall erforderlich ist, um die öffentlichen Interessen (§ 1 Abs. 3) nicht zu beeinträchtigen.“ [12]*

Die Richtlinie 2008/98/EG vom 19. November 2008 (am 12. Dezember 2008 in Kraft getreten) über Abfälle (Abfallrahmenrichtlinie) ist eine Richtlinie des Europäischen Parlaments und des Rates. Sie setzt den rechtlichen Rahmen für die Abfallgesetzgebung aller Mitgliedsstaaten und soll den gesamten Abfallzyklus von der Erzeugung bis zur Beseitigung überwachen, die Effizienz der Ressourcennutzung verbessern und dient daher dem Umwelt- und Gesundheitsschutz. Das übergeordnete Ziel dieser Abfallrahmenrichtlinie ist die Europäische Gesellschaft von einer Wegwerf- in eine Recyclinggesellschaft zu überführen. Um dieses Ziele erreichen zu können, ist es notwendig Maßnahmen für die Behandlung und den Umgang von Abfällen zu ergreifen, denen eine bestimmte Prioritätenfolge zugrunde liegt, die sogenannte

Abfallhierarchie, welche in Artikel 4 der Abfallrahmenrichtlinie klar festgelegt ist (vgl. Abbildung 4). [13]

Die Abfallhierarchie wurde als Grundsatz der Abfallwirtschaft im AWG national umgesetzt.



Abbildung 4: Fünfstufige Abfallhierarchie [14]

Im Nachfolgenden werden die einzelnen, nach Priorität gereihten Maßnahmen der Abfallhierarchie, in Bezug auf Kunststoffabfälle kurz beschrieben.

### **Abfallvermeidung**

Unter Abfallvermeidung versteht man Maßnahmen und Handlungsmöglichkeiten, die ergriffen werden, bevor ein Stoff, ein Material oder ein Erzeugnis zu Abfall geworden ist [15]. Dabei wird eine Unterscheidung in qualitativer und quantitativer Vermeidung getroffen. Dabei versteht die qualitative Vermeidung den Verzicht auf kurzlebige sowie problembehaftete Produkten, wohingegen die quantitative Abfallvermeidung eine Reduktion der noch verwertbaren bzw. zu entsorgenden Abfälle meint. [16]

Ein modernes Leben im technischen Umfeld (siehe Mobilität, Bekleidung, Medizin, Bauwesen, Handys, Computer, u.v.m.) ist nicht mehr ohne den Konsum von Kunststoffprodukten möglich. Daher kann vereinfacht gesagt werden, dass Abfallvermeidung im engen Sinn nur sehr schwer umgesetzt werden kann. Eine mögliche Abfallvermeidungsstrategie ist beispielsweise die Anwendung alternativer Verpackungsmaterialien oder -strategien anstatt von Mehrfachverpackungen. Auch sollten bereits in der Konstruktionsphase neuer Produkte EcoDesign-Prinzipien angewendet werden, um einen intelligenten Einsatz verfügbarer Ressourcen entlang der Wertschöpfungskette sicherstellen zu können.

### **Wiederverwendung**

Bei der Wiederverwendung werden aus Kunststoffabfällen unter dem Motto „wiederverwenden statt wegwerfen“ sogenannte ReUse-Produkte hergestellt. Dabei werden aller Art Abfälle, sowohl aus Kunststoffen, als auch anderen Materialien, zu neuwertigen Produkten, meist in Handarbeit, umgearbeitet. Beispielsweise können, wie in Abbildung 5 dargestellt, gebrauchte Kaffeeverpackungen zu einer neuwertigen Designerhandtasche weiterverarbeitet oder auch andere nützliche Gegenstände hergestellt werden. Ein wichtiger Bestandteil der Wiederverwendung stellt die Reinigung und Reparatur von gebrauchten Produkten dar.



Abbildung 5: Beispiele für die Wiederverwendung von Altkunststoffen [17]

Ein technisches Beispiel für die Wiederverwendung von gebrauchten Polyolefinen ist der Einsatz als Füllstoff in Polychloropren-Klebstoffen (Untersucht am TKKE in Kaunas, Litauen) [18]. Dafür wurde das gealterte, spröde PP vorab zerkleinert und dem Klebstoff beigemischt. Es konnte festgestellt werden, dass dadurch die Festigkeit der Klebverbindung, die Widerstandsfähigkeit gegenüber Atmosphäreneinflüssen und die technologischen Eigenschaften des Klebers verbessert werden konnten [18].

Der quantitative Beitrag von ReUse zur Erreichung der Mindestrecyclingquoten im Bereich der Kunststoffverpackungen ist bisher zu vernachlässigen, da nur geringe Mengen in die Wiederverwendung gelangen.

### Recycling

Unter dem Begriff Recycling versteht man jedes Verwertungsverfahren, durch welches Abfallmaterialien zu Erzeugnissen, Materialien oder Stoffen entweder für den ursprünglichen Zweck oder für andere Zwecke aufbereitet werden [15]. Im Jahr 2014 wurden in der EU (EU28+2) 29,7 % (7,7 Mio. t) von 25,8 Millionen Tonnen Post-Consumer Kunststoffabfällen einem Recyclingprozess zugeführt [2, 19].

Die stoffliche Verwertung von Kunststoffabfällen kann über zwei unterschiedliche, nachfolgend kurz erläuterte, Recyclingwege erfolgen (vgl. Abbildung 6). Zurzeit am Häufigsten eingesetzt wird das werkstoffliche Recycling, wobei die durch Altkunststoffe durch Umschmelzen wieder zu einem neuen Produkt verarbeitet werden. Dem gegenüber steht das rohstoffliche Recycling, wobei der Altkunststoff abgebaut d.h. in seine Monomere bzw. in niedermolekulare Kohlenwasserstoffe zerlegt wird und entweder wieder zu einem Polymer synthetisiert oder als Rohstoff für andere Produkte dienen kann. Welcher dieser Recyclingwege in Betracht kommt, hängt von der Art, Qualität und anfallenden Menge der Altkunststoffe ab. Neben den technologischen Einschränkungen sind außerdem ökologische und wirtschaftliche Aspekte zu berücksichtigen [20].

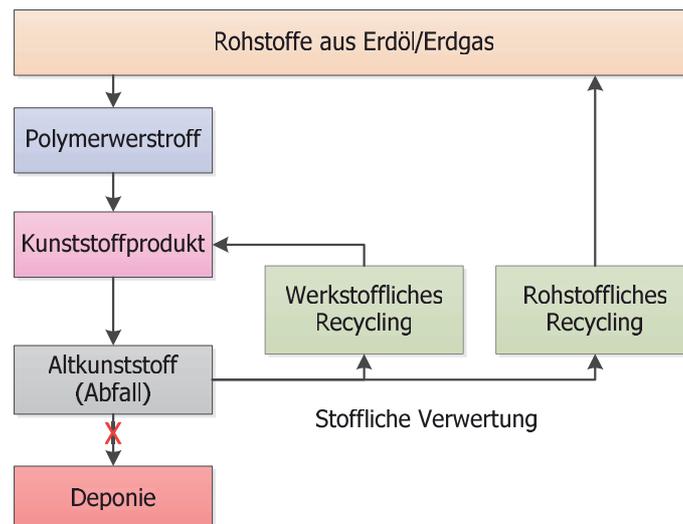


Abbildung 6: Stoffliche Verwertungsmöglichkeiten von Kunststoffabfällen [20]

### Sonstige Verwertung von Kunststoffabfällen - Verbrennung bzw. energetische Verwertung

Trotz der vergleichsweise hohen Recyclingraten (rd. 30 %) in Europa bleiben immer noch Restfraktionen übrig, welche sich aus diversen technischen, ökologischen oder ökonomischen Gründen nicht fürs stoffliche Recycling eignen. Dies sind z.B. enge Materialverbunde aus dem Automobil- oder Elektroniksektor, Material mit umweltbedenklichen Anhaftungen, u.a. Die in den Kunststoffen vorhandene Energie entspricht in etwa der von Erdöl (vgl. Tabelle 5). Diese heizwertreichen, aufbereiteten Abfallströme können daher alternativ als sogenannter Ersatz- oder Sekundärbrennstoff in Heizkraftwerken, Drehrohröfen in der Zementindustrie und Müllverbrennungsanlagen als Ersatzbrennstoff eingesetzt werden. Somit ist die saubere Verbrennung von Altkunststoffen zur Energierückgewinnung eine Ergänzung zum werkstofflichen und rohstofflichen Recycling. So wurden in der EU (EU28+2) im Jahr 2014 39,5 % der 25,8 Millionen Tonnen Post-Consumer Kunststoffabfällen einer energetischen Verwertung zugeführt [2]. Das zeigt, dass die energetische Verwertung einen großen Beitrag zur Schonung fossiler Rohstoffe leistet. Da bei der Verbrennung der stoffliche Materialcharakter verloren geht, kann die Verbrennung nicht als Recycling im Sinne der stofflichen Kreislaufführung betrachtet werden. Geeignete Verbrennungskonzepte für Altkunststoffe sind nachfolgen aufgelistet: [10]

- Mono-Verbrennung (ausschließlich für Altkunststoffe; noch nicht Stand der Technik)
- Mitverbrennungsanlagen (Mitverbrennung von mindestens einen weiteren Energieträger neben Kunststoff; Ziel ist die Energiegewinnung) z.B.: Zementöfen, Heizkraftwerke, Waste-to-Energy Anlagen
- Müllverbrennungsanlagen (Ziel ist die Volumenreduktion des Mülls)

Für Feststoffe werden Roste (Stab- oder Walzenroste), Drehrohre (Gleich- oder Gegenstrom-Luftführung), Wirbelschicht (stationäres oder zirkulierendes Wirbelbett) und Staubfeuerung eingesetzt. Bei der energetischen Verwertung ist ebenso wie bei den werkstofflichen und rohstofflichen Verwertungsverfahren eine Materialaufbereitung notwendig, die jedoch bei weitem nicht so aufwendig erfolgt. Weiters ist auch die energetische Verwertung, je nach

Anlagentechnik, an bestimmte Voraussetzungen gebunden (z.B.: Schwermetallgehalt, Korngröße, Förderfähigkeit, thermischen Nutzungsgrad, etc.). Für die Bewertung der energetischen Nutzung von Altkunststoffen sollte berücksichtigt werden, dass die größten Verbrauchssektoren von Erdöl mit ca. 85 % [2, 19] im Bereich Transport und Verkehr sowie Wärme- und Stromerzeugung liegen. Wobei für die Kunststoffproduktion lediglich ca. 5 % [2, 19] der jährlich geförderten Öl- und Gasmenge eingesetzt werden. [10]

*Tabelle 5: Heizwerte einiger Kunst- und Naturstoffe bezogen auf die Originalsubstanz [10, S. 617]*

<b>Material</b>	<b>Heizwert MJ/kg</b>
PP (unverstärkt)	44
PE (unverstärkt)	43,3
PS	40
PVC	18-26
Glasmattenverstärkte Thermoplaste	30
Duroplaste (allgemein)	20
Erd-/Heizöl	42
Steinkohle	29-30
Holz	15-17
Papier	13-15
Hausmüll	8,5

### **Beseitigung von Kunststoffabfällen durch Ablagerung auf Deponien**

Trotz der Tatsache, dass bereits in elf Ländern der EU28+2 (Deutschland, Österreich, Schweiz, Belgien, Dänemark, Luxemburg, Niederlande, Norwegen, Schweden, sowie Polen und Finnland seit 2016) ein Deponierungsverbot für Kunststoffabfälle umgesetzt werden konnte, wurden im Jahr 2014 innerhalb der EU (EU28+2) immer noch 30,8 % von den 25,8 Millionen Tonnen an Post-Consumer Kunststoffabfällen deponiert, das entspricht einer Menge von ca. 8,0 Millionen Tonnen. [2]

Diese Zahl zeigt, dass in vielen europäischen Ländern die Deponierung von Kunststoffabfällen immer noch Stand der Technik ist. Die Deponierung wird allerdings grundsätzlich als nicht nachhaltiges Behandlungsverfahren angesehen, da die Deponie als Bauwerk eine begrenzte Lebensdauer aufweist. Die langfristigen Risiken bestehen hier in der Kontamination von Böden und Grundwasser durch belastete Sickerwässer z.B. durch enthaltene Additive und Abbauprodukte der Kunststoffe, welche zu persistenten organischen Schadstoffen werden können. Ein weiteres Argument, welches gegen die Deponierung spricht, ist der Aspekt der Nachhaltigkeit. So können keine der für die Kunststoffproduktion eingesetzten Ressourcen zurückgewonnen werden, wodurch der Materialfluss linear und nicht zyklisch ist. Eine Maßnahme die Deponierung uninteressant werden zu lassen und einen Anreiz zu schaffen, Recyclingoptionen vermehrt wahrzunehmen, ist beispielsweise die Einhebung von angemessenen Deponiesteuern. [20]

## 3 Beschreibung der Abfallströme

In diesem Kapitel werden die vier ausgewählten Abfallströme für die beiden Recyclingoptionen (werkstofflich und rohstofflich) kurz beschrieben. Bei den ausgewählten Abfällen handelt es sich um:

1. Leichtstoffverpackungsabfälle,
2. gemischte Siedlungsabfälle,
3. Rejekte aus dem Altpapier- bzw. Altkartonrecycling und
4. Deponiegut aus dem Deponierückbau.

Die Auswahl und Probenahme dieser Abfallströme, ist dem Kapitel 5.2 „Auswahl der Abfallströme“ sowie Kapitel 5.4 „Beprobung“ zu entnehmen. Die Datenerhebung sowie die Bestimmung der allgemeinen Zusammensetzung und Abschätzung der Polyolefingehalte dieser Abfälle werden im Kapitel 6 „Ergebnisse und Diskussion“ beschrieben. Die abschließende Gegenüberstellung und Bewertung der vier Abfallströme erfolgt im Kapitel 6.1 „Bewertung der Abfallströme“.

### 3.1 Leichtstoffverpackungsabfälle

Unter Leichtstoffverpackungen (LVP) in der Kategorie für Haushaltsverpackungen werden in Österreich alle Verpackungen aus Kunst- und Verbundstoff, Holz, textile Faserstoffe und Keramik sowie Verpackungen auf biologischer Basis verstanden [21]. Wie dieser Abfallstrom nach der Sammlung, vor der Sortierung beispielsweise aussehen kann, ist in Abbildung 7 (links), gezeigt. Leichtstoffverpackungen werden im Großteil Österreichs getrennt gesammelt und i.d.R. in der „Gelben Tonne“ oder mittels „Gelben Sack“ zur Abholung bereitgestellt. In den Bundesländern Wien, Niederösterreich, Salzburg und Kärnten wird in mehreren Regionen lediglich die getrennte Sammlung von Hohlkörpern (z.B.: PET-Flaschen gegebenenfalls in Kombination mit Metallverpackungen) durchgeführt. Andere Leichtverpackungen werden in diesen Regionen über den Restmüll entsorgt. [4]

Der Lebenszyklus der Verpackungen aus Polyolefinen, die im LVP-Abfallstrom landen, dauert in den meisten Fällen nur wenige Wochen. Auch wenn der Herstellungsprozess der Verpackungsfolien, deren Lagerung bis zur Verarbeitung mit anschließender Gebrauchsphase bis zum Abfallstoff miteinbezogen wird, ist hier kaum ein längerer Lebenszyklus als ein Jahr zu erwarten. Die Exposition der Verpackungsfolien durch UV-Strahlung wird als vernachlässigbar angenommen, da diese Verpackungen in ihrem Lebenszyklus vorwiegend in geschlossenen Räumen verpackt, gelagert und transportiert werden. Als Konsequenz dieser Überlegungen kann angenommen werden, dass das Material keine relevanten Alterungsschäden, in Hinblick auf das werkstoffliche Recycling, aufweisen. [22]

Nach der ÖNORM S 2100 werden diesem Abfallstrom die Schlüsselnummern SN 91207 (Leichtfraktion aus der Verpackungssammlung), SN 57119 (Kunststofffolien), sowie SN 57118 (Kunststoffemballagen und –behältnisse) bzw. nach dem europäischen Abfallkatalog (EAK), dem Abfallcode 15 01 02 (Verpackungen aus Kunststoff) zugeordnet. [23, 24]

Dieser Stoffstrom ist nicht nur auf Grund seines sehr hohen Heizwertes als Ersatzbrennstoff (EBS) interessant, sondern wird auch immer wichtiger als Wertstoffquelle für das Recycling.

### 3. Beschreibung der Abfallströme

Grund hierfür sind die in Österreich in der Verpackungsverordnung vorgeschriebenen, hohen Recyclingquoten, welche jährlich erfüllt werden müssen (vgl. Tabelle 6). Zur Berechnung der Quote für Kunststoffe darf nur jenes Material eingerechnet werden, welches durch Recycling wieder zu Kunststoff wird und somit den Kreislauf schließt [21].

*Tabelle 6: Jährlich zu erreichende Recyclingquoten für die jeweiligen Packstoffe [21]*

Packstoff	Recyclingquote
Papier, Karton, Pappe und Wellpappe	60 %
Glas	60 %
Metalle	50 %
Getränkeverbundkartons	25 %
<b>Kunststoffe</b>	<b>22,5 %</b>
Holz	15 %
Sonstige Materialverbunde	15 %

Die Leichtstoffverpackungsabfälle (siehe Abb. 7 A) werden von Entsorgungsunternehmen zu Sortieranlagen für Leichtstoffverpackungen transportiert. In diesen wird der Abfallstrom in Zielfractionen (z.B.: PE, PP, usw.) sortiert und diese dann zu Ballen verpresst (siehe Abb. 7 B). Die Ballen werden in Recyclingbetrieben für Kunststoffe in weiterer Folge gereinigt und zerkleinert (siehe Abb. 7 C). Abschließend erfolgt die Endverarbeitung zu Regranulat (siehe Abb. 7 D).



*Abbildung 7: A: Leichtstoffverpackungsabfälle vor der Sortierung; B: Sortierte und verpresste Kunststoffe; C: Kunststoffflakes nach der Aufbereitung; D: Regranulate [25]*

In dieser Arbeit werden nur jene LVP-Abfälle betrachtet, welche aus den privaten Haushalten stammen. Jene Leichtstoffverpackungen, die im Gewerbe und Industrie anfallen, werden aus Kosten- und Zeitgründen hier nicht betrachtet.

## 3.2 Gemischter Siedlungsabfall (Restmüll)

Der Begriff Siedlungsabfall umfasst gemäß § 2 Abs. 4 Z 2 AWG 2002 jene Abfälle, welche aus privaten Haushalten stammen, sowie andere Abfälle, die in ihrer Beschaffenheit oder Zusammensetzung den Abfällen aus privaten Haushalten ähnlich sind, d.h., dass auch Abfälle aus Gewerbe und Industrie als Siedlungsabfälle gelten können. Beispiele für Siedlungsabfälle sind u.a. Textilien, Speiseöle und -fette, Sperrmüll, Straßenkehrsicht sowie Abfälle aus der getrennten Sammlung (Altstoffe etc.). Die beispielhafte Beschaffenheit dieses sehr heterogenen Abfallstroms ist der nachstehenden Abbildung 8 (links) zu entnehmen. [12]



*Abbildung 8: Links: Gemischte Siedlungsabfälle vor der Sortierung;*

*Rechts: Aus dem gemischten Siedlungsabfall erzeugter Ersatzbrennstoff (EBS)*

Unter Restmüll („gemischter Siedlungsabfall“) werden gemischte, nicht gefährliche Siedlungsabfälle verstanden, welche auf Grund von Verunreinigungen und mangelnder Sortenreinheit keiner der getrennt gesammelten Abfallfraktionen, wie z.B. Altpapier, Altmetall, Bioabfall, Leichtverpackungen, u.a. zugeordnet werden können. Daher gehören im eigentlichen Sinn nur wenige Abfälle, wie beispielsweise Babywindeln, Hygieneartikel, Zigarettenkippen, Stäube und Aschen, verschmutzte Tücher, Lappen und Filter in den Restmüll. Dennoch weist der real anfallende Restmüll eine variable Mischung aus einer Vielzahl an Abfällen (z.B. Hartkunststoffe, Folien) auf, die je nach Jahreszeit und Region stark variiert. Sortieranalysen (z.B. in der Steiermark) zeigen, dass im Restmüll bis zu 50 % verwertbare Fraktionen enthalten sind. Gemischter Siedlungsabfall fällt entweder in privaten Haushalten oder ähnlichen Einrichtungen (Hausmüll) oder in Gewerbebetrieben (hausmüllähnlicher Gewerbeabfall) an. [12]

Nach dem aktuellen Stand der Technik wird in Österreich der gemischte Siedlungsabfall außer bei der direkten Verbrennung in einer MVA, in mechanisch-biologischen Aufbereitungsanlagen (MBA) bzw. in sog. Splittinganlagen aufbereitet. Dabei wird auch eine kunststoff-, heizwertreiche Fraktion gebildet, welche als EBS (vgl. Abbildung 8 rechts) für die thermische Verwertung in der Mitverbrennung vorgesehen ist. Eine Rückgewinnung der Kunststoffe bzw. Polyolefine aus dieser Fraktion für einen Recyclingprozess, wird aktuell nicht durchgeführt. [26]

Die Dauer des Lebenszyklus der Produkte und Verpackungen aus Polyolefinen, die in diesem Abfallstrom landen, kann hier sehr unterschiedlich sein. Verpackungskunststoffe weisen auch hier i.d.R. nur einen sehr kurzen Lebenszyklus von wenige Wochen auf (vgl. LVP). Wohingegen Hartkunststoffe (z.B. Kinderspielzeug, Körbe, Eimer, Gießkannen, usw.) i.d.R. einen längeren

Lebenszyklus aufweisen. Die Exposition der Kunststoffe im Restmüll durch UV-Strahlung wird als vernachlässigbar angenommen, da diese in ihrem Lebenszyklus vorwiegend in geschlossenen Räumen verpackt, gelagert und transportiert werden. Als Konsequenz dieser Überlegungen kann angenommen werden, dass das Material keine relevanten Alterungsschäden, in Hinblick auf das werkstoffliche Recycling, aufweisen wird.

Restmüll wird nach ÖNORM S 2100 der Schlüsselnummer SN 91101 (Siedlungsabfälle und ähnliche Gewerbeabfälle) bzw. nach EAK dem Abfallcode 20 03 01 (gemischte Siedlungsabfälle) zugeordnet. [23, 24]

### **3.3 Rejekt**

Mit dem Begriff Rejekt, Spuckstoff oder Zopf-Rejekt, wird die Nichtpapier-Restfraktion bezeichnet, die im Altpapier- bzw. Altpappeaufbereitungsprozess mechanisch abgetrennt wird. Im österreichischen Abfallkatalog ist dieser Abfallstrom unter der Schlüsselnummer SN 18407 (Rückstände aus der Altpapierverarbeitung) bzw. im europäischen Abfallkatalog unter dem Abfallcode 03 03 07 (mechanisch abgetrennte Abfälle aus der Auflösung von Papier- und Pappabfällen) gelistet. [23, 24]

Zur Erklärung, wo dieser Abfallstrom im Altpapierrecyclingprozess vorwiegend anfällt, wird an dieser Stelle ein kurzer Einblick in den ersten Abschnitt des Altpapierrecyclings gegeben.

Aus der getrennten Sammlung von privaten Haushalten, Industrie und Gewerbe gelangt das Altpapier bzw. die Altpappe in die Sortieranlagen der Entsorgungsunternehmen. In diesen werden grobe Verunreinigungen, wie beispielsweise große Folien, händisch abgetrennt. Das sortierte Altpapier wird anschließend zu Ballen verpresst und an Papierfabriken geliefert. Dort werden die Papierballen gegeben falls geöffnet und anschließend dem Pulper (Stoffauflöser) zugeführt. Der Pulper ist wie eine Art überdimensionale Mixer konzipiert und zerfasert die im Wasser eingeweichten Altpapiere, während gleichzeitig Fremdstoffe (Rejekt) mechanisch abgetrennt werden. Der entstehende Faserbrei wird abgepumpt und weiteren Aufbereitungsschritten (Entfernung der Druckertinte, bleichen, Zusatz von Füllstoffen, usw.) unterzogen bis er letztendlich der Papiermaschine zugeführt wird. [8, S. 222–225]

Das abgetrennte Rejekt wird von den Papierfabriken an entsprechende Entsorgungsunternehmen zur Weiterverarbeitung abgegeben. Das Rejekt ist, wie am linken Foto in Abbildung 9 zu erkennen ist, sehr grob strukturiert und weist eine heterogene Zusammensetzung auf. In der Regel weist das Rejekt einen hohen Kunststoffanteil auf, der beispielsweise durch den Einsatz von Verpackungsfolien bei Zeitschriften entsteht, was diesen Abfallstrom u.A. zu einem sehr guten industriellen Ersatzbrennstoff macht. Bisher ist auch keine andere Verwendung bzw. Recyclinglösung als die thermische Verwertung bekannt. Der ebenfalls hohe Metallanteil (bis zu 50 M-% bei Zöpfen) im Rejekt, erklärt sich zum einen durch die für die Bindung der Altpapierballen eingesetzten Metalldrähte, zum Anderen durch die vorhandenen Metallteile (z.B. Metallringe in Blöcken) im Altpapier selbst. Beim Abziehen der Metalldrähte aus dem Pulper, verheddert sich ein Großteil der papierfremden Fraktionen an diesem und es entsteht der sogenannte Rejekt- oder Pulperzopf (vgl. Abbildung 9, rechts). [8]



*Abbildung 9: Links: separiertes Rejekt aus der Altpapieraufbereitung;  
Rechts: angelieferter Rejekt-Zopf beim Entsorger vor der Zerkleinerung*

Ebenso wie für die beiden vorangestellten Abfälle, ist auch für die im Rejekt enthaltenen Kunststoffe weder eine signifikante UV-Belastung noch ein langer Lebenszyklus zu erwarten. Grund hierfür ist, dass kurzlebige Folien den Hauptbestandteil der Kunststofffraktion des Rejekts ausmachen. Daher kann auch hier angenommen werden, dass das Material keine relevanten Alterungsschäden, in Hinblick auf das werkstoffliche Recycling, aufweisen wird.

### **3.4 Deponiegut aus dem Landfill Mining**

Unter dem Begriff Landfill Mining wird der geordnete Rückbau von Deponien zur Gewinnung von nutzbaren Roh-, Wert- und Energiestoffen verstanden. Dabei wird das Deponiematerial abgegraben, in mehreren Schritten aufbereitet und einer thermischen bzw. stofflichen Verwertung zugeführt. Deponien stellen ein mögliches Rohstofflager für die Zukunft dar, da in den früheren Jahren der Ablagerung noch keine umfangreiche Sortierung und Aufbereitung der Abfälle (z.B. Restmüll, Leichtverpackungen, usw.) stattfand. Heizwertreiche Leichtfraktionen, wie Kunststoffe, Papier und Pappe, sind hierbei ebenso von Interesse wie Metalle, Glas und andere mineralische Stoffe.

An dieser Stelle ist anzumerken, dass der Deponierückbau auch mit Risiken (z.B. Entweichen schädlicher Deponiegase beim Öffnen des Deponiekörpers) und beträchtlichen Kosten verbunden ist. Weitere Probleme, die sich ergeben können, sind beispielsweise eine lückenhafte und mangelnde Datenlage über den Zeitraum und das abgelagerte Material. Dennoch gibt es gute Gründe für den Deponierückbau. Diese sind neben einer gezielten Schadstoffentfrachtung des Deponieguts, der steigende Bedarf an Ersatzbrennstoffen als Ersatz fossiler Brennstoffe sowie steigende Metallpreise und Rohstoffverknappung, welche eine Erschließung dieser Lagerstätten in Zukunft wirtschaftlich rentabel machen könnten. Deponiegut kann sehr unterschiedlich beschaffen sein und hängt vom deponierten Abfallstoff selbst ab. Wie abgegrabenes Deponiematerial aussehen kann, ist der nachfolgenden Abbildung 10 zu entnehmen. [27]



*Abbildung 10: Beispielhafte Probe eines abgegrabenen Deponiegutes*

Das für diese Arbeit verwendete Deponiegut stammt aus dem am Lehrstuhl für AVAW durchgeführten Projekt „Landfill Mining Österreich“. Ziel des Projektes war die Abschätzung des in den ausgewählten Deponien lagernden theoretischen Ressourcenpotentials. Die im Projekt untersuchten Deponiematerialien, welche auch in dieser Arbeit verwendet wurden, stammten aus den zwei Massenabfalldeponien Hollabrunn und Allerheiligen.

Deponiegut 1 stammte aus der Massenabfalldeponie Hollabrunn, Abschnitt 3 (1991 bis 2003), in der die Abfälle (v.a. Hausabfälle, Siedlungsabfälle, Sperrmüll aber auch Bauschutt) unbehandelt abgelagert wurden.

Das Deponiegut 2 wurde von den Abschnitten 1 (1979 - 1984) und 2 (1985 - 1988) der Deponie Allerheiligen abgegraben. Die deponierten Abfälle setzten sich hierbei ebenfalls hauptsächlich aus Haus- und Siedlungsabfällen sowie Sperrmüll zusammen, wurden jedoch vor der Deponierung einer mechanisch-biologischen Behandlung zugeführt. Die Materialien wurden im Zuge dessen auf eine Korngröße von ca. 80 mm zerkleinert und anschließend einer Siebung zugeführt. Der Siebüberlauf wurde zusammen mit unbehandeltem Sperrmüll direkt auf die Deponie verbracht. Materialien kleiner 80 mm wurden einer biologischen Behandlung zugeführt und im Anschluss als MBA Kompost deponiert. [27]

Allein auf Grund der sehr langen Deponierungszeiten des Materials als auch die Belastung durch diverse chemische Substanzen, Deponiewasser und -gase über diese Zeiträume, kann hier von signifikanten Alterungsschäden der Kunststoffe ausgegangen werden.

Dem Deponiegut selbst sind keine Schlüsselnummern entsprechend der ÖNORM S 2100 sowie dem Europäischen Abfallkatalog mehr zugewiesen. Nach einer mechanischen Behandlung im Zuge eines Deponierückbaus könnte die kunststoffhaltige Fraktion der SN 57131 (aufbereitete Kunststoffabfälle, qualitätsgesichert) bzw. nach EAK dem Abfallcode 19 12 04 (Kunststoff und Gummi) zugeordnet werden. [23, 24]

## 4 Verfahrensüberblick

In diesem Kapitel wird ein Überblick über die beiden für diese Arbeit gewählten stofflichen Verwertungswege (werkstoffliches und rohstoffliches Recycling) gegeben. Die nachstehende Abbildung 11 zeigt schematisch die verfahrenstechnische Einteilung der notwendigen Behandlungsprozesse im werkstofflichen sowie rohstofflichen Recycling. Es werden für beide Verfahren folgende drei, aufeinanderfolgende Behandlungsprozesse unterschieden:

- 1.) Trockenmechanische Vorbehandlung mit dem Ziel der Störstoffentfrachtung und Aufkonzentrierung der Zielfraktion(en)
- 2.) Nassmechanische Vorbehandlung mit dem Ziel der Säuberung und weiteren Aufkonzentrierung der Zielfraktion(en)
- 3.) Veredelungsprozess mit dem Ziel der Produktherstellung (z.B. Regranulat)

Die vier ausgewählten Abfallströme werden im ersten Prozess einer trockenmechanischen Aufbereitung unterzogen. In diesem ersten Aufbereitungsprozess erfolgen eine Störstoffentfrachtung sowie eine erste Aufkonzentrierung der Zielfraktionen (PE, PP, Folien oder PO-Gemisch). Die dafür eingesetzten Aufbereitungslinien unterscheiden sich im werkstofflichen Recycling je nach eingesetztem Abfallstrom in ihrem Aufbau, wohingegen im rohstofflichen Recycling alle vier Inputströme dieselbe Anlage durchlaufen.

In einem zweiten, nachgeschalteten Prozess erfolgt eine nassmechanische Aufbereitung, der aus den vorherigen, trockenmechanischen Prozessen erhaltenen Konzentrate. Diese werden gereinigt und weiter aufkonzentriert. Die im werkstofflichen Recycling erhaltenen PE- und PP-Konzentrate durchlaufen nacheinander denselben Aufbereitungsprozess. Die Folienfraktion wird hingegen, so wie nach dem Stand der Technik in der Industrie üblich, keiner nassmechanischen Aufbereitung unterzogen, sondern wird direkt einer Extruderlinie zugeführt.

Im abschließenden Veredelungsprozess werden, mit dem Ziel der Produktherstellung, die getrennten und gereinigten Zwischenprodukte einer Extruderlinie im werkstofflichen bzw. einer Anlage zur thermochemischen Konversion im rohstofflichen Recycling zugeführt.

In dieser Arbeit wird eine exemplarische Extruderlinie angenommen, welche von allen Kunststoffen (PE und PP) gleichermaßen durchlaufen wird. In der Praxis wird i.d.R. für jeden Kunststofftyp eine eigene Extruderlinie eingesetzt. Gründe hierfür sind z.B. der hohe Aufwand beim Materialwechsel sowie die geringfügigen Anlagenunterschiede (z.B. Schneckenkonfiguration) je nach Material.

#### 4. Verfahrensüberblick

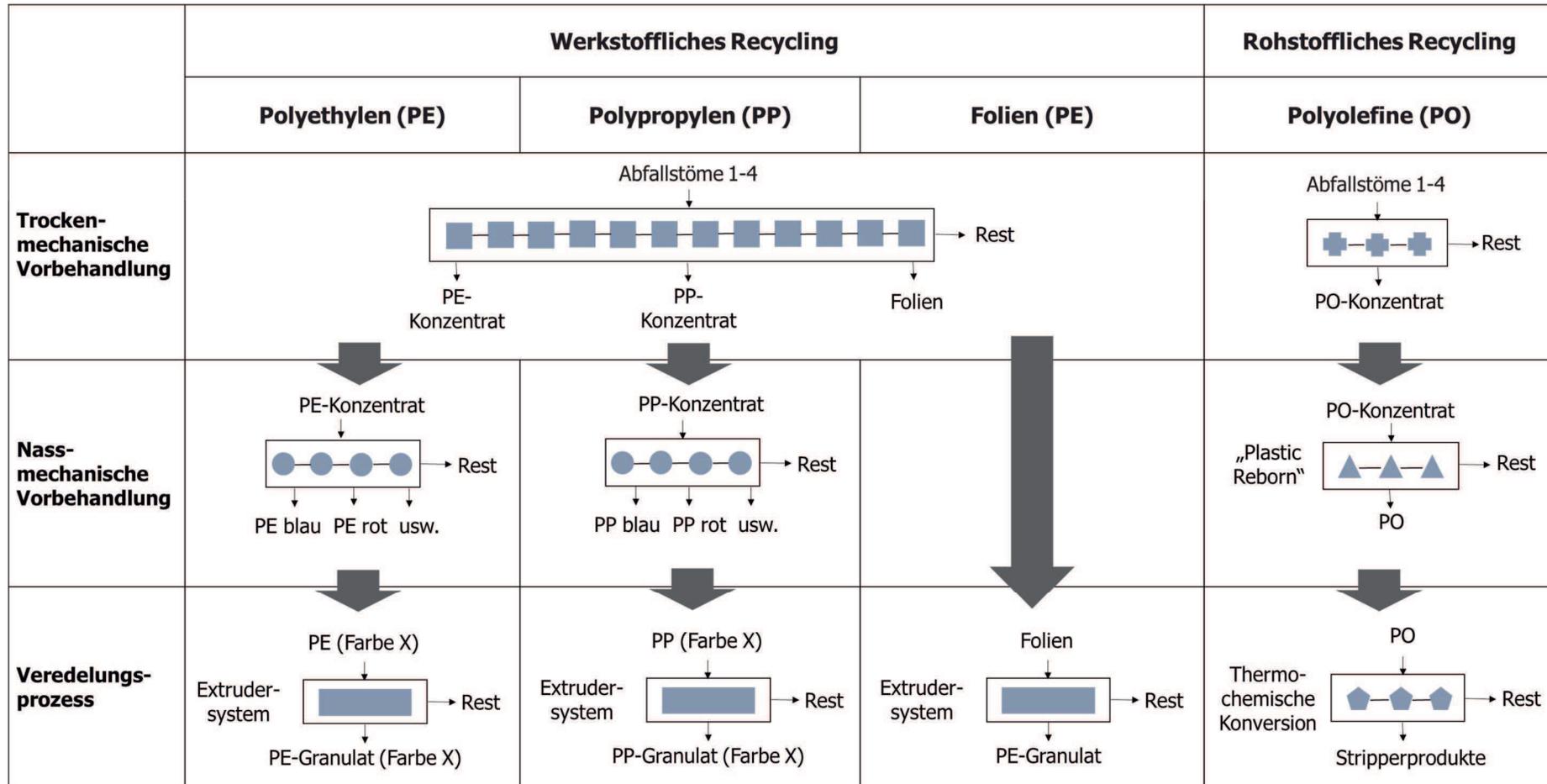


Abbildung 11: Einteilung der Behandlungsprozesse für das werkstoffliche und rohstoffliche Recycling

Die verwendeten Symbole stehen plakativ für die verwendeten Aggregate im Prozess und sollen zeigen, welche Behandlungsanlagen sich voneinander unterscheiden und welche gleich sind.

Abbildung 12 zeigt das Verfahrensschema mit der für die Problemstellung gewählten Systemgrenze für das werkstoffliche Recycling. Dabei erfolgt das Recycling in den bereits oben gezeigten, drei Prozessen. Der erste Prozess ist die trockenmechanische Aufbereitung des Abfallstroms (Input) zur Erzeugung eines störstoffbefreiten und aufkonzentrierten Stoffstroms (PE-, PP- bzw. Folienfraktion), welcher dann im zweiten Prozess nassmechanisch aufbereitet wird. Der gereinigte und weiteraufkonzentrierte Stoffstrom aus dem zweiten Prozess wird im letzten Schritt umgeschmolzen, endgereinigt und zu handlichem Schüttgut (Output) pelletiert. Das in diesem Prozess erzeugte Rezyklat wird in kunststoffverarbeitenden Betrieben für die Herstellung neuer Kunststoffprodukte eingesetzt und damit der Materialkreislauf geschlossen.

Das Verfahrensschema mit der für die Problemstellung gewählten Systemgrenze, für das rohstoffliche Recycling ist in Abbildung 13 dargestellt. Dieses Verfahren ist ebenfalls aus den drei Prozessen aufgebaut. Im ersten Prozessschritt wird der Abfallstrom (Input) trockenmechanisch aufbereitet, um grobe Verunreinigungen zu entfernen und das Material für den Folgeprozess aufzubereiten. Im zweiten Prozessschritt erfolgt eine nassmechanische Aufbereitung, die in einem Projekt am Lehrstuhl AVAW (RSA Plastic Reborn) speziell für die im dritten Prozessschritt folgende thermochemische Konversion entwickelt wurde. Der Strom Output 1 aus diesem Prozess besteht aus petrochemischen Zwischenprodukten, welche anschließend in der Raffinerie eingesetzt werden, um Ethylen und Propylen zu erzeugen. Diese Monomere sind in weiterer Folge der Rohstoff für die abschließende Polymerisation. So wird als Output 2 PP- und PE-Granulat als Reinprodukt erhalten, welches bei kunststoffverarbeitenden Betrieben wieder zu Produkten weiterverarbeitet wird. Somit schließt sich auch hier der Materialkreislauf.

Es wird in dieser Arbeit weder auf die Dimensionierung und Auslegung solcher Anlagen, noch auf die Herausforderungen und Rahmenbedingungen von Anlagensicherheit, Personal- und Wartungsbedarf, Arbeitsplatzsicherheit und ähnliche Aspekte, die bei der Konzeption solcher Anlagen zu betrachten sind, eingegangen.



Abbildung 12: Verfahrensschema mit Systemgrenze für das werkstoffliche Recycling

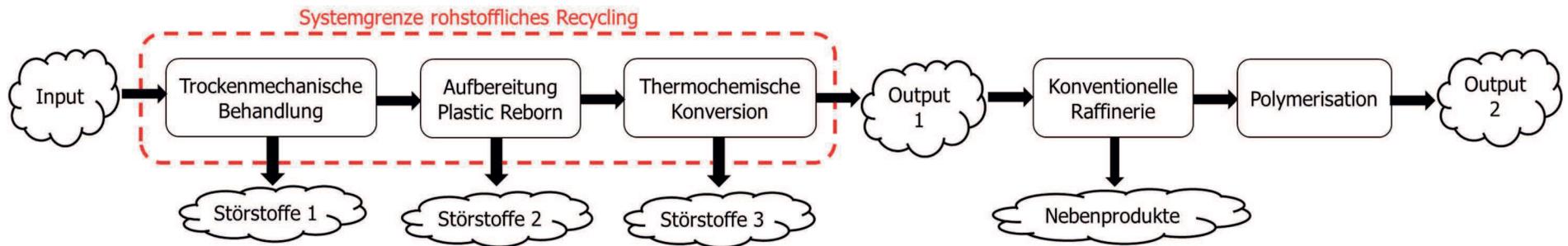


Abbildung 13: Verfahrensschema mit Systemgrenze für das rohstoffliche Recycling; in Anlehnung an [28]

### 4.1 Werkstoffliches Recycling

Ziel des werkstofflichen Recyclings ist die Wiederaufbereitung eines altkunststoffhaltigen Abfallstroms zu einem verarbeitungsfähigen, festen Granulat (Rezyklat) mit definiertem, qualitätsgesichertem Eigenschaftsprofil. Da diese Rezyklate i.d.R. zu kunststofftypischen Produkten weiterverarbeitet werden, ist das werkstoffliche Recycling nur dann sinnvoll, wenn eine Aufbereitung der Altkunststoffe zu sortenreinen, marktfähigen Granulaten überhaupt möglich ist und entsprechend große Mengen an Altkunststoffen im Abfallstrom enthalten sind. Kunststoffe werden häufig durch komplexe Additivierung und Verbundbauweisen auf ihre Anwendung hin „maßgeschneidert“. Daher liegt eine große Menge an Altkunststoffen in komplexer Form vor. Dieser Umstand kann eine komplizierte, mechanische Aufbereitungskette der altkunststoffhaltigen Abfälle bedeuten, bevor das Material letztendlich einer Extruderlinie zugeführt werden kann. Der Qualitätsverlust des Rezyklats gegenüber dem neuwertigen Kunststoff beruht zusätzlich auf den im Material verbleibenden Verunreinigungen, sowie der Schädigung der polymeren Grundstruktur durch Alterung. Um eine hochwertige Qualität des Materials gewährleisten zu können, ist es daher i.d.R. üblich, dass Regranulat mit Neuware zu verschneiden. Sortenreine, unverschmutzte Kunststoffe, wie sie beispielsweise als Produktionsabfälle oder Überproduktion anfallen, können hingegen ohne spezielle Aufbereitungsschritte zerkleinert und direkt im Verarbeitungsbetrieb nach einer Formmassenaufbereitung (z.B. im Knetzer) wieder dem Produktionsprozess zugeführt werden. [20]

#### 4.1.1 Mechanische Vorbehandlung

Ziel der mechanischen Aufbereitung im werkstofflichen Recyclingprozess ist, den polyolefinhaltigen Abfallstrom so aufzubereiten, dass ein sortenreines, sauberes, konfektioniertes und damit marktfähiges Zwischenprodukt (z.B. PE-Flakes) erzeugt wird, welches dann einer entsprechenden Extruderlinie zur Endbearbeitung zugeführt werden kann. Das bedeutet, dass der Abfallstrom, zerkleinert, gereinigt, getrennt, getrocknet und u.U. kompaktiert werden muss. [1] Da die Beschaffenheit und Zusammensetzung der vier ausgewählten Abfallströme sehr unterschiedlich ist, wird für jeden dieser Abfallströme eine eigens angepasste trockenmechanische Aufbereitungslinie angenommen. Meistens erfolgt zum Abschluss eine Kompaktierung des Materials mittels Ballenpresse. Die anschließende nassmechanische Aufbereitung ist für alle Inputströme gleich aufgebaut und hat das Ziel, die Zwischenprodukte zu reinigen und weiter aufzukonzentrieren. Die kompakten Ballen (ca. 1 m<sup>3</sup> und ca. 400 kg) [29] werden dann meistens mittels LKW zu einem auf das Material spezialisierten Recyclingbetrieb transportiert. Dort erfolgt dann die nassmechanische Aufbereitung mit anschließender Rezyklierung.

Im Nachfolgenden werden die notwendigen Aufbereitungslinien für die trockenmechanische Behandlung sowie die anschließende nassmechanische Linie im Detail dargestellt. Aufbau und Funktionsweise der für diesen Fall angenommenen Aggregate sind im Anhang I nachzulesen.

In dieser Arbeit wird auf Grund der für die Problemstellung gewählten Systemgrenzen auf alle Aufbereitungslinien, nicht aber auf die Themen Sammlung, Transport, eventuelle Kompak-

tierung, Lagerung oder Weiterverarbeitung der Input-, Output- sowie abgetrennte Störstoffmaterialien eingegangen.

### Trockenmechanische Aufbereitung

#### Trockenmechanische Aufbereitungslinie zur Vorbehandlung der Leichtstoffverpackungsabfälle

Aktuell erfahren die Leichtstoffverpackungen die größte Aufbereitungstiefe. Grund für diese stark differenzierte Sortierung sind die gemäß österreichischer Verpackungsverordnung zu erreichenden stofflichen Verwertungsquoten, insbesondere für Kunststoffe (22,5 %). [21] Für die Aufbereitung von LVP-Abfällen werden in der Abfallwirtschaft eigene Sortieranlagen eingesetzt. In diesen erfolgt die Trennung der Verpackungsabfälle nach einem trockenmechanischen Prinzip. [8] Eine vereinfachte, schematische LVP-Sortieranlage ist in Abbildung 14 dargestellt. Da diese Anlagen sehr komplex sind und eine Vielzahl an unterschiedlichen Aggregaten besitzen, die je nach Anlage und/oder LVP-Abfall variieren, wurde hier eine vereinfachte Darstellung, die die wesentlichsten Aggregate enthält, gewählt.

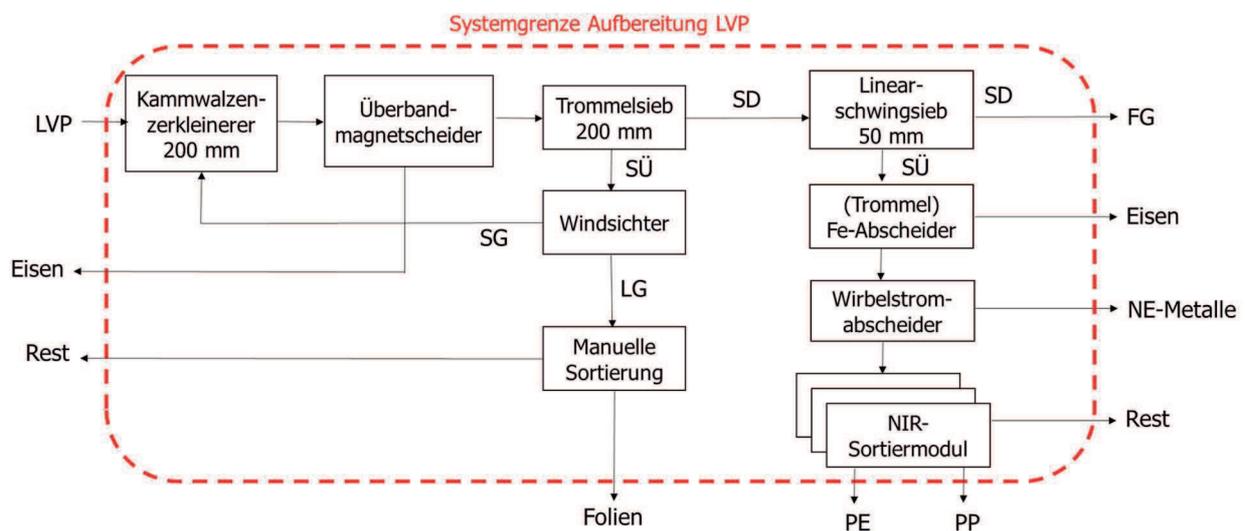


Abbildung 14: Vereinfachtes Fließschema einer LVP-Sortieranlage; in Anlehnung an [8]

Der LVP-Abfall wird mittels Bagger in die Anlage eingebracht. Im ersten Aggregat, dem Kammwalzenzerkleinerer werden die im Abfallstrom befindlichen Säcke aufgerissen und der Abfall auf eine Korngröße von etwa 200 mm zerkleinert bzw. aufgeschlossen. Anschließend erfolgt eine Eisenentfrachtung mit einem Überbandmagnetscheider zum Schutz der Anlage vor großen Eisenteilen. Durch mehrere Siebungen wird der Abfallstrom nachfolgend in verschiedene Korngrößenklassen aufgeteilt. Der Siebüberlauf (SÜ) des Trommelsiebes wird über einen Windsichter geleitet, der die Folienfraktion (Leichtgut LG) vom Abfallstrom abtrennt. Die Folien werden anschließend händisch nachsortiert, wobei Fremdstoffe entfernt werden. Das Schwergut (SG) aus dem Windsichter wird wieder der Zerkleinerung am Anlagenanfang zugeführt.

Der Siebdurchgang (SD) des Trommelsiebes wird über ein Linearschwingsieb zur Abtrennung der Feinfraktion (FG) (Korngröße kleiner 50 mm) geführt. Der Siebüberlauf wird anschließend mittels Trommel- und Wirbelstromscheider metallentfrachtet und nachfolgend über mehrere NIR-Sortiermodule in die entsprechenden Kunststoffströme wie z.B. PE, PP, PET, Verbundkartons aufgetrennt. Je nach Anlage, kann hier auch schon eine Sortierung der

Kunststoffe nach Farben erfolgen. Die verbleibenden Kunststoffe fallen hier als Mischkunststofffraktion an und werden als Restfraktion ausgeschleust. Abschließend durchlaufen die Wertstofffraktionen, zur Sicherstellung der Qualität (z.B.: Sortenreinheit), eine Kontrollstation in der i.d.R. eine manuelle Überprüfung erfolgt. [30]

Der Materialtransport innerhalb der LVP-Sortieranlage zwischen den einzelnen Aggregaten erfolgt i.d.R. mittels Förderbändern.

#### Trockenmechanische Aufbereitungslinie zur Behandlung gemischter Siedlungsabfälle

Siedlungsabfälle dürfen in Österreich seit 2004 nicht mehr unvorbehandelt deponiert werden. [27] Daher erfolgt die Behandlung von Siedlungsabfällen in eigens konzipierten Anlagen (z.B. MBA). Die primären Zielsetzungen der MBA sind die Massen- und Volumenreduktion der Abfälle, sowie die Wertstoff- und Schadstoffentfrachtung. [8] Im Gegensatz zur LVP-Sortierung werden die Kunststoffe in diesen Anlagen nicht in sortenreine, aufkonzentrierte Fraktionen überführt. Es wird vielmehr eine kunststoffreiche Fraktion gebildet, die auf Grund ihres hohen Heizwertes als Rohstoff für eine nachfolgende Sekundär- oder Ersatzbrennstoffproduktion (EBS) dient. Es ist derzeit nicht Stand der Technik diese heizwertreiche Fraktion weiter aufzubereiten, um einzelne Wertstofffraktionen, wie bestimmte Kunststofftypen für das Recycling zurückzugewinnen. [8] Da diese Überlegung aber theoretisch in dieser Arbeit verfolgt wird, wird der Vollständigkeit halber nachfolgend das Prinzip einer MBA schematisch erklärt. Es soll damit gezeigt werden, wie die kunststoffreiche Fraktion aus den Siedlungsabfällen gewonnen wird.

Das MBA-Konzept beinhaltet, wie in Abbildung 15 am Fließschema gezeigt ist, einen biologischen (linker Fluss) und einen mechanischen Aufbereitungsteil (rechter Fluss) zur Abfallbehandlung. Die Abfallsplittung erfolgt nach der Zerkleinerung der Abfälle (z.B. Kammwalzenzerkleinerer) durch ein darauffolgendes Trommelsieb. Die biogenen Bestandteile werden dabei als Siebdurchgang vom restlichen Abfallstrom abgetrennt und einer biologischen Behandlung zugeführt. Der Siebüberlauf gelangt hingegen in die mechanische Aufbereitung. In dieser werden Störstoffe, Wertstoffe sowie die heizwertreiche Fraktion (HWF) entfernt, die Korngröße reduziert und das Abfallgemisch homogenisiert. Die Verfahrensschritte bzw. Aggregate können dabei je nach Einsatzmaterial und Anlagenkonzept variieren. Die kunststoffreiche Leichtfraktion (LG) wird mittels Sichtung aus dem metallentfrachteten Abfallstrom abgetrennt. Bei modernen Anlagen kommen bereits NIR-Detektionssysteme in Kombination mit Separationsaggregaten (Ausblasvorrichtungen) zum Einsatz. Dies führt zu einer Qualitätsverbesserung der heizwertreichen Fraktion. Abschließend wird dieses Material in einer Ballenpresse verdichtet und einer weiteren trockenmechanischen Aufbereitung zur EBS-Produktion zugeführt. [31, S. 263–267]

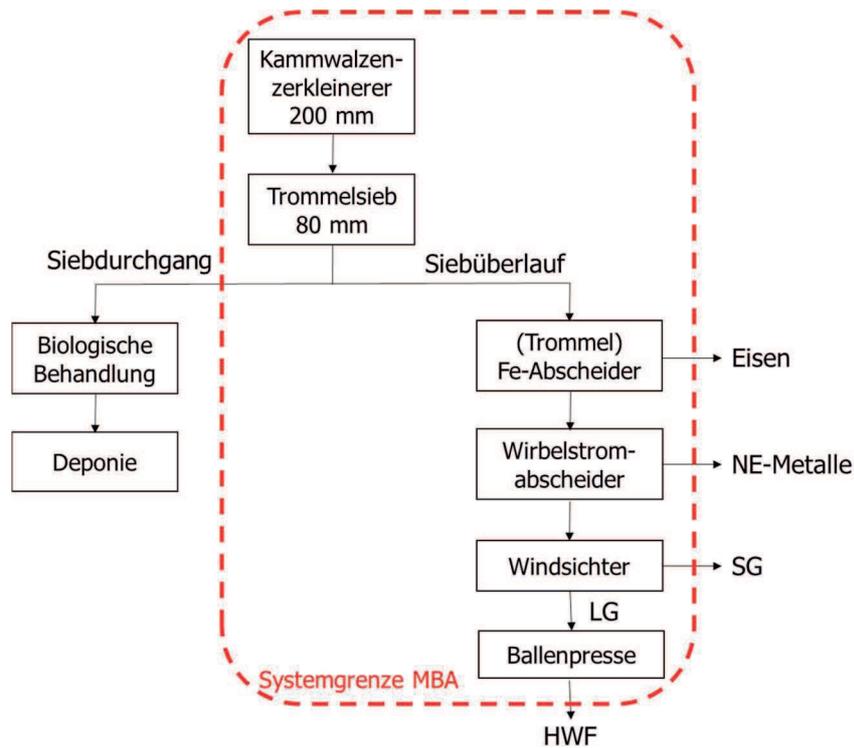


Abbildung 15: Vereinfachtes Fließschema einer MBA; in Anlehnung an [26, S. 265–266]

Es wird für diesen Fall angenommen, dass die Ballen aus heizwertreichem Material mittels LKW zu einem spezialisierten Aufbereiter transportiert werden müssen, da davon ausgegangen wird, dass die Aufbereitung nicht am MBA-Standort erfolgt. Bei der in Abbildung 16 gezeigten trockenmechanischen Aufbereitungslinie für die EBS-Fraktion handelt es sich um eine vereinfachte, theoretische Anlage.

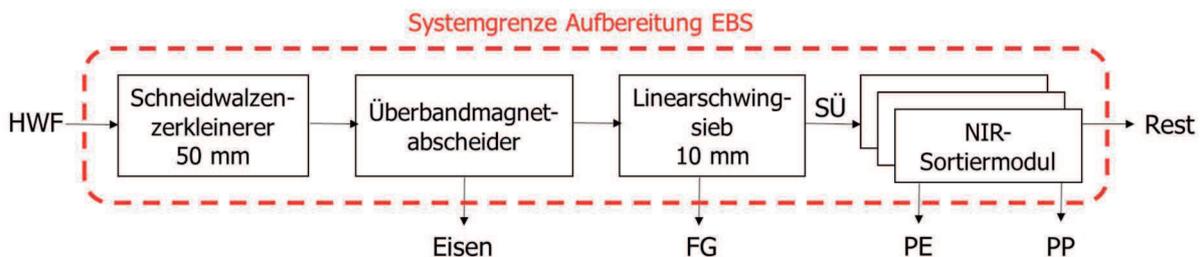


Abbildung 16: Vereinfachtes Fließschema einer trockenmechanischen Aufbereitungslinie für die heizwertreiche Fraktion

Die EBS-Ballen werden mittels Gabelstapler dem Aufgabetrichter des Zerkleinerungsaggregates, einem Schneidwalzenzerkleinerer, zugeführt und auf eine Korngröße von 50 mm zerkleinert. Zur Abtrennung der Haltedrähte der Ballen wird ein Überbandmagnetabscheider eingesetzt. Anschließend wird das Feingut (FG), kleiner 10 mm, mittels Linearschwing-sieb abgetrennt und der Siebüberlauf einer NIR-Sortierlinie übergeben. Die NIR-Module haben dabei die Aufgabe, die PO-Flakes (PE, PP) vom restlichen Materialstrom abzutrennen und so einen aufkonzentrierten PE- und PP-Strom zu erzeugen. Nach den NIR-Sortierlinien ist eine manuelle Nachsortierung zur Sicherstellung der Qualität nachgeschaltet.

An dieser Stelle muss erwähnt werden, dass keine 100 %-ige Trennung möglich ist und sich in der Restfraktion immer noch PO-Flakes befinden können. Ebenso werden im Feingut zu vernachlässigende PO-Anteile verbleiben.

Der Stoffstromtransport in der LVP-Sortieranlage zwischen den einzelnen Aggregaten erfolgt i.d.R. mittels Förderbändern.

##### Trockenmechanische Aufbereitungslinie zur Behandlung der Rejekte

Die Rejekte aus der Altpapieraufbereitung sind auf Grund ihres sehr hohen Kunststoff- und Papier-, Pappe-, Kartongehaltes (PPK) ein Abfallstoff mit hohem Heizwert. Daher sind Rejekte nach dem Stand der Technik als industrieller Ersatzbrennstoff (EBS) für eine thermische Verwertung vorgesehen. [8] Diese werden jedoch in der Betrachtung dieser Arbeit so aufbereitet, dass die Polyolefine als Wertstoff zurückgewonnen werden können. Auf Grund der relativ störstoffarmen Zusammensetzung der Rejekte fällt die trockenmechanische Aufbereitungslinie für diesen Abfallstrom nicht so aufwendig aus, wie bei den anderen Abfallströmen. Wie eine derartige Aufbereitungslinie für die trockenmechanische Aufbereitung von Rejekten, theoretisch aufgebaut sein könnte, ist der nachstehenden Abbildung 17 zu entnehmen.

Für diese Anlage muss die Annahme getroffen werden, dass das Rejekt trocken der Aufbereitungslinie zugeführt wird. Ansonsten müsste das Material vorgetrocknet werden, um negative Einflüsse durch die eingebrachte Feuchtigkeit (z.B. Agglomerationsneigung) auf die Trennergebnisse zu vermeiden.

Im ersten Aufbereitungsschritt erfolgt eine Zerkleinerung mittels Schneidwalzenzerkleinerer auf eine Korngröße von 50 mm. Darauf folgt die Abtrennung des Feinanteils (FG) z.B. mit einem Trommelsieb. Der Siebüberlauf (SÜ) wird einer Eisenteilabscheidung durch einen Überbandmagneten unterzogen. Zur Abtrennung des Schwergutes (SG) wird anschließend ein Zickzack-Windsichter eingesetzt. Das Leichtgut (LG), welches vorwiegend aus Kunststofffolien und PPK besteht, wird im letzten Schritt über mehrere NIR-Sortiermodule geführt, wobei als Output die gewünschte PO-Fraktion erhalten wird. Die verbleibenden Kunststoffe (Mischkunststofffraktion - MKF), sowie die PPK-Fraktion werden als Restfraktion ausgeschleust.

Der Stoffstromtransport in der Aufbereitungsanlage für Rejekte zwischen den einzelnen Aggregaten erfolgt i.d.R. mittels Förderbändern.

##### Trockenmechanische Aufbereitungslinie zur Behandlung des Deponiegutes

Deponien stellen in der Zukunft mögliche Rohstofflager dar, da in früheren Jahren der Ablagerung noch keine umfangreiche Sortierung und Aufbereitung der Abfälle (z.B. Restmüll, Leichtverpackungen, usw.) stattfand [27]. Auf Grund dessen handelt es sich bei dem abgegrabenen Deponiegut in der Regel um ein sehr heterogenes, stark verunreinigtes, grobstückiges Material. Um die Kunststofffraktion aus diesem Gemisch abzutrennen, müsste ein entsprechend großer Aufwand betrieben werden. Da es nach dem aktuellen Stand der Technik noch keine Anlagen in solch einem Maßstab gibt, wird für diesen Fall eine vereinfachte, theoretische, trockenmechanische Aufbereitungsanlage, wie sie in Abbildung 18 dargestellt ist, angenommen. Die Anlage wird im nachfolgenden kurz beschrieben.

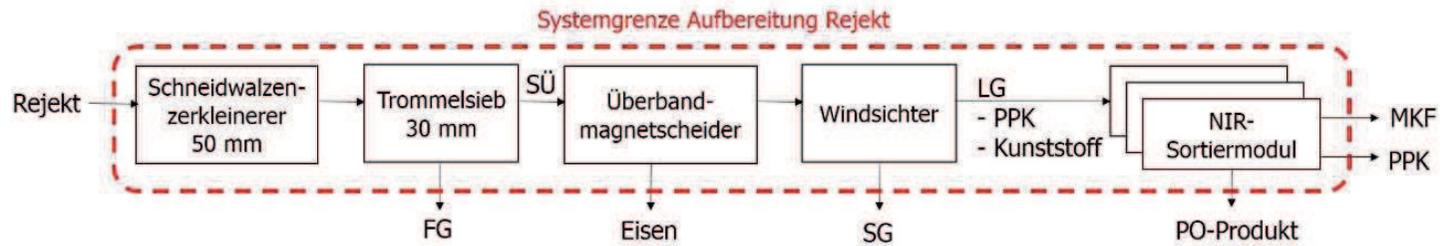


Abbildung 17: Fließschema einer theoretischen, trockenmechanischen Aufbereitungsanlage für Rejekt

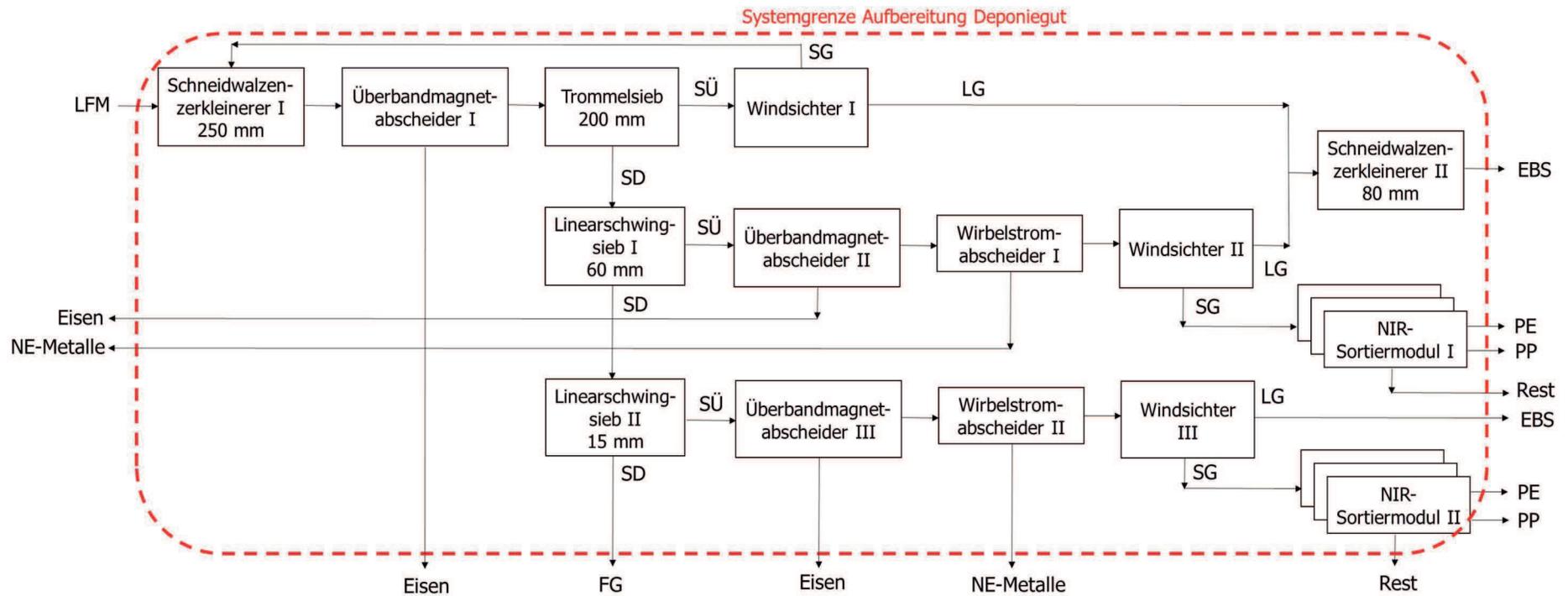


Abbildung 18: Fließschema einer theoretischen, trockenmechanischen Aufbereitungsanlage für Deponiegut

Es wird angenommen, dass das Deponiegut (Landfill Mining Material – LFM) in nicht kompaktierter, trockener Form mittels Bagger dem Aufgabebunker des Schneidwellenzerkleinerers zugeführt und auf 250 mm zerkleinert wird. Zur ersten Abtrennung der Eisenfraktion zum Anlagenschutz wird ein Überbandmagnet eingesetzt. Das Deponiegut gelangt anschließend in ein Trommelsieb mit einer Maschenweite von 200 mm. Der Siebüberlauf (SÜ) wird dem Windsichter I (z.B. Zickzack-Sichter) zur Abtrennung der Leichtfraktion (LG) übergeben. Diese Leichtfraktion wird bereits einen hohen Anteil an Kunststofffolien aufweisen und kann daher einer EBS-Fraktion zugeordnet werden. Das Schwergut (SG) aus dem Windsichter wird wieder dem Zerkleinerungsaggregat am Beginn der Anlage zugeführt.

Der Siebdurchgang (SD) des Trommelsiebs wird über ein Linearschwingsieb (Nr. I) mit einer Maschenweite von 60 mm geführt. Der Siebüberlauf (SÜ) wird mittels Überbandmagnetscheider (Nr. II) sowie Wirbelstromscheider (Nr. I) metallentfrachtet und anschließend im Windsichter II in eine Leicht- (LG) sowie Schwergutfraktion (SG) aufgetrennt. Die folienreiche Leichtgutfraktion wird mit jener aus dem ersten Windsichter zusammengeführt und in einem Schneidwalzenzerkleinerer (Nr. II) auf eine Korngröße von 80 mm zerkleinert. Das Schwergut (SG) aus dem Windsichter II, welches vermutlich einen relevanten Hartkunststoffanteil aufweist, wird durch ein anschließendes, mehrstufiges NIR-Sortiermodul (Nr. I) in die Polyolefine PE und PP sowie einer Restfraktion getrennt.

Der Siebdurchgang (SD) des Linearschwingsiebs Nr. I wird auf ein weiteres Linearschwingsieb (Nr. II) mit einer Maschenweite von 15 mm aufgebracht. Das abgesiebte Feingut (FG) wird aus dem Prozess ausgeschleust. Das Material aus dem Siebüberlauf (SÜ) wird einer Metallentfrachtung mittels Überbandmagnet- und Wirbelstromscheider unterzogen und dem darauffolgenden Windsichter (Nr. III) zugeführt. Das anfallende folienreiche Leichtgut (LG) wird der EBS-Fraktion zugeordnet. Das Windsichterschwergut (Nr. III) wird durch ein anschließendes, mehrstufiges NIR-Sortiermodul (Nr. II) in PE und PP, sowie einer Restfraktion getrennt.

Die drei, in dieser theoretischen Anlage entstandenen Fraktionen (PE-, PP-Flakes und kunststofffolienreiche EBS-Fraktionen) werden jeweils zusammengeführt und zu Ballen verpresst.

Auf Grund des sehr hohen Verschmutzungsgrades und Bildung von Agglomeraten kann angenommen werden, dass in den abgeschiedenen Restfraktionen noch Polyolefine enthalten sein werden. Da sich hier auf Grund der zu erwartenden, geringen Gehalte und zu hohem wirtschaftlichem Aufwand keine weitere Abtrennung rentieren würde, wird in dieser Arbeit auf eine weitere Aufbereitung dieser Fraktion verzichtet.

Der Stoffstromtransport in der Aufbereitungsanlage für Deponiegut zwischen den einzelnen Aggregaten erfolgt i.d.R. mittels Förderbändern.

#### **Nassmechanische Aufbereitung**

Die Abfälle, welche in den zuvor gezeigten Sortieranlagen bei den Entsorgungsunternehmen vorsortiert bzw. trockenmechanisch aufbereitet und i.d.R. zu Ballen verpresst wurden, werden z.B. mittels LKW-Transport an die jeweilig spezialisierten Kunststoffrecycler geliefert. In diesen Anlagen erfolgt in einem nassmechanischen Aufbereitungsprozess die Reinigung und weitere Aufkonzentrierung der Inputmaterialien (PE bzw. PP) zu einem für das Extrudersystem

verarbeitbarem Material. Die nassmechanischen Aufbereitungslinien der Kunststoffrecycler sind häufig ebenso komplex aufgebaut wie jene Sortier- und Aufbereitungslinien der Entsorgungsunternehmen. Die Linien unterscheiden sich je nach Materialinput (z.B. Herkunft, Kunststoffsorte, Form, Zielprodukt, usw.) in ihrem Aufbau, den eingesetzten Aggregaten sowie deren Anordnung voneinander. [32] Für diese wissenschaftliche Abhandlung wurde jedoch ein vereinfachter nassmechanischer Anlagenaufbau, der die wesentlichsten Aggregate enthält, angenommen. Da in dieser Arbeit nur die Stoffströme PE und PP als Anlageninput betrachtet werden, unterscheiden sich die beiden Aufbereitungslinien für diese Betrachtung nicht. In der nachfolgenden Abbildung 19 ist der nassmechanischen Aufbereitungsprozesse für beide Fraktionen als Anlagenfließbild am Beispiel der PE-Aufbereitung dargestellt und wird anschließend kurz erklärt. Aufbau und Funktionsweise der für diesen Fall angenommenen Aggregate, sind im Anhang nachzulesen.

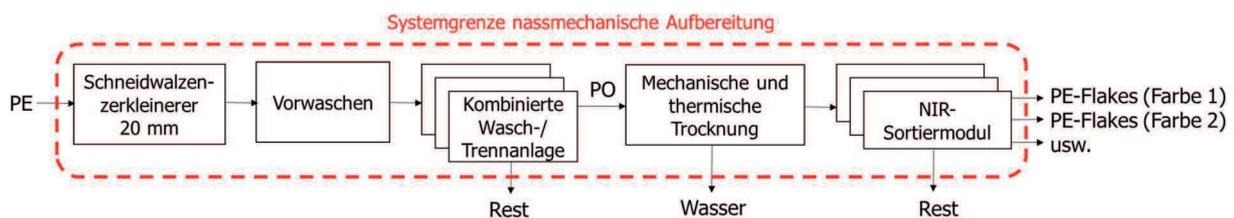


Abbildung 19: Fließschema einer theoretischen, nassmechanischen Aufbereitungslinie für PE-Hartkunststoff als Inputmaterial; in Anlehnung an [1, S. 89]

Das zu Ballen verpresste Material (d.h. aufkonzentrierte PE oder PP) wird mittels Gabelstapler in ein Zerkleinerungsaggregat (Schneidwalzenzerkleinerer) zu Beginn der Anlage aufgegeben und auf eine Korngröße von ca. 20 mm zerkleinert. [20] Eine gleichmäßige Korngrößenverteilung ist eine Voraussetzung für ein gutes Trennergebnis der Nachfolgeprozesse. Um dem Verschleiß des Zerkleinerungsaggregates vorzubeugen, kann ein Überbandmagnetscheider der Zerkleinerung vorgeschaltet werden. Darauf folgt i.d.R. die Reinigungs- und Trennaggregate. Ziel dieser Anlagenstufe ist die Abreinigung von oberflächlichen Anhaftungen und Verschmutzungen sowie die Abtrennung von unerwünschten Kunst-, Verbund- und Störstoffen aus dem Produktstrom. Für diese Aufgabe gibt es eine Vielzahl an unterschiedlichen Aggregaten, Bauweisen und Schaltungsvarianten. Im Allgemeinen lässt sich dieser Verfahrensteil in folgende drei Schritte einteilen:

1. Anlösen der Verunreinigungen,
2. Trennen vom Kunststofflake und
3. Abscheiden der Verunreinigung.

Diese Schritte müssen dabei nicht in einem Aggregat erfolgen. Wird das Material z.B. in einem Nassverfahren zerkleinert, so erfolgt das Einweichen bereits an dieser Stelle. In dieser theoretischen Anlage wird jedoch trocken zerkleinert und ein Vorwaschprozess (z.B. Vorwaschbehälter) eingesetzt, um die Anhaftungen anzulösen. Zur Abreinigung wird ein Frikationswäscher eingesetzt. Anschließend wird das vorgereinigte Material der Sortier-einrichtung zugeführt. Zur Sortierung von Kunststoffen werden vorwiegend Dichtentrennverfahren angewendet. Erfolgt die Trennung unter Schwerkrafteinfluss, handelt es sich um Schwimm-Sink-Sortierer, erfolgt diese im Zentrifugalfeld, werden Zentrifugalkraftscheider (z.B. Sortierzentrifuge oder Hydrozyklon) verwendet. Diese Aggregate werden meistens kombiniert

in Kaskaden geschaltet. Zur Abtrennung der Polyolefin- (Leicht- bzw. Schwimmgut) von der Restfraktion (Schwer- bzw. Sinkgut) ist jedoch eine mehrstufige Schwimm-Sink-Sortierung in Wasser ausreichend, da deren Dichte weniger als  $1 \text{ g/cm}^3$  beträgt. Mit diesem Sortierverfahren kann eine Polyolefinfraktion mit einer Reinheit von ca. 99 % erreicht werden. [32]

Die Trocknung des im Überlauf aus der Sortierstufe anfallenden Leichtgutes kann sowohl mittels mechanischen z.B. Zentrifugieren als auch mit thermischen Verfahren z.B. Warmlufttrockner erfolgen. Da in dieser konkreten Anlage eine Extruderlinie folgt, welche Materialien mit Restfeuchten bis zu 10 % problemlos verarbeiten kann, ist hier ein Zentrifugaltrockner (Restfeuchte max. 5 % [32]) ausreichend. [20]

Für die sauberen, getrennten und getrockneten, aber noch bunten PO-Flakes aus Hartkunststoff folgt abschließend ein NIR-Sortiermodul mit nachfolgender Farbzeilenkamera als Sortierungsstation. In diesem Prozessschritt wird der PO-Strom in mehreren Stufen in PE- und PP-Flakes sortiert. Jene Kunststoffe, die keine Polyolefine sind (z.B. geschäumtes PS), werden dabei abgetrennt. Die sortierten PE- und PP-Flakes können anschließend zur Wertsteigerung mit einer Farbzeilenkamera nach Farben (z.B. rot, blau, natur, grün, usw.) sortiert werden. Somit kann eine erweiterte Farbproduktpalette dem Kunden angeboten werden. [8]

Die so aus den vier Abfallströmen mittels trocken- und nassmechanischer Aufbereitung erhaltenen, in Farben sortierten Polyolefinfraktionen werden anschließend zur Entkopplung der Verfahrensschritte in Silos gelagert und meistens direkt beim Recycler einem Extruder-system zugeführt. [8]

Auf Grund der verfahrenstechnischen Trennung in Separations- und Umformungsprozess, wird im nachfolgenden Abschnitt der detaillierte Aufbau eines Extrudersystems getrennt von der Aufbereitung betrachtet.

#### **4.1.2 Rezyklatherstellung mittels Extruderlinie**

Die Produkte der Aufbereitungslinien sind i.d.R. körnige Schüttgüter (Flakes, Mahlgut, Schnitzel). Um hochwertige Rezyklate herstellen zu können, werden sogenannte Extruder- bzw. Compoundiersysteme eingesetzt. Dabei werden die Flakes homogenisiert, verdichtet, entgast, endgereinigt, additiviert (z.B. mit Stabilisatoren, Füll-, Farbstoffen, Verarbeitungshilfsmitteln u.v.m.) und abschließend granuliert, um ein gut dosier- und förderbares Granulat als Produkt zu erhalten. [1]

Um die passenden Anlagen für die PE- und PP-Rezyklierung auszuwählen, wurde bei einem Treffen mit Herrn Michael Aigner, von der Firma EREMA Engineering Recycling Maschinen und Anlagen Ges.m.b.H., der Sachverhalt diskutiert. Mit Hilfe der fachlichen Expertise von Herrn Aigner konnte somit die passende Anlage, welche sich für beide Materialien eignet, gefunden werden – die hauseigene INTAREMA® TVEplus®. Diese Anlage wurde speziell für die Aufarbeitung von schwer zu verarbeitenden Materialien, wie stark bedruckten Folien und/oder restverschmutzten und/oder sehr feuchten Materialien, entwickelt. Eine Besonderheit dieser Anlage ist die dreistufige Hochleistungsentgasung. Der Anlagenaufbau ist der nachstehenden Abbildung 20 zu entnehmen. Es darf nicht außer Acht gelassen werden, dass in der Praxis das Extrudersystem auf das Input-Material maßgeschneidert wird. [33]

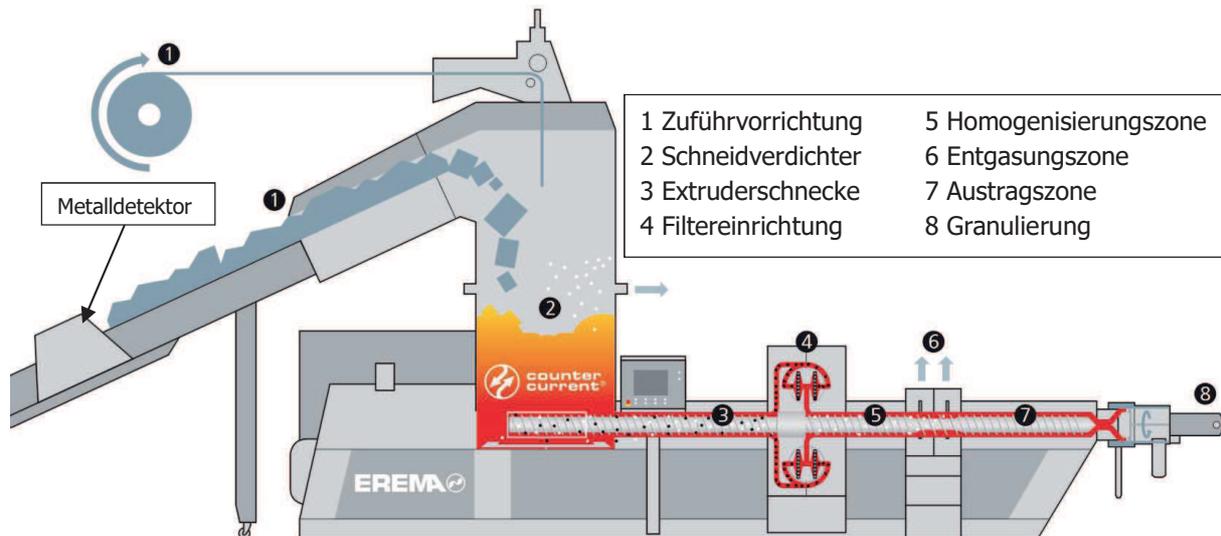


Abbildung 20: Funktionsschema der INTAREMA® TVEplus® [34]

Die Beschickung der Anlage erfolgt je nach Bedarf über ein Förderband für Schüttgüter oder mittels Abwickel- und Einzugsvorrichtung für Materialrollen. Bei der Beschickung mittels Förderband ist zur Anlagensicherheit ein Metalldetektor angebracht, der im Falle einer Detektion alarmiert und das Fließband stoppt. Das Schüttgut darf einen Feuchtegehalt von bis zu 10 % aufweisen. Im Abbildung 21 dargestellten, patentierten Schneidverdichter (erste Entgasung) wird das Material zerkleinert, durchmischt, durch Friktion erwärmt, getrocknet, vorverdichtet und gepuffert. Das Funktionsprinzip des Schneidverdichters ähnelt dem eines Mixers, denn auch hier befindet sich am Boden des zylindrischen Schneidverdichters ein mit Schneidblättern bestückter Rotor. Das Material wird durch die Rotordrehung gegen die Laufrichtung der Extruderschnecke bewegt (Counter Current®-Technologie von EREMA). Dadurch nimmt die Relativgeschwindigkeit im Übergangsbereich (Schneidverdichter - Extruder) so stark zu, dass die Extruderschnecke wie eine scharfe Schnittkante wirkt, die das Material quasi „herausfräst“. Die Verweilzeit des Materials im Schneidverdichter beträgt ca. zehn Minuten. [33]



Abbildung 21: Funktionsprinzip des Schneidverdichters von EREMA [34]

Der direkt tangential angeschlossene Nutbuchsensextruder (Einschneckenextruder) wird vom Schneidverdichter über eine rechteckige Öffnung kontinuierlich mit warmem, vorverdichteten

Material beschickt. Im Extruder wird das Material durch die Drehbewegung der Extruderschnecke weiter verdichtet und von der Einzugszone beim Schneidverdichter weiter in die Aufschmelzzone gefördert, in der das Material durch Friktion und Zusatzheizung bei Temperaturen zw. 180°C und 240°C, plastifiziert und rückwärts entgast wird (zweite Entgasung). In der Plastifizierzone sollte ein schonendes Aufschmelzen mit reduziertem Schereintrag erfolgen, um eine ungewünschte Zerkleinerung von in der Schmelze befindlichen Störstoffen zu vermeiden, da diese ansonsten den nachfolgenden Filter ungehindert durchlaufen könnten. Am Ende der Plastifizierzone wird die Schmelze aus dem Extruder abgeleitet und zur Reinigung über einen vollautomatischen, selbstreinigenden Filter geführt. Welche Filterbauart hier zum Einsatz kommt, hängt im Wesentlichen vom Verschmutzungsgrad ab. Gängige Filtertechnologien sind dabei Scheiben-, Kolben- oder Laserfilter. Zuletzt genannter wird für sehr hohe Verschmutzungsgrade eingesetzt. Nach dem Filter wird die Schmelze in den Extruder zurückgeleitet und es erfolgt die finale Homogenisierung der Schmelze in der Homogenisierungszone. In der anschließenden Entgasungszone wird die filtrierte und homogenisierte Schmelze vakuumentgast (dritte Entgasung). Die Anordnung der Entgasung nach dem Filter ist entscheidend für die Entgasungsleistung. Die Entgasungsleistung ist in der beschriebenen Anordnung am Höchsten. [33]

Die geforderten Produkteigenschaften können bei Bedarf gezielt durch die Einarbeitung diverser Additive eingestellt werden. Dabei erfolgt die Additivzugabe über eine Seitendosierung im Bereich der in Abbildung 20 gekennzeichneten Homogenisierungs-/Entgasungszone. Es ist dabei zu beachten, dass diese Zone dann druckfrei sein muss. Hier bietet sich beispielsweise eine atmosphärische Entgasung an. Nach der Additivierung muss eine kurze Homogenisierungszone zur gleichmäßigen Verteilung der Additive in der Schmelze folgen. Anschließend wird über die Austragszone unter geringen Druck die Schmelze der Granuliereinrichtung bzw. dem jeweiligen Werkzeug zur Produktherstellung (z.B. Rohre, Platten, Profile) zugeführt. [33]

Für eine optimale Anlagenführung, Entgasung und minimale Materialbelastungen ist es unverzichtbar, das Schneckendesign an das zu verarbeitende Material anzupassen. [33]

Der Abschlag des erzeugten Polymerstrangs kann entweder heiß oder kalt erfolgen, woraus unterschiedliche Kornformen resultieren, welche das Förder- und Dosierverhalten des Granulates beeinflussen. Welches Verfahren für die Granulatherstellung verwendet wird, hängt von der Durchsatzleistung des Extruders sowie den geforderten Produkteigenschaften und dem Material selbst ab. So sind beispielsweise eine Unterwassergranulierung, als auch die Granulierung an Luft bestens für die Herstellung von Polyolefingranulat geeignet. Ein Überblick über die diversen Granulieraggregate für Heiß- und Kaltabschlag ist in Abbildung 22 gegeben.

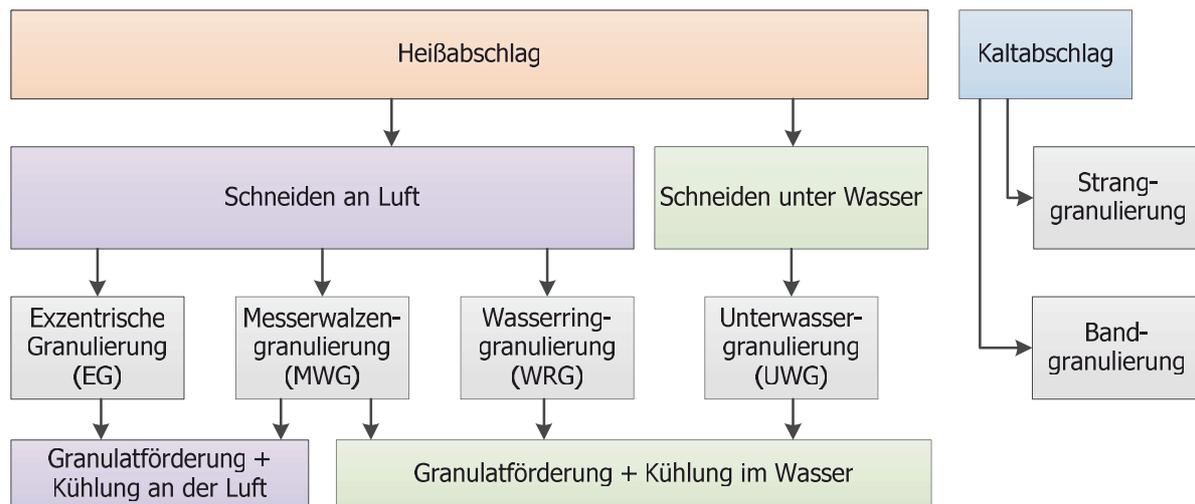


Abbildung 22: Systematik der Granuliertvorrichtungen; in Anlehnung an [35, S. 527]

Gegebenenfalls ist eine Nachbehandlung des Granulats notwendig, bevor ein Abpacken oder eine Silolagerung erfolgen kann. Granulat, welches an der Luft abgeschlagen wird, kann vor dem Klassieren einem Granulatkühler zugeführt werden. Das unter Wasser granulierte Material muss nachfolgend in einem Zentrifugaltrockner getrocknet werden, bevor es zur Klassierung gelangt [35 S. 532]. Zur Qualitätssicherung kommen gängige Verfahren wie IR- und Raman-Spektroskopie, MFR-, Feuchte- und Schüttgewichtbestimmung, usw. zum Einsatz.

Werkstoffliches Recycling liefert bisher nur einen begrenzten Beitrag zur Verwertung von Altkunststoffen, da nur etwa 15 % bis 20 % des Kunststoffabfalls auf diesem Weg recycelt werden können [36]. Es ist also nur dann sinnvoll, wenn der ökologische und ökonomische Aufwand im angemessenen Verhältnis zum erzielbaren Nutzen stehen und der Markt für die erzielbare Rezyklatqualität vorhanden ist. Insbesondere für die kleinteiligen, vermischten und stark verschmutzten Altkunststofffraktionen, wie sie etwa im Automobil- oder Elektrobereich anfallen, werden in Zukunft universelle Verwertungsverfahren notwendig. Daher gewinnen alternative Recyclingverfahren, wie etwa das rohstoffliche Recycling, immer mehr an Bedeutung. [20]

## 4.2 Rohstoffliches Recycling

Das rohstoffliche Recycling, auch als chemisches oder tertiäres Recycling bezeichnet, basiert auf der gesteuerten Zersetzung bzw. Abbau der Polymere durch Wärmeeintrag, Chemikalien und Katalysatoren, wodurch eine Vielzahl an Zwischenprodukten oder Monomeren entstehen. Die so aus Altkunststoffen gewonnenen Rohstoffe weisen ein sehr ähnliches Eigenschaftsbild und vergleichbare Qualität, wie jene durch herkömmliche Verfahren hergestellten auf. Dadurch werden Primärrohstoffe wie Erdöl oder seine Derivate substituiert. Ein weiterer technischer Vorteil ist die sehr gute Reinigungsmöglichkeit der erzeugten Produkte, was eine hohe Produktqualität garantiert. Da sich durch rohstoffliches Recycling große Mengen an Altkunststoff mit vergleichsweise hohen Ausbeuten verwerten lassen, bietet es eine interessante Alternative zum werkstofflichen Recycling. So könnte es in Zukunft einen großen Beitrag zur Erfüllung von stofflichen Recyclingquoten leisten. [10]

Für die Depolymerisation bzw. Überführung in Kohlenwasserstoffe oder Synthesegas stehen bisher grundlegend die vier nachfolgend aufgelisteten, chemischen Verfahren zur Verfügung:

1. Depolymerisation (Kettenabbau) durch Hydrolyse, Alkolyse, Solvolyse oder katalytische Depolymerisation zu organischen Verbindungen (Rückgewinnung der Monomere möglich),
2. Hydrierung durch kombinierten Wärme- und Wasserstoffeinfluss zu vorwiegend flüssigen Kohlenwasserstoffen,
3. thermische Zersetzung in inerter Atmosphäre zu Ölen und Gasen (Thermolyse-, Pyrolyseverfahren, Crackprozess),
4. Vergasung mit Sauerstoff zu Brenn- oder Synthesegas (Gemisch aus CO und H<sub>2</sub>). [8]

Welches Verfahren zum Einsatz kommt, hängt von verschiedenen Faktoren wie vom eingesetzten Kunststoff bzw. Kunststoffmix, den gewünschten Zwischenprodukten usw. ab. So eignen sich für die Depolymerisation von Kondensations- und Additionspolymeren die Solvolyseverfahren. Hingegen werden Standard- bzw. Massenkunststoffe, zu denen u.a. PP und PE zählen, thermisch gespalten und zu chemischen oder petrochemischen Zwischenprodukten abgebaut. Einen Überblick über die verschiedenen rohstofflichen Recyclingmöglichkeiten für Altkunststoffe ist in Abbildung 23 gegeben. [8]

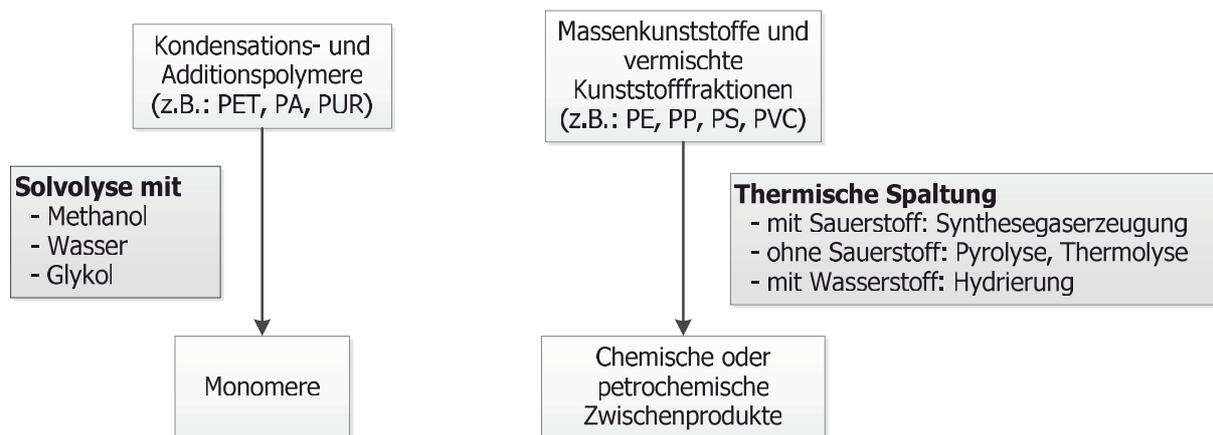


Abbildung 23: Rohstoffliche Verwertungsmöglichkeiten für Altkunststoffe [8]

Da die Kohlenstoffbindungen der Polyolefine nur durch oxidative oder chemische Prozesse aufspaltbar sind und diese Kunststoffe dasselbe Aufbauprinzip wie Erdöl aufweisen, bieten sich hier die bereits oben angeführten Verfahren der Petrochemie (Vergasung, Pyrolyse oder Hydrierung) an. [8]

Für die Verfahren zur Verwertung von Polyolefinen und anderen Standardkunststoffen eignen sich nicht nur die sortenreinen Abfälle, sondern auch jene vermischten, verschmutzten Abfälle, welche auch Elastomere, Textilien, Holz und anorganische Bestandteile beinhalten können. Dabei darf der Einsatzstoff für die Verfahren Pyrolyse und Synthesegaserzeugung einen gewissen anorganischen Bestandteil aufweisen, der zu Asche bzw. Schlacke umgesetzt wird. Hingegen muss für die Verfahren der Thermolyse und Hydrolyse eine vollständige Abtrennung der anorganischen Bestandteile erfolgen.

Die Aufbereitung der Abfallströme, sodass eine heizwertreiche, organische Fraktion gebildet wird, geschieht in der Regel mittels automatisierten Anlagen. In diesen werden die üblichen

Trennverfahren angewendet. Bei Bedarf wird die erhaltene kunststoffreiche Fraktion verdichtet, wodurch diese pneumatisch förderbar wird. [8]

### 4.2.1 Mechanische Vorbehandlung

Ebenso wie beim werkstofflichen, ist auch für das rohstoffliche Recyclingverfahren eine Aufbereitung der Abfallströme notwendig. Dabei wird das gleiche Ziel wie bei der werkstofflichen Aufbereitung verfolgt, nämlich die Verunreinigungen zu entfernen, das Material zu konfektionieren und aufzukonzentrieren. Gleich wie bei der Aufbereitung für das werkstoffliche Recycling erfolgt hier die Aufbereitung in zwei getrennten Prozessen. Einem vergleichsweise groben, trockenmechanischen und einem Nassmechanischen Aufbereitungsprozess. Ein Unterschied zur Aufbereitung für das werkstoffliche Recycling ist, dass in diesem Fall alle vier Abfallströme beide Aufbereitungsprozesse gleichermaßen durchlaufen. Die beiden Aufbereitungsprozesse sowie die verwendeten Aggregate, werden im Nachfolgenden detailliert beschrieben. Aufbau und Funktionsweise der hier eingesetzten Aggregate sind im Anhang nachzulesen.

In dieser Arbeit wird auf Grund der für die Problemstellung gewählten Systemgrenzen, der Aufbereitungslinien, nicht auf die Themen Sammlung, Transport, eventuelle Kompaktierung und Lagerung der Input-, Output- sowie abgetrennten Störstoffmaterialien eingegangen.

#### Trockenmechanische Aufbereitung

Da für die Nassmechanische Aufbereitung gewisse Anforderungen (Korngröße < 20 mm, metallentfrachtet und altkunststoffreich) an das Aufgabegut gestellt werden, muss vorab eine trockenmechanische Aufbereitung aller Abfallströme erfolgen. Der Aufbau der für diese Problemstellung gewählten, trockenmechanischen Aufbereitungslinie mit entsprechend gewählter Systemgrenze, ist der nachstehenden Abbildung 24 zu entnehmen. Diese Aufbereitungsanlage wurde in der dargestellten Form mit den angegebenen Aggregaten für die Aufbereitung des Deponiegutes eingesetzt.

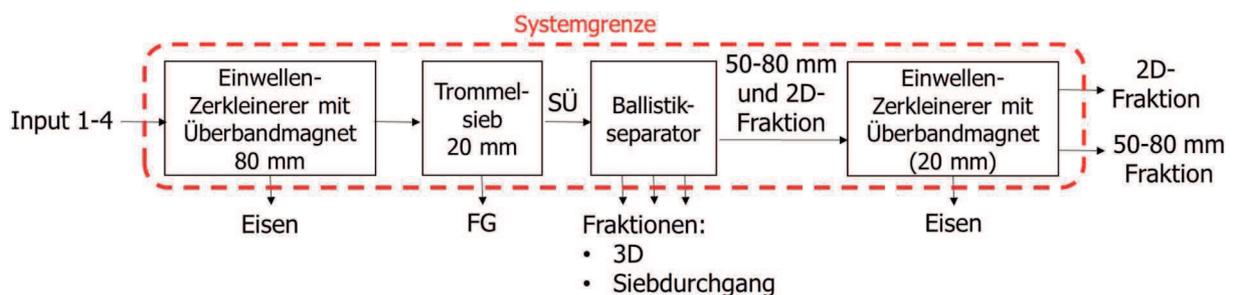


Abbildung 24: Fließbild der trockenmechanischen Aufbereitungsanlage als Vorbereitung für die Nassmechanische Aufbereitung

Das Abfallmaterial wird mittels Bagger dem ersten Aggregat, einem Einwellen-Zerkleinerer (Terminator der Firma Komptech GmbH), zugeführt. Das auf eine Korngröße von 80 mm zerkleinerte Material wird beim Austrag durch einen Überbandmagneten von eisenhaltigen Störstoffen befreit. Durch ein Förderband gelangt das Material in das anschließende Trommelsieb zur Abtrennung des Feinanteils (< 20 mm). Der Siebüberlauf wird anschließend mittels Förderband in den Ballistikseparator transportiert. Dort erfolgt eine Auftrennung des Inputs in die Fraktionen 2D, 3D, 50-80 mm und Siebdurchgang. Die für diese Arbeit

interessanten Fraktionen, 2D und 50-80 mm werden über ein Förderband nochmals einem Einwellen-Zerkleinerer zugebracht und auf eine Korngröße von 20 mm zerkleinert. Der Austrag wird abermals mittels Überbandmagnet von eisenhaltigen Störstoffen befreit. Abschließend wird die gewonnene Wertfraktion mittels LKW-Transport zur nassmechanischen Aufbereitung gebracht.

Auf Grund der gewählten Systemgrenze werden die vom Stoffstrom abgetrennten Fraktionen nicht weiter betrachtet.

### Nassmechanische Aufbereitung [37, S. 174–175]

Im Rahmen der Forschungsarbeiten im RSA Projekt „Plastic Reborn“ wurde ein nassmechanisches Aufbereitungsverfahren für die nachgeschaltete thermochemische Konversion konzipiert. Dabei wird unter der Verwendung einer Setzmaschine und eines Zentrifugalkraftscheiders, der den Umstand nutzt, dass Polyolefine im Vergleich zu anderen Kunststoffen, eine geringere Dichte als Wasser besitzen, ein marktfähiges Zwischen- und Endprodukt erzeugt. Das Fließbild der Anlage zur nassmechanischen Aufbereitung ist der Abbildung 25 zu entnehmen.

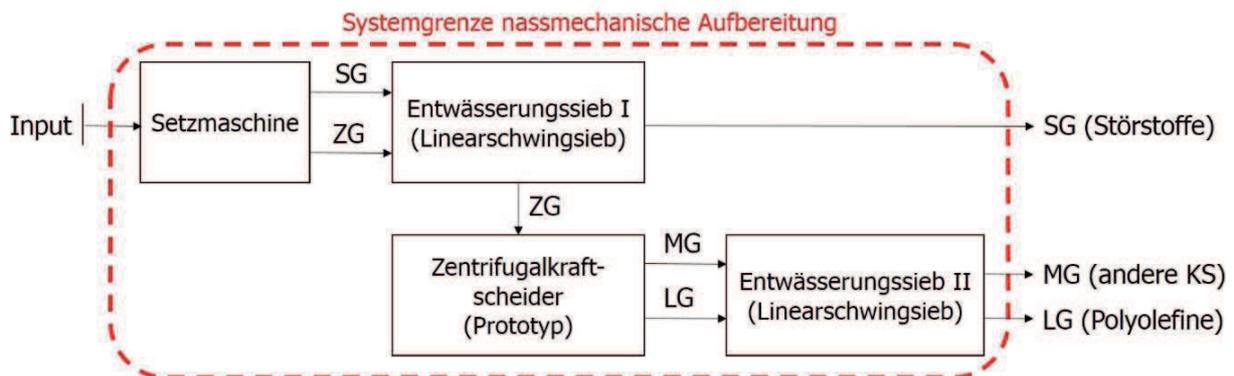


Abbildung 25: Fließbild der nassmechanischen Aufbereitungsanlage „Plastic Reborn“; in Anlehnung an [37, S. 174]

Das Aufgabegut wird wahlweise feucht oder trocken einer Setzmaschine zugeführt, in der sich die Partikel, entsprechend ihrer Anfangsfallbeschleunigung, schichten. Dabei entsteht eine Schwergutfraktion (SG), die sich aus Störstoffen wie Restmetall, Glas oder Steinen zusammensetzt, als auch eine kunststoffreiche Zwischengutfraktion (ZG). Die Entwässerung beider Fraktionen erfolgt über ein anschließendes Linearschwingsieb mit Ausschleusung der Schwergutfraktion. Die Zwischengutfraktion wird hingegen weiter in einen Zentrifugalkraftscheider geführt, in dem entsprechend der Materialdichte eine polyolefinreiche Leichtgutfraktion (LG), sowie eine aus sonstigen Kunststoffen bestehende Mittelgutfraktion (MG) gebildet werden. Anschließend erfolgt für beide Fraktionen eine Entwässerung mittels Linearschwingsieb, wobei die Mittelgutfraktion anschließend abgeführt und die polyolefinhaltige Leichtfraktion als Produkt gewonnen wird.

Auf Grund der gewählten Systemgrenze werden die vom Stoffstrom abgetrennten Fraktionen (Schwergut- und Mittelgutfraktion) nicht weiter betrachtet.

Die aus den altkunststoffhaltigen Abfallströmen, nach zweistufiger Aufbereitung, erhaltene Polyolefinfraktion wird anschließend mittels LKW nach Wien Schwechat, zum Raffinerie-

standort der OMV Refining & Marketing GmbH transportiert. Dort wird das Material der Anlage zur thermochemischen Konversion zugeführt, welche im folgenden Kapitel im Detail beschrieben wird.

#### **4.2.2 Thermochemische Konversion von Altkunststoffen (ReOil Verfahren)**

Der im Folgenden beschriebene Prozess (ReOil Verfahren) der thermochemischen Konversion von Kunststoffen zur synthetischen Rohölgewinnung ist ein lösungsmittelbasiertes, nicht-katalytisches, thermisches Depolymerisationsverfahren von Altkunststoffmaterial (vorwiegend Polyolefine). Das ReOil Verfahren wurde von der OMV Refining & Marketing GmbH entwickelt und patentiert (Österreich: AT 511 772 A1 2013-02-15). [38]

Das in Abbildung 26 gezeigte Verfahrensschema kann vereinfacht wie folgt beschrieben werden. Als Inputmaterial wird eine mechanisch aufbereitete, polyolefinreiche Kunststofffraktion eingesetzt (die Einsatzspezifikationen sind am Kapitelende aufgeführt). Diese wird über einen Vorschneidverdichter dem Extruder zugeführt, bei ca. 180°C aufgeschmolzen und verdichtet. Anschließend wird die Schmelze mit dem zirkulierenden Lösungsmittel (schwersiedendes Zwischenprodukt aus dem Raffinerieprozess) über einen statischen Mischer homogenisiert und in den Rohrreaktor gepumpt. Dabei wird das Lösungsmittel zur Viskositätsreduktion eingesetzt, wobei in Folge auch die Wärmeübertragung verbessert wird. Diese Verfahrensweise erlaubt hohe Durchsätze, womit wirtschaftliche Rahmenbedingungen geschaffen werden können. [38, 39]

Im Rohrreaktor findet bei Temperaturen von ca. 400 – 500°C und moderatem Druck die thermische Depolymerisation (Cracking) der langkettigen Kunststoffmoleküle statt. Das gasförmige Reaktorprodukt wird in einem Separationsbehälter von der Lösungsmittelmatrix abgezogen und einer Stripperkolonne zugeführt. In der Kolonne werden folgende zwei Produktfraktionen abgezogen: [38, 39]

- 1.) das leichte Stripper Produkt bestehend aus gasförmigen und flüssigen Leicht siedern,
- 2.) das schwere Stripper Produkt besteht aus gasölähnlichen Komponenten.

Das leichte, flüssige Stripperprodukt kann in der Ethylenanlage (AC) zur Erzeugung von Ethylen und Propylen verwendet werden. Das schwere Stripperprodukt kann entweder weiter zu Kerosin oder Diesel verarbeitet oder in der FCC-Anlage (Fluid Catalytic Cracking) zur Propylengewinnung herangezogen werden. In Summe können mit dem beschriebenen Verfahren ca. 50 - 60 % Kunststoff Precursor, bezogen auf den eingesetzten Altkunststoff, gewonnen werden. [39]

Da im Einsatz neben den polyolefinreichen Kunststofffraktionen auch geringe PVC-Mengen im Inputmaterial enthalten sein können, kann es im Prozess zur HCl-Bildung kommen. Entstehendes HCl kann mit dem Kondensat des Stripperdampfes absorbiert und in Folge mit einem Neutralamin neutralisiert werden. Diese wässrige Phase wird als Sauerwasser der Wasseraufbereitung zugeführt. [39]

Die nicht abgetrennte Kreislaufflüssigkeit, bestehend aus nicht- und teilkonvertierten Kunststoffanteilen sowie Lösungsmittel, wird mittels Pumpe am unteren Teil des Separationsbehälters abgezogen und über ein Filtersystem im Kreislauf geführt. Im Filter

werden Feststoffe (z.B. Füllstoffe, Schwebekoks) abgetrennt. Zusätzlich erfolgt nach der Filterung eine Abtrennung eines schwer siedenden Nebenproduktes (Flash Produkt). [39]

Das schwer siedende Nebenprodukt, welches aus dem Sumpfprodukt des Separationsbehälters gewonnen wird und vorwiegend aus Lösungsmittel besteht, kann entweder in der TGU (Thermische Gasöl Unit) weiterverarbeitet werden oder im Heizöl schwer bzw. Bitumen Pool Verwendung finden.

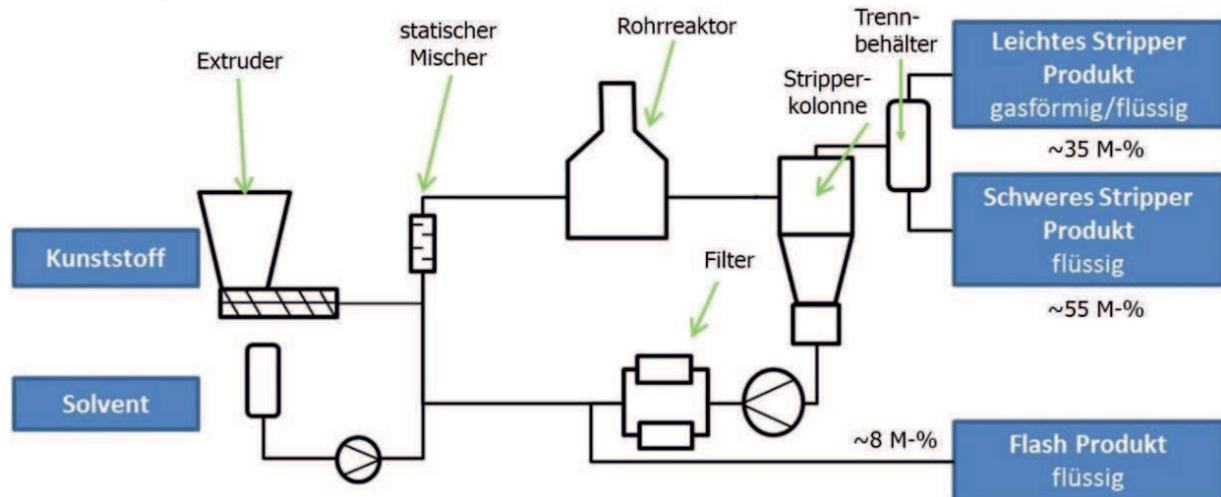


Abbildung 26: Verfahrensschema zur thermochemischen Konversion von Kunststoffen nach dem ReOil Verfahren [39]

Als Eingangskontrolle werden folgende Untersuchungen am Inputmaterial durchgeführt:

- Bestimmung des Feuchtegehalts,
- NIR-Analyse zur Bestimmung der Zusammensetzung bzw. enthaltenen Kunststoffe,
- Glührückstandsmessung zur Bestimmung des anorganischen Anteils,
- Elementaranalyse der Asche und
- C/H/N/O-Analyse (Kohlenstoff, Wasserstoff, Stickstoff, Sauerstoff) zur Bestimmung der organischen Anteile. [39]

Dabei sind folgende Einsatzspezifikationen zu erfüllen:

- Der Feuchtegehalt darf max. 15 M-% betragen. [39]

Alle nachfolgenden Werte beziehen sich auf die Trockenmasse:

- Der Polyolefin- und Polystyrolanteil muss min. 92 M-% betragen,
- es dürfen max. 3 M-% PET und max. 2 M-% PVC enthalten sein,
- die anorganischen Verunreinigungen sind mit max. 3 M-% begrenzt und
- die organischen Verunreinigungen dürfen max. 5 M-% betragen. [39]

Auf Grund von Geheimhaltungsvereinbarungen mit der OMV Refining & Marketing GmbH, kann in dieser Arbeit nicht genauer auf einzelne Anlagenkomponenten oder deren Funktionsweise eingegangen werden.

Im nachfolgenden Kapitel wird der Vollständigkeit halber kurz auf die möglichen Produkte, welche aus PO-Granulaten hergestellt werden können, eingegangen.

### 4.3 Produkte aus dem werkstofflichen Recycling

Für die aus den oben beschriebenen Aufbereitungsprozessen gewonnenen, sauberen PE- und PP-Regranulate, gibt es eine Vielzahl an Verarbeitungs- und Produktmöglichkeiten. Die beste Möglichkeit ist der direkte Einsatz der Rezyklate in Granulatform in der Spritzgussmaschine oder dem Extruder. In diesen Verarbeitungsanlagen können durch die direkte Fertigung neue Produkte hergestellt werden. Eine weitere Möglichkeit ist die Beimengung der Rezyklate zur Kunststoff-Neuware. Eine häufige Einschränkung ist die Farbgebung der Recyclingprodukte, da das Material bereits eingefärbt ist. Aus diesem Grund erfolgt häufig eine Färbung in dunkle, gedeckte Farbtöne oder schwarz (vgl. Abbildung 27). Eine erweiterte Farbpalette der Produkte kann nur angeboten werden, wenn schon in der Aufbereitung der Abfallstoffe eine Sortierung entsprechend der gewünschten Farbe vorgenommen wird. [22]

Je nach Kundenwunsch und/oder Spezialisierung des jeweiligen Kunststoffrecyclers, existiert eine Vielzahl an qualitätsgesicherten Rezyklattypen. Diese müssen nicht immer sortenrein sein. In manchen Produkten ist sogar ein gewisses Maß an „Verunreinigung“ mit anderen Kunststoffen erwünscht, um die mechanischen Eigenschaften einzustellen. Beispielsweise kann durch einen ca. 5 %igen LDPE-Folienanteil im PP-Inputmaterial der Schmelzindex (MFR = Melt Flow Rate) gezielt gesenkt werden. Von der Firma Sky Plastik Recycling and Commerce GmbH am Standort Haimburg in Kärnten/Österreich werden PP-Regranulate als Homo- und Copolymer, gefüllt und ungefüllt für Extrusion oder Spritzguss produziert. Ebenso stellt diese Firma PE-Regranulat (LD, MD, HD), welches je nach Dichte für Spritzguss, Extrusion oder Blasformen geeignet ist, her. Die Endprodukte, welche aus diesen Materialien hergestellt werden können, sind sehr vielfältig und reichen dabei von einfachen Objekten wie z.B. Blumenkisten, Rohren, Paletten, Regalen, Rasensteinen, u.v.m., bis hin zu High-Tech-Bauteilen für die Elektro-, Automobil- und Haushaltswarenbranche. Sogar Kinderspielzeug kann aus 100 % Recyclingkunststoff hergestellt werden. In den nachfolgenden Abbildung 27 und Abbildung 28 sind auszugsweise jene Produkte dargestellt, welche aus vermischten bzw. minderqualitativen PO-Rezyklaten hergestellt werden können als auch einige Beispiele für die Anwendung hochqualitativer Rezyklate. [22]



Abbildung 27: Beispiele für Produkte aus recyceltem PO-Material minderer Qualität [40]



Abbildung 28: Produktbeispiele aus recyceltem PO-Material hoher Qualität [41, 42, 43, 44]

### 4.4 Produkte aus dem rohstofflichen Recycling

Aus dem thermochemischen Konversionsprozess der OMV Refining & Marketing GmbH in Schwechat werden am Ende drei petrochemische Zwischenprodukte gewonnen. Aus der Stripperkolonne am Ende der Anlage werden ein leichtes und ein schweres Stripper-Produkt abgezogen. Das leichte Stripper Produkt, bestehend aus gasförmigen und flüssigen Leichtsiedern, kann in die Ethylenanlage (AC-Anlage) der bestehenden Raffinerie geleitet werden. Dort wird im Wesentlichen mittels Dampfpyrolyse (Steamcracker) eine Reihe von petrochemischen Grundstoffen wie Schwer- und Mittelsieder erzeugt; u.a. erfolgt hier auch die Erzeugung von Ethylen und Propylen (Leichtsieder). Das erzeugte Ethylen und Propylen wird via Pipelines auf das angrenzende Gelände der Borealis Polyolefine GmbH transportiert. Dort werden zur Produktion von PP und PE derzeit sieben Anlagen betrieben. Davon sind zwei Anlagen für die PP-Produktion (Kapazität 435.000 t/a), eine Anlage zur PE-Produktion und zwei LDPE-Anlagen (Gesamtkapazität PE 454.000 t/a) am Standort. Des Weiteren werden am Gelände eine Compound- (Kapazität rund 90.000 t/a) sowie eine Versuchsanlage betrieben. [39, 45]

Das erzeugte schwere Stripper Produkt aus der thermochemischen Konversion besteht aus gasölähnlichen Komponenten und kann entweder weiter zu Kerosin oder Diesel verarbeitet oder in der FCC-Anlage (Fluid Catalytic Cracking) zur Propylengewinnung herangezogen werden, welches anschließend ebenfalls bei der angrenzenden Borealis Polyolefine GmbH für die PP-Produktion eingesetzt wird. [39]

Das schwer siedende Nebenprodukt aus der thermochemischen Konversion, welches aus dem Sumpfprodukt des Separationsbehälters gewonnen wird, besteht vorwiegend aus Lösungsmittel. Dieses bleibt am OMV Gelände und kann entweder in der TGU weiterverarbeitet werden oder im Heizöl schwer bzw. Bitumen-Pool Verwendung finden. [39]

## 5 Methodik

In diesem Kapitel wird die wissenschaftliche Vorgehensweise in dieser Arbeit dargestellt. Es wird aufgezeigt welche Instrumente und Methoden eingesetzt wurden, um die gestellten Forschungsfragen zu beantworten.

Dieser Abschnitt der Arbeit gliedert sich in die Unterkapitel „Literaturrecherche und Experteninterviews“, „Auswahl der Abfallströme“ sowie „Auswahl der Behandlungsanlagen und Aggregate“. Abschließend folgt der experimentelle Teil dieser Arbeit, welcher sich in „Beprobung“ sowie „experimenteller Versuchsaufbau“ gliedert.

### 5.1 Literaturrecherche und Experteninterviews

Zur Erhebung der Daten bzgl. Stoffstromzusammensetzung, Mengenerhebung und für die Suche nach realen Recyclinganlagen wurde eine Literaturrecherche durchgeführt. Es wurde in den Bibliotheken der Montanuniversität Leoben (Lehrstuhlbibliothek des AVAW und Kunststofftechnikbibliothek) nach geeigneter Literatur sowie Hochschulschriften zu den Themen Kunststoffrecycling, Aufbereitungstechnik, Sortierung und Verwertung von Kunststoffen, etc. gesucht. Da wenig geeignete bzw. veraltete Literatur zu diesen Themen gefunden wurde, erfolgte eine Suche in bibliographischen Datenbanken mittels den Web-Suchmaschinen „Scopus“ und „Google Scholar“. Dabei wurden Suchbegriffe wie z.B. Polyolefinrecycling, Verwertung und/oder Aufbereitung von Kunststoffen, Kunststoffrecycling, Recycling von Kunststofffolien, Siedlungsabfällen, Leichtstoffverpackungsabfällen, u.v.m. in deutscher sowie englischer Sprache verwendet. Als Suchkriterium für die Literatur wurde ein Zeitraum von 2006 bis 2016 vorgegeben. Ausgewählt wurden beispielsweise Publikationen wie Fachartikel in Tagungsbänden und Fachzeitschriften, Fach- und Lehrbücher sowie Hochschulschriften.

Da ebenso die Recherche mittels Web-Suchmaschinen, in Bezug auf den gesamten Aufbereitungskreislauf der Abfälle dieser Arbeit nicht ausreichend war, mussten zur Schließung der Informationslücken Experteninterviews durchgeführt werden. Hierzu wurden vorab die Recyclingschritte entlang des Lebenszyklus eines Kunststoffproduktes angeordnet und entsprechenden Stakeholdergruppen zugeordnet. Entsprechend diesen Stakeholdergruppen wurden Kontakte gesucht und ausgewählt, um Einblicke in die Erfahrungen und Meinungen dieser zu gewinnen. Das Ziel war es, mindestens ein Expertengespräch aus jeder Stakeholdergruppe zu führen. In Summe konnten 15 informelle Interviews mit unterschiedlichen Experten der entsprechenden Fachbereiche durchgeführt werden. Die involvierten Stakeholder im werkstofflichen sowie rohstofflichen Recyclingprozess von Kunststoffen sind in der nachfolgenden Grafik (Abbildung 29) dargestellt.

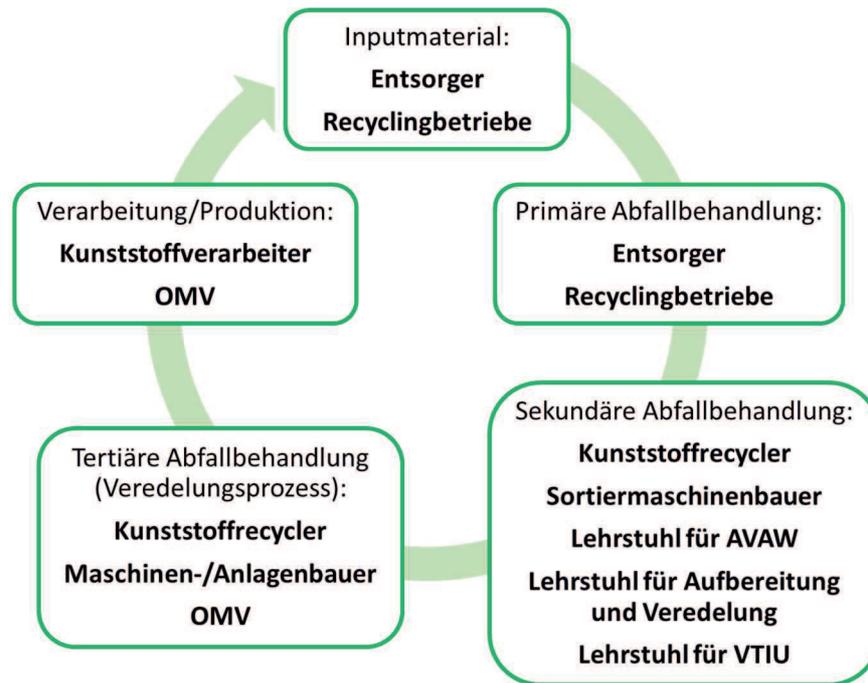


Abbildung 29: Typische Prozessphasen und involvierte Stakeholder im werkstofflichen und rohstofflichen Recyclingprozess von Kunststoffen

Wie nachfolgend beschrieben, wurde entsprechend der Methode des strukturierten Interviews vorgegangen. Nach Auswahl und Kontaktaufnahme (per Telefon oder E-Mail) mit potentiellen Interviewpartnern wurde für jede Stakeholdergruppe ein Interviewbogen erstellt. Dieser umfasste einige allgemeine Fragen, welche für alle Stakeholder ähnlich waren, sowie spezifische Fragen entsprechend der jeweiligen Stakeholdergruppe. Leider war es nicht möglich, aus jeder Stakeholdergruppe einen passenden Interviewpartner zu finden. Zum Beispiel verweigerten die kontaktierten Personen der Kunststoffverarbeiter ein Interview, mit der Begründung, dass sie dazu keine Freigabe hätten. Da einige Interviewpartner auf eine Anonymisierung bestanden, wird auf die Anführung von Firmen- und Personennamen verzichtet. Eine Liste der geführten Interviews kann der Tabelle 7 entnommen werden.

Tabelle 7: Anzahl der geführten Interviews, gegliedert nach Prozessphasen

Prozessphase	Anzahl der geführten Interviews
Inputmaterial	4
Primäre Abfallbehandlung	2
Sekundäre Abfallbehandlung	6
Tertiäre Abfallbehandlung	2
Verarbeitung/Produktion	1
<b>Summe</b>	<b>15</b>

## 5.2 Auswahl der Abfallströme

Die Auswahl der relevanten Abfallströme wurde zum Teil bereits vor Beginn dieser Arbeit im Rahmen des Research Studio Austria (RSA) Projekts „Plastic Reborn“ getroffen. Das Projekt „Plastic Reborn“ war ein Gemeinschaftsprojekt der OMV Refining & Marketing GmbH und den Lehrstühlen für „Abfallverwertungstechnik und Abfallwirtschaft“, „Verfahrenstechnik des

industriellen Umweltschutzes“ und „Aufbereitung und Veredelung“ der Montanuniversität Leoben. Dabei wurde das Ziel verfolgt, ein nassmechanisches Aufbereitungsverfahren zur effizienten Abtrennung von Altkunststoffen, insbesondere Polyolefine aus Abfall- und Reststofffraktionen für das rohstoffliche Recycling bis zur Marktreife zu entwickeln. Hierfür wurde im Arbeitspaket 2 „Stoffmengenerhebung und Charakterisierung von Inputmaterialien“ eine Erhebung potentieller Inputmaterialien für die geplante Aufbereitungsanlage durchgeführt.

Zur Identifizierung potentieller altkunststoffhaltiger Abfallströme, mit dem Schwerpunkt auf Polyolefine, wurde das Abfallverzeichnis gemäß Abfallverzeichnisverordnung basierend auf der ÖNORM S 2100 „Abfallkatalog“, sowie der europäische Abfallkatalog (EAK) der Abfallverzeichnis-Verordnung (AVV) herangezogen. Bei diesen beiden Abfallverzeichnissen handelt es sich um tabellarisch aufgelistete Abfälle, welchen jeweils eine sog. Abfallschlüsselnummer (SN) bzw. Abfallcode zur eindeutigen Identifikation zugewiesen ist. Diese „Abfallkataloge“ ermöglichen es, ausgehend von umgangssprachlichen Abfallbegriffen, eine Zuordnung zu definierten Abfallarten zu treffen. [23, 24]

Zur Identifizierung der relevanten Abfallarten bzw. Schlüsselnummern wurde entsprechend dem nachfolgend aufgelisteten Ausschlussverfahren vorgegangen (vgl. Tabelle 8).

1. Ausschluss aller Schlüsselnummern, welche als gefährlich gekennzeichnet waren, da diese Abfälle einer speziellen Behandlung bedürfen.
2. Ausschluss aller Schlüsselnummern, welche i.d.R. keine Kunststoffe enthalten wie z.B. Wasch- und Prozessabwässer, Schlämme, Aschen, Organabfälle, usw.
3. Ausschluss jener Schlüsselnummern, welche explizit anderen Kunststoffen als Polyolefinen zugeordnet werden können z.B. Harz-, Elastomer-, PVC-Abfälle, usw. In diesem Schritt wurden auch jene Schlüsselnummern ausgeschlossen, welche biologisch abbaubare Kunststoffe oder flüssig vorliegende Kunststoffabfälle behandeln.
4. Ausschluss jener Schlüsselnummern, welche keinen signifikanten Anteil an Polyolefinen enthalten (z.B. Leiterplatten). Dies erfolgte auf Grund von Erfahrungswerten einiger Projektpartner sowie der in der Literatur gefundenen Zusammensetzungen der Abfallstoffe.

*Tabelle 8: Schrittweise Eingrenzung der Schlüsselnummern bzw. Abfallcodes beider Abfallkataloge*

<b>Ausschlusskriterium</b>	<b>Abfallkatalog ÖNORM S 2100 Anzahl der SN</b>	<b>EAK Anzahl der SN</b>
<b>Summe der SN</b>	<b>767</b>	<b>856</b>
Gefährlich	-323	-406
Keine Kunststoffe enthalten	-352	-406
Andere Kunststoffe als PO	-51	-10
PO-Anteil zu gering	-25	-14
<b>Relevante SN</b>	<b>16</b>	<b>20</b>

Die 16 bzw. 20 verbleibenden, eingegrenzten SN wurden in Folge im Projekt gezielt auf ihre Eignung hin überprüft. Aus diesem Pool an relevanten Schlüsselnummern wurden die in Tabelle 9 aufgelisteten Abfallströme zur näheren Betrachtung für diese Masterarbeit festgelegt.

Tabelle 9: Auflistung der ausgewählten Schlüsselnummern

Abfallkatalog ÖNORM S 2100	EAK
Abfallstrom 1: Leichtstoffverpackungen	
SN 91207 - Leichtfraktion aus der Verpackungsammlung SN 57118 - Kunststoffemballagen und behältnisse	Code 15 01 02 - Verpackungen aus Kunststoff
Abfallstrom 2: gemischte Siedlungsabfälle	
SN 91101 - Siedlungsabfälle und ähnliche Gewerbeabfälle	Code 20 03 01 - gemischte Siedlungsabfälle
Abfallstrom 3: Rejekts	
SN 18407 - Rückstände aus der Altpapieraufbereitung	Code 03 03 07 - mechanisch abgetrennte Abfälle aus der Auflösung von Papier- und Pappeabfällen

Auf Grund des Verfahrensprinzips der thermochemischen Konversion können hier auch jene Abfallströme eingesetzt werden, für die es bisher keine oder nur eingeschränkte Verwertungsoptionen gibt. Der **vierte Abfallstrom „Abfälle aus dem Landfill Mining“** wurde daher bereits im Projektantrag von „Plastic Reborn“ anvisiert. Zudem wurde zu diesem Zeitpunkt am Lehrstuhl für AVAW das Projekt „Landfill Mining Österreich“ bearbeitet, aus dem für Analysezwecke Deponiegut zur Verfügung stand.

Dem Deponiegut selbst sind keine Schlüsselnummern entsprechend der ÖNORM S 2100 sowie dem Europäischer Abfallkatalog zugewiesen. Nach einer mechanischen Behandlung im Zuge eines Deponierückbaus könnte die kunststoffhaltige Fraktion der SN 57131 (aufbereitete Kunststoffabfälle, qualitätsgesichert) bzw. nach EAK dem Abfallcode 19 12 04 (Kunststoff und Gummi) zugeordnet werden. [23, 24]

### 5.3 Auswahl der Behandlungsanlagen und Aggregate

In diesem Kapitel wird dargestellt, wie der Aufbau der Aufbereitungsanlagen für die vier Abfallströme erfolgte. Ebenso wird an dieser Stelle aufgezeigt, wie die in den jeweiligen Linien enthaltenen Aggregate ausgewählt wurden.

#### 5.3.1 Werkstoffliches Recycling

Der Aufbau sowie die Aggregatauswahl der trockenmechanischen Behandlungsanlagen für das werkstoffliche Recycling musste hier für jeden der vier Abfallströme separat ermittelt werden:

- Für die trockenmechanische Behandlung der LVP-Abfälle wurde eine vereinfachte an die Literatur angelehnte, LVP-Sortieranlage mit den in der Praxis üblichen Aggregaten ausgewählt. [8, 30, 46]
- Die Vorbehandlung der gemischten Siedlungsabfälle wurde an die in der Praxis übliche Behandlung in einer MBA angelehnt. Auch hier wurde eine vereinfachte, schematische Darstellung mit in der Industrie gebräuchlichen Aggregaten gewählt. Die nachfolgende Aufbereitung der EBS-Fraktion wurde mit Hilfe von Expertengesprächen erstellt, da zum

damaligen Zeitpunkt keine Anlagen zur Aufbereitung von EBS-Fractionen zur PO Rückgewinnung existieren. [8, 26, 31]

- Ebenso wurden die schematischen Aufbereitungsanlagen für die Rejekt-Fraktion und das Deponiegut mit Hilfe von Expertengesprächen erstellt und die geeigneten Aggregate ausgewählt. Hier konnte ebenfalls auf keine bestehenden Anlagen verwiesen werden. [26]

Das Anlagenkonzept für die Nassmechanische Aufbereitung wurde vorab durch Literaturrecherche erhoben und konnte durch nachfolgende Expertengespräche für diese Arbeit adaptiert werden. [1, 29, 32]

Die Auswahl einer geeigneten Extruderlinie für diese z.T. komplexen Inputmaterialien erfolgte ebenso durch Expertengespräche. Bei der ausgewählten Anlage handelt es sich um eine reale Extruderlinie, welche zur Aufbereitung stark verschmutzter und feuchter Inputmaterialien zum Einsatz kommt.

### 5.3.2 Rohstoffliche Recycling

Die trockenmechanische Aufbereitung entspricht der realen Aufbereitungsanlage zur Behandlung des Deponiegutes aus dem Projekt „Landfill Mining Österreich“ unter der Leitung von Frau Tanja Wolfsberger. [27] Da das Deponiegut mit dieser Anlage aufbereitet wurde, wurde entschieden, alle Inputmaterialien theoretisch über diese Anlage zu führen.

Das Konzept für den Aufbau der Nassmechanischen Aufbereitung wurde bereits in der Dissertation von Herrn Markus Bauer „Mechanische Aufbereitung von Altkunststoffen für das chemische Recycling“ erarbeitet und konnte im Zuge des Projektes „Plastic Reborn“ im Versuchsmaßstab umgesetzt werden. [37, S. 174]

Der Prozess der thermochemischen Konversion wurde in den Jahren vor Projektstart „Plastic Reborn“ von der OMV Refining & Marketing GmbH in Wien Schwechat entwickelt und im Versuchsmaßstab gebaut.

## 5.4 Beprobung

Im Nachfolgenden wird gezeigt, welche Abfallströme nach welchem Verfahren und am welchem Ort beprobt wurden.

### Leichtstoffverpackungsabfälle

Vom LVP-Stoffstrom war es nicht notwendig Proben zu entnehmen, da für das Projekt „Plastic Reborn“ die Outputdaten zweier LVP-Sortieranlagen zur Verfügung gestellt wurden. Es wurden jedoch drei sekundäre Abfälle, welche bei der LVP-Aufbereitung entstehen, vom Anlagenbetreiber (LVP 2) beprobt (jeweils 50 l) und uns für Analysezwecke zur Verfügung gestellt. Bei diesen sekundären Abfällen handelt es sich um folgende drei Fraktionen (vgl. Abbildung 30):

- SN 57118 (Kunststoffemballagen und -behälter) aus der Sortierfraktion „HDPE-Eimer, Flaschen und Kanister“. Die Probe stellt einen heterogenen Mix, bestehend aus schwarzen Kunststoffprodukten, transparenten Verpackungsboxen und andere Verpackungsbehältern dar.

- SN 57119 (Kunststofffolien) aus der Sortierfraktion „LDPE-Folien transparent“ sind größtenteils großflächige, transparente Folien wie sie für klassische Verpackungszwecke im Haushalts- und Industriebereich Verwendung finden.
- SN 91207 (Leichtfraktion aus der Verpackungssammlung) aus der Sortierfraktion MKF, welche als industrieller EBS für eine thermische Verwertung vorgesehen ist. Es handelt sich um einen sehr heterogenen Mix aus unterschiedlichsten Verpackungsmaterialien (Kunststoff, PPK und Textilien) in diversen Formen und Farben.



Abbildung 30: Darstellung des Probenmaterials von LVP 2 vor der Zerkleinerung: Links: Kunststoffemballagen und -behältnisse; Mitte: Kunststofffolien; Rechts: Leichtfraktion aus der Verpackungssammlung

### Gemischte Siedlungsabfälle

Von den gemischten Siedlungsabfällen („Restmüll“) wurde zu Vergleichszwecken jeweils eine repräsentative Probe der gemischten Siedlungsabfälle aus privaten Haushalten, sowie eine repräsentative Probe aus Gewerbe und Industrie von einem in der Steiermark ansässigen Aufbereiter für die manuelle Sortierung zur Verfügung gestellt (vgl. Abbildung 31, links). Für die Schwimm-Sink-Sortierung (SSS) wurde die durch die Aufbereitung der Siedlungsabfälle in der Splittinganlage am Standort gewonnene EBS-Fraktion (vgl. Abbildung 31, rechts) entsprechend der ÖNORM EN 15442 (Verfahren zur Entnahme von Proben von festen Sekundärbrennstoffen) beprobt. Die beprobte EBS-Fraktion lässt sich nach ÖNORM S 2100 der Schlüsselnummer SN 91107 (heizwertreiche Fraktion) sowie SN 91108 (Ersatzbrennstoffe qualitätsgesichert) zuordnen. Der gelieferte Probenumfang belief sich auf ca. 50 l.



Abbildung 31: Links: Gemischte Siedlungsabfälle vor der Sortierung; Rechts: Aus diesem Abfallstrom erzeugter, zerkleinerter Ersatzbrennstoff (EBS)

## Rejekt

Für Analysezwecke wurden ebenso die Rejektfraktionen beprobt. Durch Literaturrecherche und Experteninterviews hat sich gezeigt, dass sich dieser Abfallstrom je nach Herkunft in seiner Zusammensetzung stark unterscheiden kann. Daher wurden für Vergleichszwecke die Rejekte bei folgenden Unternehmen beprobt (vgl. Abbildung 32):

- Rejekt aus dem Altpapieraufbereitungsprozess einer Papierfabrik (Firma B),
- Rejekt aus dem Altkartonaufbereitungsprozess einer Kartonfabrik (Firma F) und
- Zopf-Rejekt von einem Entsorgungs-/Aufbereitungsbetrieb (Firma A) unbekanntem Ursprungs

Das Erscheinungsbild aller drei Proben war sehr ähnlich. Es konnte bei einer ersten optischen Begutachtung ein hoher Folien- und PPK-Anteil erkannt werden.



*Abbildung 32: Darstellung der drei Rejektproben: Links: Rejektprobe der Firma B; Mitte: Rejektprobe der Firma F; Rechts: Probe des Zopf-Rejekts der Firma A*

Die Probennahmen erfolgten jeweils am Unternehmensstandort entsprechend der ÖNORM EN 15442 (Verfahren zur Entnahme von Proben von festen Sekundärbrennstoffen). Dabei wurden Proben zu je 20 l entnommen.

## Deponiegut

Die für diese Arbeit verwendeten Deponiegutproben stammen aus dem am Lehrstuhl für AVAW durchgeführten Projekt „Landfill Mining Österreich“. Ziel des Projektes war die Abschätzung des in den ausgewählten Deponien lagernden theoretischen Ressourcenpotentials. [27]

Zur Abschätzung des realen Rohstoffpotentials wurde für das Projekt abgegrabenes Deponiegut aus den Deponien Hollabrunn und Allerheiligen im Mürztal am Deponiestandort manuell sortiert.

- Deponiegut Hollabrunn
- Deponiegut Allerheiligen

Zwei weitere Deponieproben, welche auch in dieser Arbeit verwenden wurden, stammten aus der Massenabfalldeponie Hollabrunn. Dabei handelt es sich um zwei bei der Aufbereitung des erwähnten Deponiegutes entstandene Fraktionen. Die Aufbereitung des Deponiegutes erfolgte mit der in Kapitel 4.2.1 dargestellten, mobilen Aufbereitungsanlage. Die dabei nach dem Ballistikseparator entstandene 3D-Fraktion setzte sich augenscheinlich überwiegend aus Inertmaterial, Verbundstoffen und Holz zusammen. Die Fraktion 20 – 50 mm wies eine erdähnliche Konsistenz mit geringem Kunststoffanteil auf. Die beiden übrigen Fraktionen

zeigten hingegen trotz der stark heterogenen Zusammensetzung einen höheren Anteil an Kunststofffolien und Textilfragmenten (vgl. Abbildung 33). Auf Grund dieser optischen Einschätzung wurden die beiden Fraktionen 3D sowie 20 – 80 mm von weiteren Untersuchungen ausgeschlossen. Von den Fraktionen 2D sowie 50 – 80 mm wurden je ein Big Bag Probenmaterial entnommen und analysiert. An beiden Proben konnte ein deutlicher Feingutanteil in Form von Staubanhaftungen festgestellt.



*Abbildung 33: Probenfraktionen aus dem Deponiegut: Links: Fraktion 50-80 mm; Rechts: Fraktion 2D*

Die Probennahme erfolgte entsprechend der ÖNORM EN 15442 (Verfahren zur Entnahme von Proben von festen Sekundärbrennstoffen).

### 5.5 Experimenteller Versuchsaufbau

In diesem Kapitel werden nachfolgend die Versuchsaufbauten für die durchgeführten Analysen (manuelle und Schwimm-Sink-Sortierung) beschrieben.

#### Manuelle Sortieranalysen

Zur Erhebung der allgemeinen Zusammensetzung sowie des Kunststoffanteils der jeweiligen Abfälle wurden manuelle Sortieranalysen durchgeführt. Die Sortierung der Stoffströme gemischter Siedlungsabfälle und Deponiegut erfolgte jeweils am Gelände des Aufbereitungsunternehmens bzw. am Deponiestandort. Der Stoffstrom Rejekt wurden in den Laborräumlichkeiten des Lehrstuhls für AVAW sortiert. Für die Sortierungen an den Firmenstandorten wurde jeweils ein Materialvolumen von einem Big Bag (ca. 500 kg) sortiert. Im Labor wurde auf Grund der Durchführbarkeit ein Probenvolumen von 20 l sortiert. Die Sortierversuche an beiden Firmenstandorten wurden im Rahmen zweier weiterer Projekte durchgeführt und benötigten einen Personalaufwand von ca. fünf Personen. Die Sortierversuche im Labor konnten hingegen von einer Person alleine durchgeführt werden. Repräsentative Sortierversuche im großen Maßstab stellen daher einen erheblichen personellen und finanziellen Aufwand dar.

Das im Labor zu sortierende Gemisch wurde vorab in einem Trockenschrank bei 105°C entsprechend der NORM DIN EN 14346, Verfahren A (Charakterisierung von Abfällen – Berechnung der Trockenmasse durch Bestimmung des Trockenrückstandes oder des Wassergehaltes) bis zur Gewichtskonstanz getrocknet und verwogen.

Für die Sortierung selbst wurde das Sortiergut flächig auf der Arbeitsunterlage verteilt. Das Sortiergut wurde dann Stück für Stück händisch begutachtet und einer der nachfolgend aufgelisteten Fraktionen zugeteilt. Die übrigbleibende Restfraktion (größtenteils Feingut) wurde ebenso wie jene nicht identifizierbaren Stücke einer Restfraktion zugeordnet. Am Ende der Sortierung wurden alle sortierten Fraktionen verwogen, mit Fotos dokumentiert und eine Rückstellprobe entnommen. Der beispielhafte Versuchsaufbau einer manuellen Sortierung einer Restmüllfraktion (gemischte Siedlungsabfälle) am Firmengelände ist der nachstehenden Abbildung 34 (links) zu entnehmen. Die Durchführung einer manuellen Sortierung am Beispiel des Deponieguts ist ebenso in Abbildung 34 (rechts) dargestellt.



*Abbildung 34: Links: Aufbau eines manuellen Sortierversuchs am Firmengelände;  
Rechts: Durchführung eines Sortierversuchs*

Die nachfolgend aufgelisteten Sortierfraktionen wurden entsprechend dem jeweiligen Sortiergut angepasst.

Die drei Rejektproben wurden im Labor in folgende Fraktionen sortiert:

- Holz
- Inert
- Kunststoff
- Metall
- Naturfasern
- PPK
- Sortierrest
- Textil

Das Deponiegut von Hollabrunn und Allerheiligen wurde am Deponiestandort in folgende Fraktionen sortiert:

- Glas
- Holz
- Inertstoff
- Kunststoff
- Metall
- PPK
- Problemstoffe
- Sonstiges
- Sortierrest
- Textilien
- Verbundstoff

Die beiden Proben aus der Aufbereitung des Deponiegutes Hollabrunn wurden im Labor in folgende Fraktionen sortiert:

- Holz
- Inertstoff
- Kunststoff
- Metall
- Sortierrest
- Textil
- Verbundstoff

Die beiden Fraktionen der gemischten Siedlungsabfälle wurden am Firmenstandort in folgende Fraktionen sortiert:

- Hartkunststoffe (3D)
- Holz
- Inert
- Kunststofffolien (2D)
- Metall
- Organik
- PPK
- Problemstoffe
- Textilien
- Verbundstoffe

Für die Sortierversuche wurden folgende Gerätschaften verwendet:

- Laborwaage der Fa. Kern (Typ: 572): Messbereich 0 g – 16.100 g; Genauigkeit  $\pm 0,1$  g
- Plattformwaage der Fa. Kern (Typ: KXS-TM) für Geländesortierung: Messbereich 0 g – 100 kg; Genauigkeit  $\pm 10$  g
- Schaufel für Geländesortierung
- Probenbehälter für die sortierten Fraktionen: Tonnen, Eimer und Glasschüsseln
- Schreib- und Beschriftungsutensilien (Kugelschreiber, Block, wasserfester Permanentmarker, Millimeterpapier)
- Fotoapparat zur Bilddokumentation

Als persönliche Schutzausrüstung wurde zur Durchführung der manuellen Sortierversuche stichfeste Arbeitshandschuhe, Schutzbrille, Labormantel, Warnweste (am Firmengelände), Staubmaske, sowie Sicherheitsschuhe getragen.

### **Versuchsbeschreibung der Dichtentrennung im Schwerefeld (Schwimm-Sink-Sortierung)**

Das Auftrennen einer Probe mit Hilfe des Sortierverfahrens der Dichtentrennung im Schwerefeld, auch als Schwimm-Sink-Sortierung (SSS) bezeichnet, basiert auf den unterschiedlichen Dichten der einzelnen Probenkomponenten in einer Trennflüssigkeit. [8] Für die Abtrennung von Polyolefinen von anderen Kunststoffen ist dieses Verfahren auf Grund der geringen Kosten und einfachen Durchführbarkeit ein geeignetes Verfahren.

Das zu sortierende Gemisch wurde vorab mittels Schneidmühle der Fa. Retsch vom Typ SM 2000 (siehe Abbildung 35) auf eine Korngröße von 20 mm zerkleinert und anschließend in einem Trockenschrank bei 105°C (siehe Abbildung 35) entsprechend der NORM DIN EN 14346, Verfahren A (Charakterisierung von Abfällen - Berechnung der Trockenmasse durch Bestimmung des Trockenrückstandes oder des Wassergehaltes) bis zur Gewichtskonstanz getrocknet und verwogen.



Abbildung 35: Vorbehandlungsschritte als Vorbereitung für die Schwimm-Sink-Sortierung:  
Links: Schneidmühle zur Probenzerkleinerung; Mitte: Trockenschrank geschlossen; Rechts: Innenraum des mit Proben gefüllten Trockenschanks

Für den Sortierversuch wurde das vorbereitete Probenmaterial (ca. 10 l) in eine Trennflüssigkeit gegeben, deren Dichte zwischen den Dichten der einzelnen Feststoffkomponenten liegt, sodass die spezifisch leichtere Fraktion aufschwimmt während die spezifisch schwere Fraktion absinkt (vgl. Abbildung 36). Für den Versuch zur Abtrennung der Polyolefinfraktion wurde als Trennmedium Wasser (Dichte bei 20 °C 0,998 g/cm<sup>3</sup>) eingesetzt. Die Hydrophobie der Kunststoffflakes wurde durch die Zugabe eines Netzmittels (Tensid) gesenkt, was gleichzeitig das Anhaften von Luftblasen minimiert und somit einem ungewollten Auftreiben von Störstoffpartikeln entgegenwirkt. Das Wasser-Flakesgemisch wurde zur Homogenisierung mit einem Kunststoffstab durchmischt und für min. 6 h ruhend stehen gelassen. Mit Hilfe eines Siebes wurden zuerst die Schwimm- und anschließend die Sinkfraktion abgeschöpft und jeweils in ein Probengefäß gegeben und beschriftet. Die Proben wurden darauffolgend in einem Trockenschrank nach Verfahren A der DIN EN 14346 getrocknet, anschließend abgekühlt und verwogen. Aufgetretene Verluste können durch die von den Sieben nicht erfassbaren Bestandteile (Siebdurchgang) erklärt werden. Ebenso trägt jene Fraktion zu den Verlusten bei, die weder absinkt noch aufschwimmt und sich somit der Trennung entziehen. Ein Problem welches sich bei diesem Verfahren ergeben kann, ist, dass z.B. geschäumte Kunststoffe wie EPS in der Schwimmfraktion wiederzufinden sind.

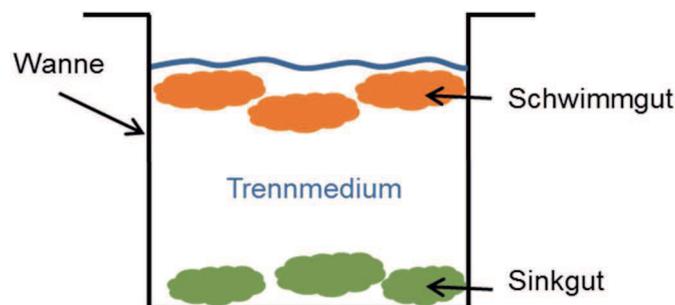


Abbildung 36: Prinzip der Dichtentrennung im Schwerfeld

Für den Versuch wurden folgende Gerätschaften verwendet:

- Waage der Fa. Kern (Typ: 572): Messbereich 0 g – 16.100 g; Genauigkeit  $\pm 0,1$  g
- Wanne, mit ca. 60 Liter Fassungsvermögen, die  $\frac{3}{4}$  mit Wasser gefüllt wurde

## 5. Methodik

---

- Sieb: Feines Metallsieb mit einer Maschenweite von 2 mm
- Probenbehälter: diverse Glasschüsseln
- Netzmittel: einen Tropfen Flüssigseife
- Kunststoffstab zum Umrühren
- Schreib- und Beschriftungsutensilien (Kugelschreiber, Block, wasserfester Edding)
- Fotoapparat zur Bilddokumentation
- Uhr zur Zeitmessung

Als persönliche Schutzausrüstung (PSA) zur Durchführung der Schwimm-Sink-Versuche wurden Labor- und Hochtemperaturhandschuhe, Schutzbrille, Labormantel sowie Sicherheitsschuhe getragen.

Der Versuchsaufbau sowie die verwendeten Gerätschaften sind in Abbildung 37 dargestellt.

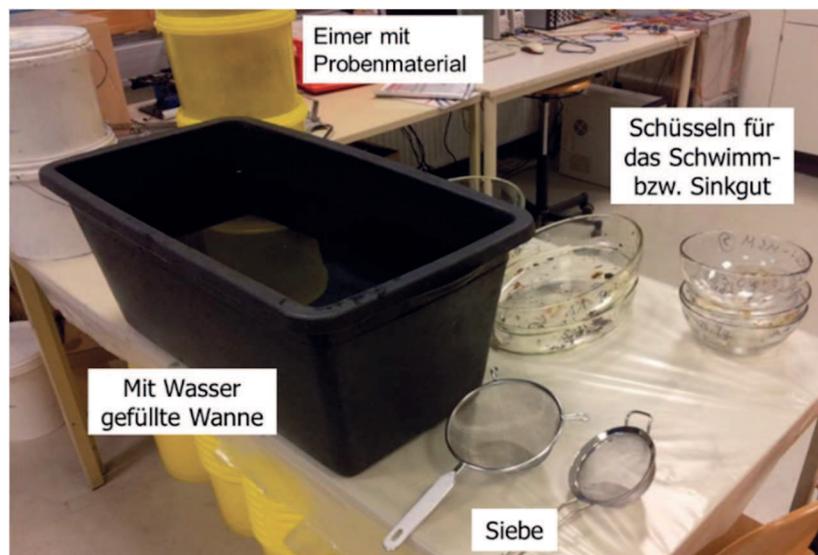


Abbildung 37: Versuchsaufbau und Gerätschaften für die Schwimm-Sink-Sortierung

## 6 Ergebnisse und Diskussion

### 6.1 Bewertung der Abfallströme

Nachfolgend werden die Ergebnisse in Bezug auf die vier gewählten Abfallströme angeführt und diskutiert. Es werden die Ergebnisse aus der Literaturrecherche, den Gesprächen mit Experten, sowie die Sortiererergebnisse aus der händischen und Schwimm-Sink-Sortierung gezeigt und diskutiert.

An dieser Stelle ist anzumerken, dass sich die Datenlage der vier Stoffströme als sehr unterschiedlich erwies. Zudem sind diese Daten lückenhaft und deshalb in ihrer Qualität nicht für einen gesamtheitlichen Ansatz ausreichend. Ebenso war der Probenumfang limitiert, sodass nur eine begrenzte Menge für Analysezwecke zur Verfügung stand.

Auf Grund der angeführten Umstände wurden für die Datenerhebung, sowie für die nachfolgenden Vergleiche, unterschiedliche Methoden angewendet. Zusätzliche Faktoren, welche diese Vorgehensweise erforderlich machten, sind die im Rahmen einer Masterarbeit begrenzt vorhandenen finanziellen, zeitlichen sowie personellen Ressourcen, welche für die Erhebung der Datenbasis zur Verfügung standen.

#### 6.1.1 Ergebnisse der Literaturrecherche und Interviews

In diesem Kapitel werden die Resultate der Literaturrecherche, sowie der Experteninterviews in Bezug auf die Mengenerhebung für die ausgewählten Abfallströme angeführt und diskutiert. Die folgenden Werte werden in Massenprozent (M-%) angegeben.

##### LVP

Im Rahmen der Stoffstromcharakterisierung und Mengenerhebung des Projektes „Plastic Reborn“ wurde mit zwei LVP-Sortierbetrieben (LVP 1 in Niederösterreich und LVP 2 in der Steiermark) Kontakt aufgenommen. Beide Betriebe übermittelten die Sortierdaten der jeweiligen LVP-Sortieranlage. Somit standen zur Auswertung der Zusammensetzung zwei vollständige Datensätze aus dem Jahr 2014 zur Verfügung.

Bei beiden LVP-Sortierbetrieben werden die LVP aus der getrennten Sammlung sowohl aus privaten Haushalten als auch Gewerbe und Industrie gemeinsam in der Anlage aufbereitet. Die bei der Aufbereitung der LVP-Ströme erhaltenen Fraktionen, sowie deren Anteil am Gesamtstrom, sind in Tabelle 10 dargestellt.

*Tabelle 10: Zusammensetzung zweier LVP-Ströme aus dem Jahr 2014*

	LVP 1	LVP 2		LVP 1	LVP 2
Fraktion	Anteil %	Anteil %	Fraktion	Anteil %	Anteil %
HDPE-Fraktion	4,7	2,7	MKF und EBS	60,8	71,2
LDPE-Fraktion	4,3	9,4	Metall-Fraktion	3,1	0,4
PS/PP-Verpackungen	0,6	2,3	Altglas	1,1	0,0
PET-Flaschen	24,2	7,2	Rest (z.B. Feingut)	1,4	6,9

Anhand der Daten aus Tabelle 10 ist ersichtlich, dass der größte Anteil (> 60 %) der LVP als MKF bzw. EBS in die thermische Verwertung geht. In dieser Fraktion sind in diesem Fall MKF, PPK, Textilien und andere heizwertreiche Fraktionen inkludiert. Der PE-Anteil beträgt in Summe 9 % bei LVP 1 und 12 % bei LVP 2 und wird in HDPE- und LDPE-Fraktion unterteilt. Die HDPE-Fraktion umfasst dabei das 3D-Gut wie Flaschen, Eimer und Kanister. Die LDPE-Fraktion beinhaltet die Folienfraktionen. Die PS/PP-Verpackungsanteile sind in Summe mit 1 % - 2 % gering, was eine Abtrennung und weitere Sortierung unwirtschaftlich macht. Die Fraktion der PET-Flaschen macht mit 24 % und 7 % ebenfalls einen nicht zu vernachlässigenden Anteil am LVP aus und wird in beiden Anlagen auch farblich sortiert. Der Altglas- sowie Metallanteil war mit weniger als 5 % gering. Der Sortierrest (Rest) setzt sich im Wesentlichen aus der Feinfraktion (Siebdurchgang) zusammen.

Es kann auf Grund dieser Daten kein Rückschluss auf die generelle LVP-Zusammensetzung, weder für die beiden Bundesländer noch für Österreich, gezogen werden. Grund hierfür ist einerseits die unterschiedliche Herkunft der LVP-Inputmaterialien aus Gebieten außerhalb des jeweiligen Bundeslandes, andererseits ist das LVP-Sammelsystem regional sehr unterschiedlich. Wie bereits erwähnt, erfolgt entweder eine gemeinsame Sammlung aller Leichtverpackungen (Verpackungen aus Kunststoffen, Materialverbunden, Holz, Textilien, Keramik sowie biologisch abbaubare Verpackungen) im Gelben Sack bzw. in der Gelben Tonne oder eine gezielte Sammlung von Plastikflaschen (Hohlkörpersammlung). In manchen Regionen Österreichs werden LVP bzw. PET-Flaschen gemeinsam mit Metallverpackungen gesammelt. [4]

In Österreich wurden im Jahr 2014 von der ARA AG 225.513 t Leichtstoffverpackungen aus Haushalt, Industrie und Gewerbe gesammelt, dabei stammen etwa 20 % aus der Gewerbe- und Industrieentsorgung. [47, S. 46–47] Laut Angaben des LVP 2 können rd. 10 M-% (ca. 22.551 t) als PE/PP-Wertstofffraktion direkt aus der NIR-Sortierung gewonnen werden. Laut Anlagenbetreiber sind in der EBS bzw. Mischkunststofffraktion (MKF) (ca. 60 M-%  $\pm$  135.307 t), welche an verschiedenen Stellen der Aufbereitung anfällt, eine erhebliche Menge an Polyolefinen zu finden. Als Begründung für diese Annahme wurde der hohe Folienanteil dieser Fraktion angegeben. Zur Feststellung des Polyolefingehaltes wurde diese Fraktion beprobt und am AVAW mittels FTIR-Analyse untersucht. Dabei wurde ein Polyolefingehalt von ca. 43 M-% bestimmt. [48] Das heißt, dass sich noch ca. 58.000 t Polyolefine in der EBS bzw. MKS-Fraktion befinden. In Summe kann somit für den **Abfallstrom LVP** in Österreich ein **Polyolefinpotential** von **ca. 80.000 t/a ( $\pm$  36 %)** erwartet werden. Es ist anzunehmen, dass sich ebenso in den abgetrennten Rest- bzw. Feinfraktionen Kunststoffe und darunter auch Polyolefine befinden. Laut Anlagenbetreiber beträgt der Kunststoffanteil in dieser Fraktion max. 6 % und ist für eine Recyclingoption derzeit uninteressant. Diese Fraktion geht aktuell direkt in die thermische Verwertung.

### **Gemischter Siedlungsabfall**

Im Jahr 2015 fielen in Österreich ca. 1.431.600 t an gemischten Siedlungsabfällen aus Haushalten und ähnlichen Einrichtungen an [4]. Das nach Bundesländern gelistete Aufkommen gemischter Siedlungsabfälle ist in absteigender Reihenfolge Tabelle 11 zu entnehmen.

Tabelle 11: Aufkommen des Abfalls „gemischter Siedlungsabfall“ nach Bundesländern [4]

Bundesländer	Masse 10 <sup>3</sup> t	Anteil %
Wien	523,5	36,6
Niederösterreich	230,9	16,1
Oberösterreich	167,3	11,7
Steiermark	155,9	10,9
Kärnten	97,3	6,8
Tirol	96,6	6,8
Salzburg	93,3	6,5
Burgenland	35,0	2,4
Vorarlberg	31,8	2,2
<b>Österreich</b>	<b>1.431,6</b>	<b>100</b>

Im Bundes-Abfallwirtschaftsplan 2017 wird zudem die exemplarische Zusammensetzung des Abfallstroms aus der Steiermark anhand einer Sortieranalyse aus dem Jahr 2014 angeführt (vgl. Tabelle 12). Dort wurde für die Steiermark ein Kunst- und Verbundstoffanteil von 21,6 % angegeben.

Tabelle 12: Zusammensetzung des gemischten Siedlungsabfalls, Steiermark 2014 [4]

Fraktionen	Anteil %
Kunst- und Verbundstoffe	21,6
Organik	17,7
Papier und Karton	12,5
Hygieneartikel	9,5
Feinfraktion kleiner 20 mm	9,1
Textilien	8,9
Inertstoffe	6,2
Glas	4,7
Metall	4,6
Sonstiges	4,3
Problemstoffe	0,9
<b>Gesamt</b>	<b>100</b>

Ginge man davon aus, dass es möglich wäre, diesen Anteil auf das österreichische Gesamtaufkommen von gemischten Siedlungsabfällen für das Jahr 2015 hochzurechnen, würde man ein **theroretisches Kunst- und Verbundstoffpotential** von **309.226 t** erhalten. Diese Überlegung ist jedoch sehr ungenau, da die Zusammensetzung der gemischten Siedlungsabfälle von unterschiedlichen Faktoren, wie die regional unterschiedlichen Abfallsammelsysteme, geographische Lage der Haushalte, Jahreszeit, sozio-ökonomische Struktur, usw. stark abhängig ist und diese Abhängigkeiten in dieser Hochrechnung nicht berücksichtigt werden können. Daher müssten für eine konkretere Abschätzung des Kunststoffpotentials im gemischten Siedlungsabfall in Österreich im Laufe eines Jahres mehrere händische Sortierungen über das ganze Bundesgebiet verteilt, im ländlichen sowie städtischen Bereichen durchgeführt werden. Diese werden im Zuge der Landes-Abfallwirtschaftspläne für die meisten

Bundesländer durchgeführt. Von den Bundesländern Wien und Salzburg wurden keine aktuellen Sortieranalysen veröffentlicht. Daher wird auf Grund von Expertengesprächen für Salzburg eine ähnliche Datenlage wie für Nieder-, Oberösterreich und Steiermark erwartet. Für Wien ist dies hingegen auf Grund der fehlenden, separaten Trennung von LVP nicht zwangsläufig zutreffend. In Wien werden Leichtverpackungen außer PET-Flaschen (welche über eine separate Trennung erfasst werden) über den Restmüll entsorgt, um dessen Heizwert zu erhöhen. [49]

In allen Berichten wurden die saisonalen und strukturbedingten Unterschiede durch Probenahme während der Heiz- und Nichtheizperiode in ländlichen als auch in städtischen Regionen berücksichtigt. In Tabelle 13 sind die erhobenen Kunststoffpotentiale aus dem Restmüll nach Bundesland aufgelistet. Je nach Detaillierungsgrad der Sortieranalysen wird die Hauptfraktion Kunststoffe in weitere Teilfraktionen wie beispielsweise PET- Getränkeflaschen, sonstige Kunststoffflaschen, Kübel und Kanister, Folien und Säcke (Verpackung), sonstige Kunststoffverpackungen, sonstige Kunststoffe (Nichtverpackung) untergliedert. Dies macht es möglich, die Daten auf die polyolefinreiche Zielfraktion zu konzentrieren, indem nichtrelevante Fraktionen, wie PET-Getränkeflaschen und Getränkeverbundkartons vom Gesamtkunststoffanteil abgezogen werden.

Aus welchen Teilfraktionen sich die berechneten Daten der Tabelle 13 zusammensetzten, ist im Anhang angegeben. Zu beachten ist, dass die angegebenen Kunststoffmengen in Massenprozent anhaftende Verschmutzungen und Restinhalte inkludieren, die im Zuge der händischen Sortierung nicht abgetrennt werden können.

Im Rahmen einer Diplomarbeit an der BOKU Wien [50] wurde für die Kunststofffraktion im Restmüll von NÖ ein durchschnittlicher Verschmutzungsgrad von 27,2 M-% [50] ermittelt. Des Weiteren ist hier anzumerken, dass zur Vereinfachung der Sortieranalyse das Probenmaterial auf eine Korngröße von 40 mm gesiebt wurde. Der Siebdurchgang (< 40 mm) wurde in den meisten Sortieranalysen nicht separat erfasst und ist daher in den Daten nicht inkludiert.

*Tabelle 13: Kunststoffpotential im gemischten Siedlungsabfall nach Bundesländern*

Bundesland	Kunststoffanteil M-%	Datenstand	Anmerkung
Burgenland [51]	13,0	2013	incl. PET-Flaschen und Getränkeverbundkartons
Kärnten [52]	15,6	2010	ohne Getränkeverbundkartons
NÖ [53]	11,6	2011	ohne PET-Flaschen und ohne Getränkeverbundkartons
OÖ [54]	9,0	2013	
Steiermark [55]	10,2	2013	
Tirol [56]	15,1	2009	
Vorarlberg [57]	11,5	2010	incl. PET-Flaschen; ohne Getränkeverbundkartons
Wien	keine Sortierdaten im Abfallwirtschaftsplan angeführt		
Salzburg	keine Sortierdaten im Abfallwirtschaftsplan angeführt		

Anhand des berechneten Mittelwertes (12,3 %) und Medians (11,6 %) der Kunststoffmengen im Restmüll aus Tabelle 13 lässt sich das theoretische Kunststoffpotential für die bundesweit im Jahr 2013 entsorgte Menge an gemischten Siedlungsabfällen (1.421.300 t [58]) berechnen. Das Jahr 2013 wurde gewählt, da die meisten Sortieranalysen aus diesem Jahr stammen. Es ergeben sich somit folgende Potentiale an Altkunststoff im Restmüll:

1. Unter Anwendung des Mittelwertes: 174.617 t ( $\triangleq$  12,29 %)
2. Unter Anwendung des Medians: 164.871 t ( $\triangleq$  11,6 %)

Geht man davon aus, dass in diesen Mengen noch ca. 27 M-% [50] an Verunreinigungen inkludiert sind, reduzieren sich das **Kunststoffpotential im Restmüll** für das Jahr 2013 auf:

1. Unter Anwendung des Mittelwertes: **127.121 t ( $\triangleq$  8,94 %)**
2. Unter Anwendung des Medians: **120.026 t ( $\triangleq$  8,44 %)**

Diese berechneten Werte für einen „sauberen“ Kunststoffgehalt in gemischten Siedlungsabfällen sind im Vergleich zum zuvor abgeschätzten deutlich realistischer.

Im Jahr 2015 wurden von den 1.431.600 t an gemischten Siedlungsabfällen 81 % im ersten Behandlungsschritt einer thermischen Behandlung zugeführt. 18 % gingen in die biotechnische Behandlung und nur 1 % wurde einer stofflichen Verwertung zugeführt. [4] Es kann angenommen werden, dass durch einen sinnvollen Recyclingansatz für die enthaltene Kunststofffraktion im Restmüll (rd. 124.000 t) eine höhere stoffliche Verwertungsquote von ca. 8 % erreichbar wäre.

### Rejekt

Um das Rejekt- und des Weiteren das Kunststoffpotential der Rejektfraktion bestimmen zu können, wurde vorab eine allgemeine Mengenerhebung der Rejekte durchgeführt. Zur Erhebung der anfallenden Rejektmengen in Österreich wurden alle 22 gelisteten Firmenstandorte der österreichischen Papierindustrie (Austropapier, März 2014) kontaktiert und um Daten gebeten. 12 Standorte (Rücklaufquote von ca. 55 %) waren bereit, anonym Daten (vgl. Tabelle 14) zur Verfügung zu stellen.

Bei den 12 Standorten handelt es sich mit Ausnahme eines Entsorgers, welcher Zopf-Rejekt aufbereitet, um Papier- und Kartonfabriken. Da manche Daten den Interviewpartnern nicht im Detail bekannt waren, handelt es sich häufig um Schätzwerte, insbesondere betrifft dies den Kunststoffanteil der Rejektfraktion. Hierzu konnten nur selten und wenn, dann ungenaue Angaben gemacht werden. Die Daten zeigen deutlich, dass wenig Rejektmaterial im Vergleich zur eingesetzten Altpapier bzw. -kartonmenge anfällt. Drei der interviewten Firmen stellten für Analysezwecke Proben ihres Rejektabfalls zur Verfügung. Diese Firmen sind in Tabelle 14 hellblau hinterlegt.

Tabelle 14: Erhobene Daten aus der Altpapier-/Altkartonaufbereitung in Österreich 2014

Firma	Eingesetzte Altpapier- /Altkartonmenge t/a	Rejektanteil t/a	Rejektanteil		
			M-%	M-%	Vol-%
A	Nur Zopfauflbereitung	10.000 (Zopf)	–	–	–
B	210.000	6.300 -10.500	3 - 5	–	–
C	340.000	5.100	1,5	10 - 15	–
D	350.000	14.000	4	–	30 - 50
E	444.000	22.000	5	ca. 30	–
F	400.000	28.000	7	–	66
G	13.000-15.000	400 - 600	3 – 4	15 - 20	70 - 80
H	350.000	7.000 -10.500	2 – 3	ca. 40	–
I	125.000	7.200	6	–	60
J	168.000	12.000	7	–	–
K	338.000	7.000 – 8.000	2 – 3	10 - 20	–
L	60.000	5.500	9	–	25 - 30

Zur Potentialberechnung der anfallenden Rejektmenge in Österreich sowie zur weiteren Berechnung eines ungefähren Kunststoffpotentials dieses Abfallstromes wurde aus den in Tabelle 14 angegebenen Rejektanteilen der gewichtete Mittelwert (4,51 M-%) berechnet. Der Altpapiereinsatz belief sich für Österreich im Jahr 2015 auf 1.474.000 t. [59] Die anfallende Rejektmenge kann nun folgendermaßen berechnet werden:

$$\text{Rejektmenge} = \text{Altpapiereinsatz} \times \text{Rejektanteil} \quad (4)$$

Damit ergibt sich unter Verwendung des gewichteten Mittelwertes für das Jahr 2015 eine theoretische Rejektmenge von rd. 66.477 t. Unter Verwendung der erhobenen min. und max. Werte für den Kunststoffanteil in den Rejekten (10 - 40 M-%) aus Tabelle 14 kann das Kunststoffpotential folgendermaßen berechnet werden:

$$\text{Kunststoffpotential} = \text{Rejektmenge} \times (10 - 40) \text{ M-\% Kunststoffanteil} \quad (5)$$

Setzt man in die zuvor genannte Gleichung die 66.477 t für die Rejektmenge ein, ergibt sich für das **Jahr 2015** ein **theoretisches Kunststoffpotential** zwischen **6.648 t** und **26.591 t** aus dem Rejektstrom in Österreich.

Aus den erhobenen Daten sowie aus der Berechnung ist ersichtlich, dass zwar eine gute Abschätzung der anfallenden Rejektmenge für das Jahr 2015 gemacht werden kann, aber auf Grund der unzureichenden Datenlage bezüglich des Kunststoffgehaltes im Rejekt kann keine konkrete Abschätzung des theoretischen Kunststoffpotentials erfolgen.

### Deponiegut

Österreichweit wurden im Jahr 2015 von 999 Deponien Abfälle zur Ablagerung übernommen. Dabei wurde eine Gesamtmasse von ca. 25,84 Mio. t abgelagert [4]. Den weitaus größten Anteil mit rd. 94 % stellten dabei die „Abfälle mineralischen Ursprungs“ dar. Entsprechend der Deponieverordnung [60], werden in Österreich seit 2004 keine unbehandelten Siedlungs- sowie ähnliche Gewerbeabfälle mehr deponiert. Auf Grund dessen werden zum gegebenen

Zeitpunkt keine nennenswerten Mengen an Kunststoffen deponiert. Die wesentlichen Abfallarten, welche im Jahr 2015 deponiert wurden, sind Tabelle 15 zu entnehmen.

*Tabelle 15: Wesentliche deponierte Abfallarten im Jahr 2015 [4]*

Abfallarten	Abgelagerte Massen 10 <sup>3</sup> t	Anteil %
Bodenaushub	21.909	84,8
Sonstige verunreinigte Böden	1.220	4,7
Schlacken und Aschen aus Abfallverbrennungsanlagen	593	2,3
Mineralischer Bauschutt (keine Baustellenabfälle)	489	1,9
Restliche Abfälle	1.632	6,3
<b>Gesamt</b>	<b>25.843</b>	<b>100</b>

Da keine Daten zu den deponierten Mengen an Kunststoffen in Österreich gefunden wurden, wird an dieser Stelle auf die Dissertation von Frau Tanja Wolfsberger „Landfill Mining Beurteilung und Bewertung des Rohstoffpotentials und der Verwertbarkeit von Abfälle österreichischer Massenabfalldeponien“ verwiesen. In der Dissertation wurde für zwei Deponiestandorte ein **theoretisches Kunststoffpotential** von **7 % für Allerheiligen** und **9 % für Hollabrunn** berechnet. [27]

### Zusammenfassung

Die in diesem Kapitel erhobenen Kunststoffpotentiale der vier ausgewählten Abfallströme sind in der nachfolgenden Tabelle 16 konzentriert, zusammengefasst. Aus den bereits am Beginn des Kapitels 6.1 angegebenen Gründen ist ein Vergleich der in Tabelle 16 angegebenen Daten nur bedingt zulässig.

*Tabelle 16: Zusammenfassung aller Ergebnisse der Potentialerhebung der Abfallströme*

Abfallstrom	Jahr	Anfallmenge t	Potential t	Potential %	Anmerkung
LVP	2014	225.513	80.000	36	PO-Potential aus der LVP- Aufbereitung
Gemischter Siedlungsabfall	2013	1.421.300	120.026 – 127.121	8,44 – 8,94	Kunststoffpotential ohne Verunreinigungen
Rejekt	2015	69.680	6.648 – 26.591	10-40	Kunststoffpotential
LFM	2014	-	-	7 9	Allerheiligen Hollabrunn

Wie auf Grund der Literatur erwartet wurde, weisen die LVP mit rd. 36 % das größte Kunststoff bzw. PO-Potential auf. Auch ist die jährlich anfallende Abfallmenge in Österreich, welche i.d.R. kontinuierlich ansteigt, für ein Recycling ausreichend. Der gemischte Siedlungsabfall weist zwar mit 8 % - 9 % ein sehr geringes Kunststoffpotential auf, dennoch wäre bei diesem Abfallstrom auf Grund der Gesamtabfallmenge eine große Masse an Kunststoffen vorhanden. Diese müssten jedoch aufwendiger aufbereitet werden, da sie i.d.R. einen größeren Verschmutzungsgrad aufweisen als jene aus der LVP-Sortierung.

Das Kunststoffpotential aus den Rejekten konnte auf Grund der unzureichenden Datenlage nicht so gut abgeschätzt werden wie bei den beiden zuvor genannten Fraktionen. Die Potentialspanne könnte von rd. 7.000 t bis max. 27.000 t pro Jahr reichen und hängt ebenfalls stark vom jährlich schwankenden Altpapier- bzw. Altkartoneinsatz ab. Vom Deponiegut konnten keine Abschätzungen angegeben werden, da keine expliziten Daten über die abgelagerten Kunststoffmengen auf österreichischen Deponien zur Verfügung standen. Es kann nur angenommen werden, dass bei den beiden Pilotdeponien Allerheiligen sowie Hollabrunn ein maximales Kunststoffpotential von 10 % [27] erwartet werden kann.

### 6.1.2 Ergebnisse der manuellen Sortierung

Nachfolgend werden die Ergebnisse der manuellen Sortierung der Proben aufgelistet und diskutiert. Ziel der Sortieranalyse war die Erhebung des realen Kunststoffgehaltes der Abfallströme. Es wird darauf hingewiesen, dass alle nachfolgend angeführten Sortierergebnisse von der Sortiermethode und vom Sortierer selbst abhängig sind. Daher ist ein direkter Vergleich nur schwer möglich. Alle angegebenen Werte sind in Massenprozent (M-%) angegeben.

#### LVP

Wie im Kapitel 6.1.1 beschrieben, ergab die Literaturrecherche bzw. Experteninterviews zu dem Abfallstrom LVP, das für das Projekt „Plastic Reborn“ die vollständigen Daten zweier LVP-Sortieranlagen (vgl. Tabelle 17) zur Verfügung gestellt wurden. Auf Grund dieser guten Datenlage, war es nicht notwendig eine manuelle Sortierung der LVP-Fraktion durchzuführen.

*Tabelle 17: Zusammensetzung zweier LVP-Ströme aus dem Jahr 2014*

	<b>LVP 1</b>	<b>LVP 2</b>
<b>Fraktion</b>	<b>Anteil %</b>	<b>Anteil %</b>
HDPE-Fraktion	4,7	2,7
LDPE-Fraktion	4,3	9,4
PS/PP-Verpackungen	0,6	2,3
PET-Flaschen	24,2	7,2
MKF und EBS	60,8	71,2
Metall-Fraktion	3,1	0,4
Altglas	1,1	0,0
Rest (z.B. Feingut)	1,4	6,9

#### Gemischter Siedlungsabfall

Zur Bestimmung der Zusammensetzung des Abfallstroms „gemischter Siedlungsabfall“ für eine FFG-geförderte Machbarkeitsstudie [61] wurden unter der Leitung von Herrn Gernot Kreindl großangelegte, manuelle Sortierversuche durchgeführt. Dabei wurden am Firmenstandort eines steirischen Aufbereitungsbetriebes jeweils 500 kg gemischter Siedlungsabfall aus Haushalten (Hausmüll) sowie Gewerbe und Industrie (Gewerbemüll) sortiert. Wird angenommen, dass der Anteil des Gewerbemülls am gemischten Siedlungsabfall rd. 20 % beträgt, kann ein gewichteter Mittelwert errechnet werden. Die Ergebnisse dieser Sortieranalysen sind der nachstehenden Tabelle 18, sowie Abbildung 38 zu entnehmen.

*Tabelle 18: Ergebnisse der manuellen Sortieranalyse vom gemischten Siedlungsabfall unterschiedlicher Herkunft [61]*

<b>Fraktion</b>	<b>Hausmüll M-%</b>	<b>Gewerbemüll M-%</b>	<b>Mittelwert M-%</b>
Organik	27,4	5,9	23,1
Verbundstoffe	19,0	30,5	21,3
Textilien	16,8	5,9	14,6
Hartkunststoffe (3D)	10,6	23,2	13,1
Kunststofffolien (2D)	8,9	5,9	8,3
Inert	6,1	3,0	5,5
PPK	3,9	11,8	5,5
Holz	3,4	8,4	4,4
Metall	3,4	3,9	3,5
Problemstoffe	0,6	1,5	0,8

Die gewonnenen Daten aus der Sortieranalyse zeigen, dass die Zusammensetzung deutlich von der Herkunft des Abfallstroms abhängt. Der Vergleich zeigt, dass die Anteile der Organik-, Textil- sowie Inertfraktion im Abfall aus Gewerbe und Industrie deutlich geringer sind, wie in dem von Haushalten stammenden. Dafür konnte im Abfall aus Gewerbe und Industrie ein höherer Anteil an Kunststoffen (ca. +10 %), PPK (ca. +8 %) und Holz (ca. +5 %) festgestellt werden. Die Fraktionen Verbund-, Problemstoffe und Metall treten in beiden Abfallströmen in ungefähr gleichen Anteilen auf.

Es muss an dieser Stelle darauf hingewiesen werden, dass die Zusammensetzung von gemischten Siedlungsabfällen von mehreren Faktoren, wie z.B. Jahreszeit, Herkunft (z.B. Stadt oder Land), Sammelsystem, usw., abhängig ist. Somit handelt es sich hier um eine punktuelle Darstellung der Siedlungsabfälle aus der Steiermark mit Ursprung Haushalt und Gewerbe (keine geographischen Sammlungsdaten bekannt) vom Sommer des Jahres 2014. Somit können diese Ergebnisse nicht als allgemein gültige Zusammensetzung von Siedlungsabfällen angenommen werden.

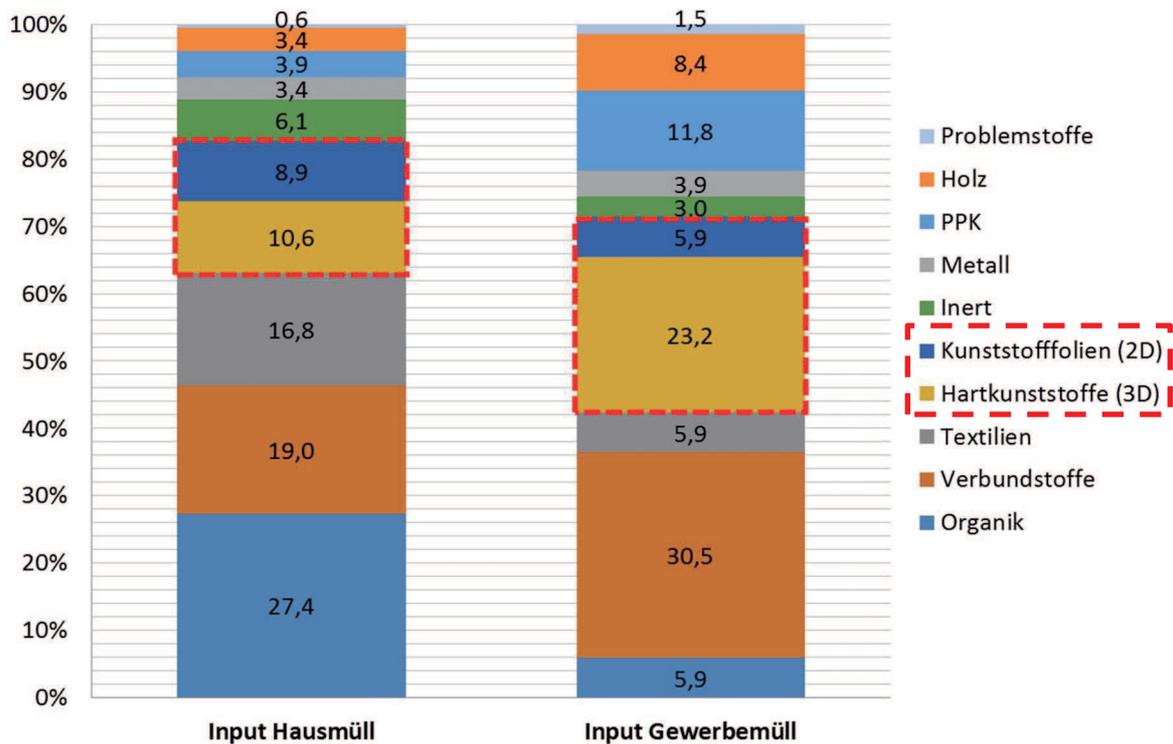


Abbildung 38: Gegenüberstellung der Ergebnisse der manuellen Sortieranalyse des gemischten Siedlungsabfalls unterschiedlicher Herkunft [61]

Betreffend des Kunststoffgehaltes beider Abfälle kann festgehalten werden, dass jener mit ca. 30 % im Gewerbemüll höher ist, wie im Hausmüll mit rd. 20 %. Der gewichtete **Mittelwert** beider Fraktionen beträgt, ausgehend vom oben angegebenen Verhältnis, für den **Kunststoffgehalt 21,4 M-%**. Da in die Fraktionen Kunststofffolien (2D) und Hartkunststoffe (3D) sortiert wurde, kann festgestellt werden, dass der Gehalt an Hartkunststoffen in diesem Fall mehr als doppelt so hoch wie im Hausmüll ist.

Ein weiteres Ergebnis ist, dass der Folienanteil im Gewerbemüll um 3 % geringer ist, als im Vergleich zum Hausmüll. Wobei ein zusätzlicher Kunststoffanteil in der Verbundfraktion erwartet werden kann, da z.B. durch die Zerkleinerung im Behandlungsprozess Verbunde aufgeschlossen werden könnten.

An dieser Stelle muss angeführt werden, dass die Zusammensetzung des gemischten Siedlungsabfalls, welche hier festgestellt wurde, keinesfalls einen allgemein gültigen Schluss zulässt. Die Zusammensetzung dieser Abfallfraktion ist stark heterogen und kann stark schwanken. Dabei sind Faktoren wie Anfallsort (Haus- oder Gewerbemüll), geographische Herkunft des Abfalls, Jahreszeit, Sammelsystem u.v.m. zu berücksichtigen.

Auf Grund der Tatsache, dass diese Werte, ebenso wie die aus der Literatur erhobenen Sortierdaten, aus der Steiermark des Jahres 2014 stammen, können die beiden einander gegenüber gestellt und verglichen werden (siehe Tabelle 19). Dennoch wird an dieser Stelle darauf hingewiesen, dass die nachfolgend angeführten Sortierergebnisse von der jeweiligen Sortiermethode und vom Sortierer selbst abhängig sind. Daher ist ein direkter, kritischer Vergleich nur schwer möglich.

Tabelle 19: Vergleich der Sortierergebnisse mit Literaturdaten

Fraktionen	Literatur	Sortieranalyse		
	Anteil M-%	Hausmüll M-%	Gewerbemüll M-%	Mittelwert M-%
Kunst- und Verbundstoffe	21,6	19	30,5	21,3
Hartkunststoffe (3D)		10,6	23,2	13,12
Kunststofffolien (2D)		8,9	5,9	8,3
Textilien	8,9	16,8	5,9	14,62
PPK	12,5	3,9	11,8	5,48
Feinfraktion kleiner 20 mm	9,1	-	-	-
Hygieneartikel	9,5	-	-	-
Inertstoffe	6,2	6,1	3	5,48
Glas	4,7	-	-	-
Metall	4,6	3,4	3,9	3,5
Problemstoffe	0,9	0,6	1,5	0,78
Organik	17,7	27,4	5,9	23,1
Holz	-	3,4	8,4	4,4
Sonstiges	4,3	-	-	-

EBS-Bestandteile

Der in Tabelle 19 dargestellte Vergleich zeigt deutliche Abweichung der einzelnen Fraktionen zueinander. Betreffend der Kunststofffraktion wurden deutlich höhere Gehalte bei der Sortieranalyse festgestellt, als in der Literatur angegeben wurden.

### Rejekt

Zur Erhebung der Abfallzusammensetzung und für Vergleichszwecke wurde an drei Rejektfraktionen unterschiedlicher Herkunft eine händische Sortieranalyse im Labor durchgeführt. Die Sortierergebnisse sind der nachfolgenden Tabelle 20, sowie Abbildung 39 zu entnehmen.

Tabelle 20: Ergebnisse der händischen Sortieranalysen der Rejekte unterschiedlicher Herkunft

Fraktion	Zopfrejekt M-%	Papierrejekt M-%	Kartonrejekt M-%
Kunststoff	38,5	45,6	53,0
PPK	53,2	42,2	35,4
Textil	4,0	1,4	4,2
Sortierrest	2,1	0,0	6,5
Holz	1,8	5,4	0,0
Metall	0,4	3,0	0,0
Inert	0,0	2,5	0,0
Naturfasern	0,2	0,0	1,0

Beim Vergleich der drei Rejekte ist auffällig, dass die Anteile **Kunststoff (39 % - 53 %)** und PPK (35 % - 53 %) sehr hoch ist. Der hohe Kunststoffgehalt erklärt sich beispielsweise durch den Einsatz von Verpackungsfolien, Fehlwürfen, Materialverbunden, Sichtfenstern in Papierverpackungen und ähnlichen. Der Kunststoffanteil im Rejekt kann Schwankungen unterworfen sein und hängt von einer Vielzahl an Faktoren ab. Einige Beispiele hierfür sind:

- Optionale Durchführung einer Vorsortierung bei der Folien entfernt werden,
- Herkunft des Altpapiers (Haushalt oder Industrie),
- Verhältnis Karton zu Papier im Altstoffstrom,
- Lieferant und
- Charge.

Der hohe PPK-Anteil ist bedingt durch das kontinuierliche Abziehen der Verunreinigungen aus dem Pulper. Dabei bleiben noch nicht aufgelöste Papier-/Kartonstücke an den Verunreinigungen haften und werden mitausgetragen. Interessant ist, dass der Metallgehalt aller Rejekte sehr niedrig ist, obwohl in der Literatur und bei Expertengesprächen vermerkt wird, dass dieser für Zopf-Rejekt meistens ca. 50 M-% beträgt. Primäre Ursache für den hohen Metallgehalt sollten die für die Bindung der Altpapierballen eingesetzten Metalldrähte sein. Dass der Metallgehalt in diesem Fall so gering ist (max. 3 %) ist damit zu erklären, dass die Probenahme nach der Zerkleinerung und Metallabscheidung durchgeführt wurde. Eine andere Ursache für den geringen Metallanteil könnte eine vor dem Pulper erfolgte Entdrahtung sein.

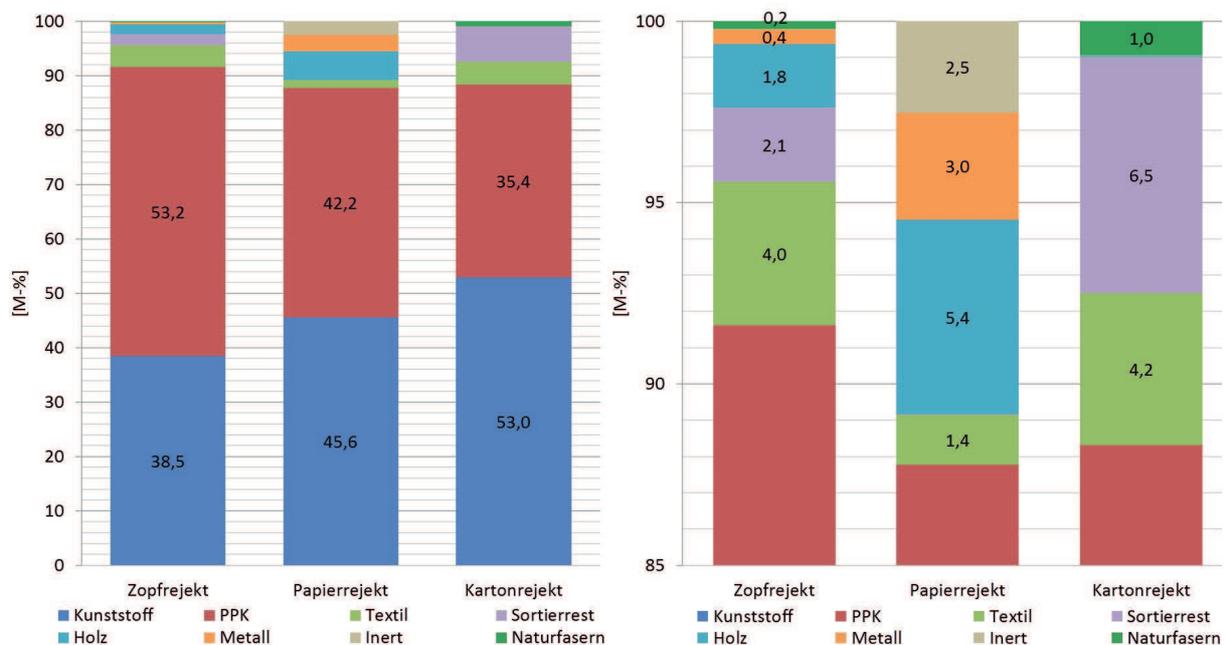


Abbildung 39: Ergebnisse der manuellen Sortieranalyse von Rejekten unterschiedlicher Herkunft; Links: Summe der Ergebnisse; Rechts: Detail 85 M-% bis 100 M-%

An dieser Stelle muss angeführt werden, dass die Zusammensetzung der Rejekte, welche hier festgestellt wurde, keinesfalls einen allgemein gültigen Schluss zulässt. Die Zusammensetzung dieser Abfallfraktion kann stark schwanken. Dabei sind Faktoren wie Anfallsort, geographische Herkunft des Abfalls, Jahreszeit, eventuelle Vorsortierung, u.v.m. zu berücksichtigen.

Die Fotodokumentation der manuellen Sortierung zu allen drei Fraktionen befindet sich im Anhang.

### Deponiegut - Hollabrunn und Allerheiligen

Zur Abschätzung des realen Rohstoffpotentials in Deponien wurden im Projekt „Landfill Mining Österreich“ unter der Leitung von Frau Tanja Wolfsberger mittels händischer Sortieranalysen

das abgegrabene Deponiegut zweier Massenabfalldeponien (Hollabrunn und Allerheiligen) fraktioniert. [27] Die Ergebnisse dieser Sortieranalysen wurden für diese Arbeit übernommen, da mittels Literaturrecherche keine konkreten Daten zum Kunststoffgehalt in Deponien erhoben werden konnten. Die Sortierergebnisse beider Massenabfalldeponien sind der nachfolgenden Abbildung 40 zu entnehmen.

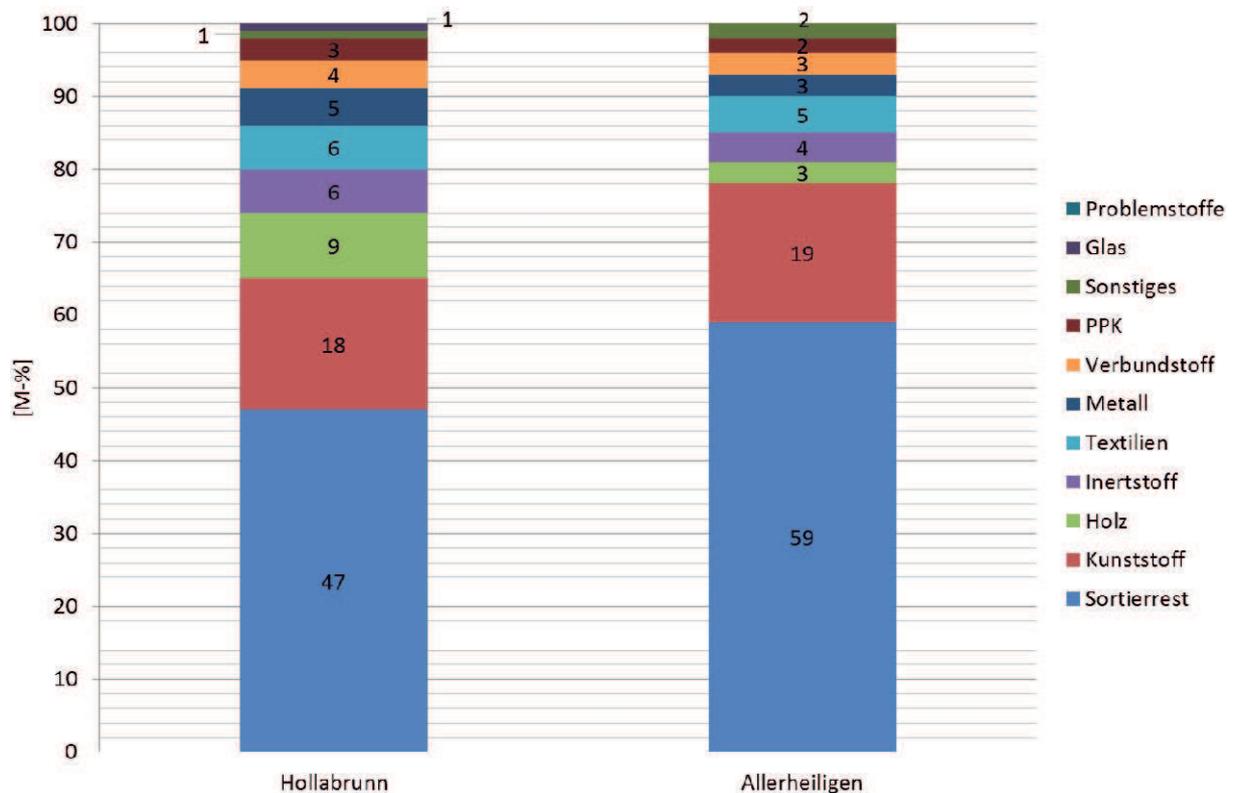


Abbildung 40: Ergebnisse der manuellen Sortieranalyse des Deponiegutes [27]

Die Sortierergebnisse zeigen, dass die Zusammensetzung beider Deponieproben ähnlich ist. Der sehr hohe Sortierrest (47 % und 59 %) beider Proben, ist durch den Feinanteil erklärbar. Die größte, sortierbare Fraktion waren die Kunststoffe. Der **Kunststoffgehalt** betrug bei der Probe aus der Deponie **Hollabrunn 18 %** und bei der Probe aus der Deponie **Allerheiligen 19 %**. Die einzige sortierte Fraktion, welche einen signifikanten Unterschied zwischen den Proben aufweist, ist die Holzfraktion (9 % - Hollabrunn und 3 % - Allerheiligen). Die übrigen Sortierfraktionen wiesen einen Gehalt von max. 6 % auf.

An dieser Stelle muss angeführt werden, dass die Zusammensetzung des Deponiegutes, welche hier festgestellt wurde, keinesfalls einen allgemein gültigen Schluss zulässt. Die Zusammensetzung von Deponiegut ist stark heterogen und kann stark schwanken. Dabei sind Faktoren, wie Ablagerungsgut, Zeitraum der Ablagerung, evtl. Vorbehandlung, Deponieart, Sammelsystem, u.v.m., sowie bereits vor der Deponierung anfallende Einflussfaktoren zu berücksichtigen.

### LFM-Fractionen

Zur Bestimmung der stofflichen Zusammensetzung der LFM-Fractionen, welche für einen Recyclingprozess interessant sein könnten, wurden diese ebenfalls händisch sortiert. Dafür wurden wie in Kapitel 5.4 erklärt, zwei durch trockenmechanische Aufbereitung des Deponiegutes aus der Massenabfalldeponie Hollabrunn erhaltene Fraktionen (2D- und 50-80 mm Fraktion) verwendet. Da angenommen werden kann, dass beide Fraktionen gemeinsam in die Aufbereitung gegeben werden und das Verhältnis beider Fraktionen zueinander (2D : 50 - 80 mm  $\cong$  2 : 1) [27] bekannt ist, wird der gewichtete Mittelwert angegeben.

Die Ergebnisse der Sortieranalysen sind der nachfolgenden Tabelle 21, sowie Abbildung 41 zu entnehmen.

*Tabelle 21: Ergebnisse der händischen Sortieranalysen der LFM-Fractionen*

Fraktion	2D-Material M-%	50-80 mm M-%	Mittelwert M-%
Kunststoff	30,3	22,1	27,6
Sortierrest	24,6	25,5	24,9
Inert	11,5	34,3	19,1
Verbund	13,9	8,2	12,0
Textil	14,0	3,3	10,5
Holz	4,5	3,3	4,1
Metall	1,1	3,3	1,8

Die Sortieranalyse zeigt, dass ein moderater Kunststoffgehalt (30 % und 22 %) in beiden LFM-Fractionen enthalten ist. Dies wurde schon bei der optischen Begutachtung des Probematerials vermutet. Der hohe Sortierrest von ca. 25 % beider Proben erklärt sich durch den hohen mineralischen Feinanteil der Proben, dessen Korngröße zu klein für eine händische Sortierung ist, sowie durch den hohen Zersetzungsgrad des Materials.

Die drittgrößte Fraktion bildet das Inertmaterial (12 % - 34 %), welches sich im Wesentlichen aus Steinen und Glas zusammensetzt. Verbunde und Textilien waren deutlich mehr in der 2D-Fraktion zu finden, was auf Grund der Form dieser Produkte und der Funktionsweise des Ballistikseparators erklärbar ist. Der Holz- und Metallanteil der LFM-Fractionen liegt jeweils unter 5 %. Ursache für den geringen Metallgehalt ist, dass eine Eisenabscheidung bereits in der trockenmechanischen Vorbehandlung erfolgte.

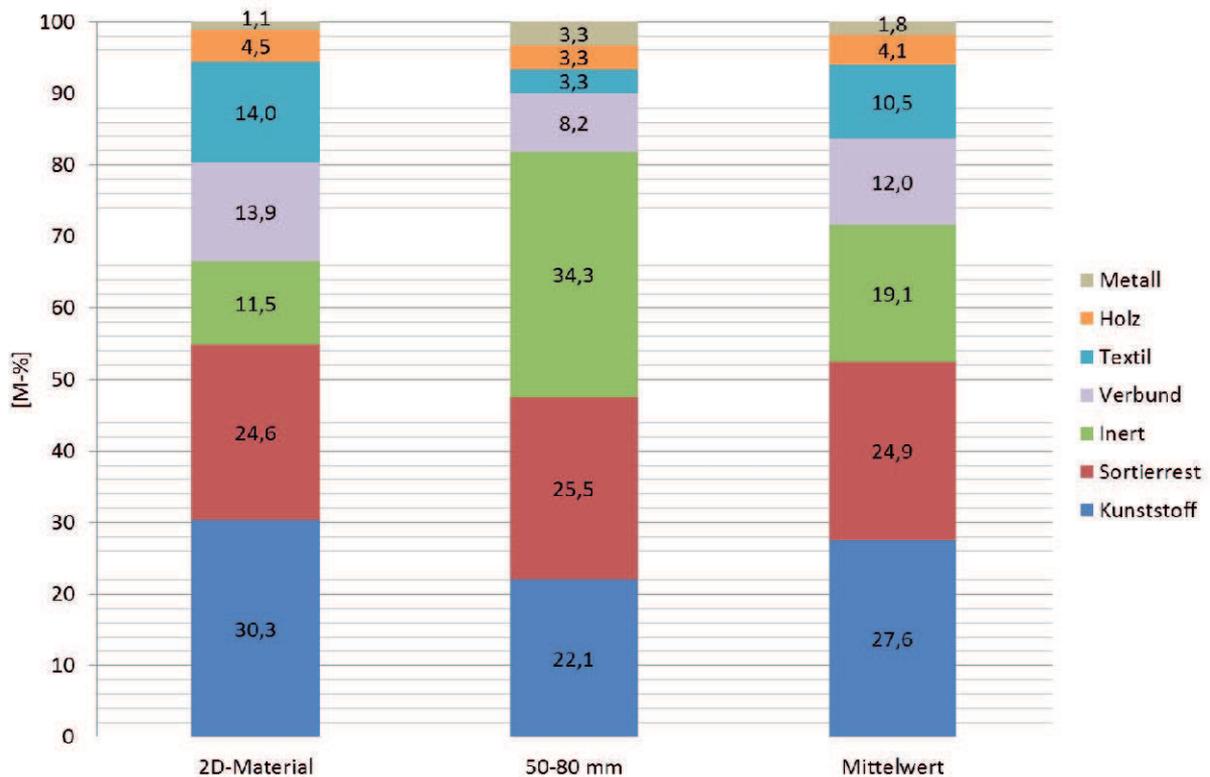


Abbildung 41: Ergebnisse der manuellen Sortieranalyse der zwei LFM-Fractionen

Für die Aufbereitung wird davon ausgegangen, dass beide LFM-Fractionen gemeinsam aufbereitet werden. Daher kann auf Grund der Sortierergebnisse für dieses Material ein gewichteter Mittelwert für den **Kunststoffanteil** von **ca. 28 M-%** angenommen werden.

Das manuelle sortieren der LFM-Fractionen wurde durch die starke Verschmutzung (z.B. oberflächliche Anhaftungen) des Materials sehr erschwert. Zur Veranschaulichung sind nachfolgend die Fotos beider Urproben, sowie die daraus sortierten Kunststofffraktionen abgebildet (vgl. Tabelle 22). Die gesamte Fotodokumentation der sortierten Fraktionen beider LFM-Proben ist im Anhang aufgeführt.

*Tabelle 22: Urproben sowie sortierte Kunststofffraktionen beider LFM-Proben*



Unsortierte Probe des 2D-Materials



Kunststoff



Unsortiertes Material (50-80 mm)



Kunststoff

## Zusammenfassung

Die Ergebnisse aller mittels händischer Sortierung untersuchten Fraktionen sind zusammengefasst der nachfolgenden Tabelle 23 zu entnehmen.

*Tabelle 23: Auflistung aller Ergebnisse der händischen Sortierung*

<b>Abfallfraktion</b>	<b>Bestimmter Kunststoffanteil M-%</b>	<b>Anmerkung</b>
<i>Gemischter Siedlungsabfall</i>	21	Gewichteter Mittelwert
- Hausmüll	20	
- Gewerbemüll	17	
<i>Rejekt-Fraktionen</i>		
- Zopf	39	
- Papier	46	
- Karton	53	
<i>Deponiegut</i>		
- Hollabrunn	18	
- Allerheiligen	19	
<i>LFM-Fraktionen</i>	28	Gewichteter Mittelwert
- 2D	30	
- 50-80 mm	22	

Wie durch Literaturangaben und Expertengespräche bereits erwartet, konnten für die Rejekt-Fraktionen die höchsten Kunststoffanteile (39 M-%, 46 M-%, 53 M-%) festgestellt werden. Die LFM-Fraktion weist im Durchschnitt 28 M-% Kunststoffanteil auf. Den geringsten und einen zueinander ähnlichen Kunststoffgehalt weisen die Deponiegut-Fraktionen mit 18 M-% und 19 M-% und der gemischte Siedlungsabfall mit 17 M-% und 20 M-% auf.

### 6.1.3 Ergebnisse der Dichtentrennung im Schwerfeld

Nachfolgend werden die Ergebnisse der Dichtentrennung im Schwerfeld (Schwimm-Sink-Sortierung) der Proben aufgelistet und diskutiert. Ziel dieses Verfahrens war es, das theoretische Polyolefinpotential der gewählten Abfälle abschätzen zu können. Die Schwimm-Sink-Sortierung wurde bei allen Proben, wie in Kapitel 5.5 beschrieben, durchgeführt. Alle angegebenen Werte sind in Massenprozent (M-%) angegeben.

#### LVP-Fraktionen

Wie im Kapitel 5.4 angegeben, wurden dem Projektteam „Plastic Reborn“ von der Firma LVP 2 drei Proben für die Analysen zur Verfügung gestellt. Bei diesen Proben handelt es sich um sekundäre Abfälle, welche bei der LVP-Sortierung anfallen und sind folgenden Fraktionen zuzuordnen:

- SN 91207 (Leichtfraktion aus der Verpackungssammlung),
- SN 57119 (Kunststofffolien) und
- SN 57118 (Kunststoffemballagen und –behältnisse).

Die SSS dieser drei Fraktionen wurde im Rahmen des Projektes in einer Bachelorarbeit [48] durchgeführt. Die Ergebnisse dieser drei Fraktionen sind nachfolgend (vgl. Abbildung 42) angeführt.

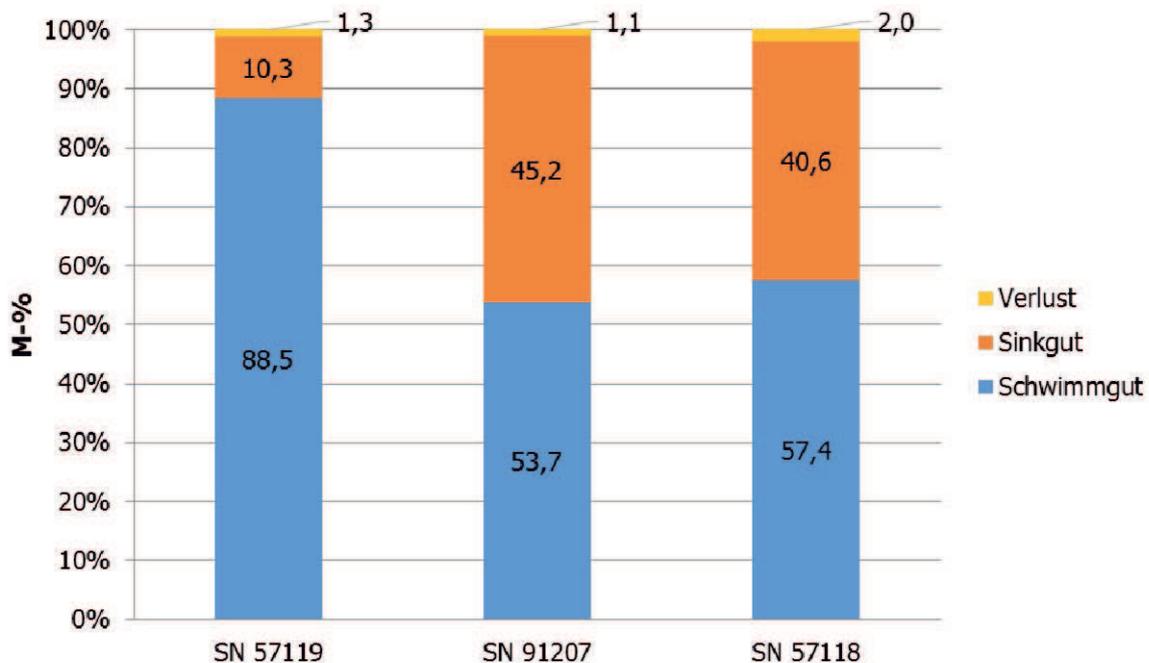


Abbildung 42: Ergebnisse der Schwimm-Sink-Sortierung aller drei Fraktionen aus der LVP-Sortierung [48]

Es kann angenommen werden, dass das Schwimmgut ungefähr dem PO-Gehalt entspricht, da optisch keine Verunreinigungen oder Störstoffe (z.B. durch geschäumte Kunststoffe) feststellbar waren. Somit kann festgestellt werden, dass die Folienfraktion mit ca. 89 % den höchsten PO-Gehalt aufweist. Den zweithöchsten PO-Gehalt mit ca. 57 % wies die Fraktion der Kunststoffemballagen und -behältnisse auf. Es wurden höhere Werte vermutet, da es sich laut LVP-Sortierer bei dieser Fraktion vorwiegend um eine HDPE-Fraktion handeln sollte. Die MKF weist nach diesem Sortierverfahren mit ca. 54 % einen ebenso hohen PO-Anteil auf.

Die Sinkfraktionen setzten sich aus PPK, Holz, Textilien, Kunststoffen, Schlamm, sowie geringen Anteilen Inertmaterial und Metallen zusammen. Die Verluste (max. 2 %) waren bei allen drei Fraktionen sehr gering.

Es kann zusammenfassend gesagt werden, dass sich neben der **Folienfraktion** (ca. **89 % PO-Gehalt**) auch die beiden anderen Fraktionen mit einem **PO-Gehalt** von ca. **54 %** und ca. **57 %** für eine weitere Aufbereitung und Rückgewinnung der PO-Fraktion eignen.

### EBS-Fraktion aus der Aufbereitung gemischter Siedlungsabfälle

Zur Bestimmung des PO-Gehaltes wurde nicht der gemischte Siedlungsabfall selbst, sondern die aus dessen Aufbereitung erhaltene EBS-Fraktion verwendet. Grund dafür ist, dass der gemischte Siedlungsabfall immer in einer MBA oder Splittinganlage behandelt wird und die daraus erhaltene, kunststoffreiche EBS-Fraktion bisher nur für die thermische Verwertung Verwendung findet. Die SSS dieser EBS-Fractionen wurde ebenso wie die LVP-Fractionen im Rahmen des Projektes in einer Bachelorarbeit [48] durchgeführt. Das Ergebnis der SSS ist in

der nachfolgenden Abbildung 43 dargestellt. Da bei dieser Fraktion im Schwimmgut optisch ein signifikanter Anteil an Holz und PPK zu erkennen war, wurde das Schwimmgut händisch nachsortiert. Die dabei erhaltene Holz/PPK-Fraktion wurde als drittes Segment im Diagramm (vgl. Abbildung 43) dargestellt.

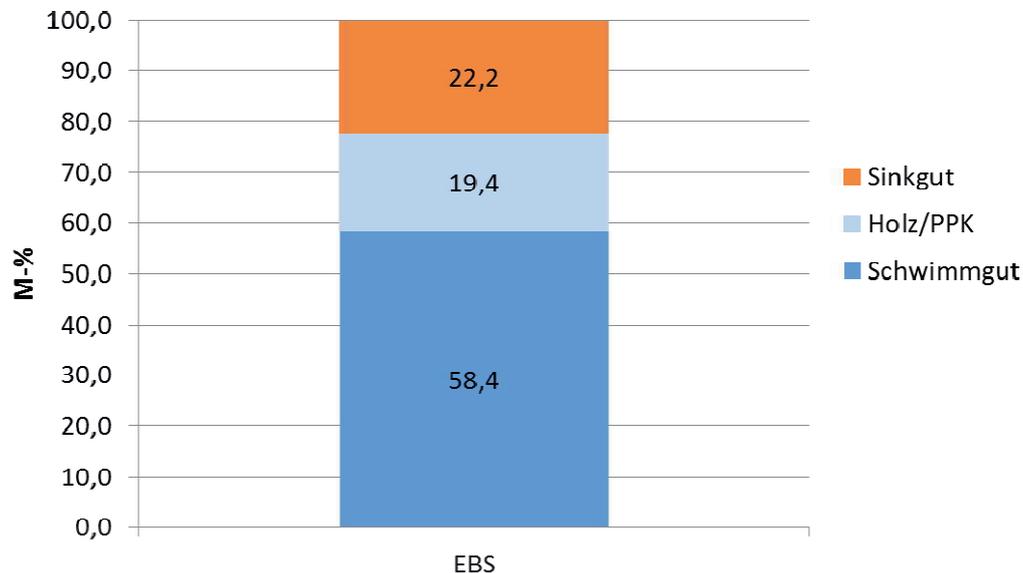


Abbildung 43: Ergebnisse der Schwimm-Sink-Sortierung einer EBS-Fraktionen [48]

Die SSS ergab einen **potentiellen Polyolefingehalt** von **58 M-%**. Ein solch hoher Wert wurde auf Grund der optischen Begutachtung der Probe im Vorfeld erwartet. In der Sinkfraktion wurde vorwiegend PPK, sowie Textilien vorgefunden. Verluste konnten bei der SSS dieser Fraktion keine festgestellt werden.

### Rejekt

Für die Erhebung des PO-Potentials des Abfallstroms Rejekt wurden wie im Kapitel 5.4 beschrieben, drei Rejekte unterschiedlicher Herkunft analysiert:

- Rejekt aus dem Altpapieraufbereitungsprozess einer Papierfabrik (Firma B),
- Rejekt aus dem Altkartonaufbereitungsprozess einer Kartonfabrik (Firma F) und
- Zopf-Rejekt eines Entsorgungs-/Aufbereitungsbetriebs (Firma A).

Die Rejektproben zeigten augenscheinlich eine starke Inhomogenität und setzten sich aus unterschiedlichsten Materialien zusammen. Diese besitzen unterschiedliche Dichten und wiesen teilweise stark variierende Korngrößen auf. Ein wesentliches Problem, das sich bei der SSS ergab, ist, dass nicht nur Polyolefine im Wasser aufschwimmen, sondern auch andere Materialien, wie z.B. Holz, Verbundmaterialien, Schaumstoffe und bestimmte Textilien, welche ebenso eine geringe Dichte besitzen. Ein zusätzlicher Umstand, der eine präzise Auftrennung erschwerte, war die zum Teil starke Komprimierung der einzelnen Materialien, die durch die schlammartigen, eingetrockneten Papierfaserreste fest miteinander „verklebt“ waren und Agglomerate bildeten (siehe Abbildung 44).



Abbildung 44: Durch eingetrocknetes Fasermaterial verklebter Rejektbündel

Da wie bereits erwähnt, nicht nur Polyolefine im Wasser aufschwimmen und sich augenscheinlich überwiegend Holz und Textil als Störstoff im Schwimmgut befanden, wurden die großen Holz- und Textilstücke händisch aus dem Schwimmgut aussortiert (Schaumstoffe waren mengenmäßig vernachlässigbar). Da das Zopf-Rejekt auf eine Korngröße von 20 mm zerkleinert wurde, war hier ein Absortieren der Holz- bzw. Textilfraktion nicht möglich. Die SSS-Ergebnisse aller drei Rejektproben sind in Abbildung 45 dargestellt.

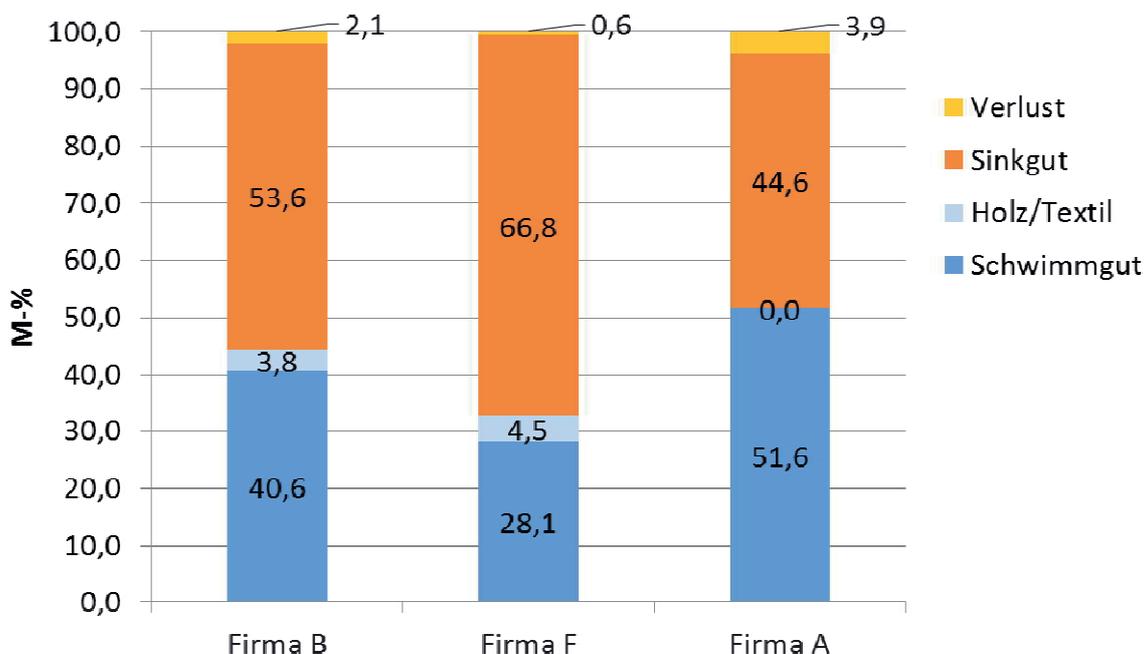


Abbildung 45: Ergebnisse der Schwimm-Sink-Sortierung der drei Rejektproben

Die Ergebnisse der Schwimm-Sink-Sortierung zeigen deutlich, dass die Rejekte, welche aus der **Kartonindustrie** (Firma F) stammen, einen geringeren Schwimmgutanteil aufweisen (**ca. 28 %**) als jene die aus der **Papierindustrie** (Firma B) stammen (**ca. 41 %**). Bei beiden Rejekten ist der Sinkgutanteil größer als die Schwimmgutausbeute. Das Sinkgut bestand vorwiegend aus Verbundmaterialien, PPK-Fasern, Metallkomponenten und diversen Kunststoffen. Die aussortierte Holz-/Textilfraktion aus dem Schwimmgut hat mit ca. 4 % und 4,5 % keinen großen Anteil am Schwimmgut. Die Verluste betragen bei beiden Proben max. 2 % und sind somit tolerierbar.

Das **Zopf-Rejekt** (Firma A) setzte sich zu ca. gleichen Teilen aus Schwimm- (**52 %**) und Sinkgut (45 %) zusammen. Die Verluste dieser Fraktion waren mit 4 % doppelt so groß wie

bei jenen aus Firma B. Dies ist vermutlich auf den deutlich größeren Zerkleinerungsgrad des Zopf-Rejektes zurückzuführen.

An dieser Stelle muss angeführt werden, dass der PO-Gehalt der Rejekte, welcher hier festgestellt wurde, keinesfalls einen allgemein gültigen Schluss zulässt. Die Zusammensetzung von Rejekten kann stark schwanken. Dabei sind Faktoren wie Herkunft (Haushalt bzw. Industrie), evtl. Vorsortierung, Anfallort, u.v.m. zu berücksichtigen. Die Fotodokumentation der mittels SSS sortierten Fraktionen aller drei Rejekte ist dem Anhang zu entnehmen.

### LFM-Fraktionen

Zur Abschätzung des PO-Gehaltes wurden ebenso die beiden Fraktionen (2D und 50 - 80 mm) aus der Aufbereitung des Deponiegutes Hollabrunn einer SSS unterzogen. Beide Fraktionen wiesen bei einer ersten optischen Begutachtung einen hohen Folienanteil, sowie Verschmutzungsgrad (Staubanhaftungen, Feingutanteil, usw.) auf. Ebenso wie bei den beiden zuvor diskutierten Proben (EBS und Rejekt) musste auch beim Schwimmgut der LFM-Fraktionen eine manuelle Nachsortierung des Schwimmgutes erfolgen. Dabei wurden alle erkennbaren Holz-, sowie Textilfragmente aus dem Schwimmgut manuell entfernt und als separate Fraktion ausgewertet. Da wie bereits erwähnt, das Verhältnis beider Fraktionen zueinander (2D : 50 - 80 mm  $\cong$  2 : 1) [27] bekannt ist, wird der gewichtete Mittelwert angegeben. Die Ergebnisse der SSS sind der nachfolgenden Abbildung 46 zu entnehmen.

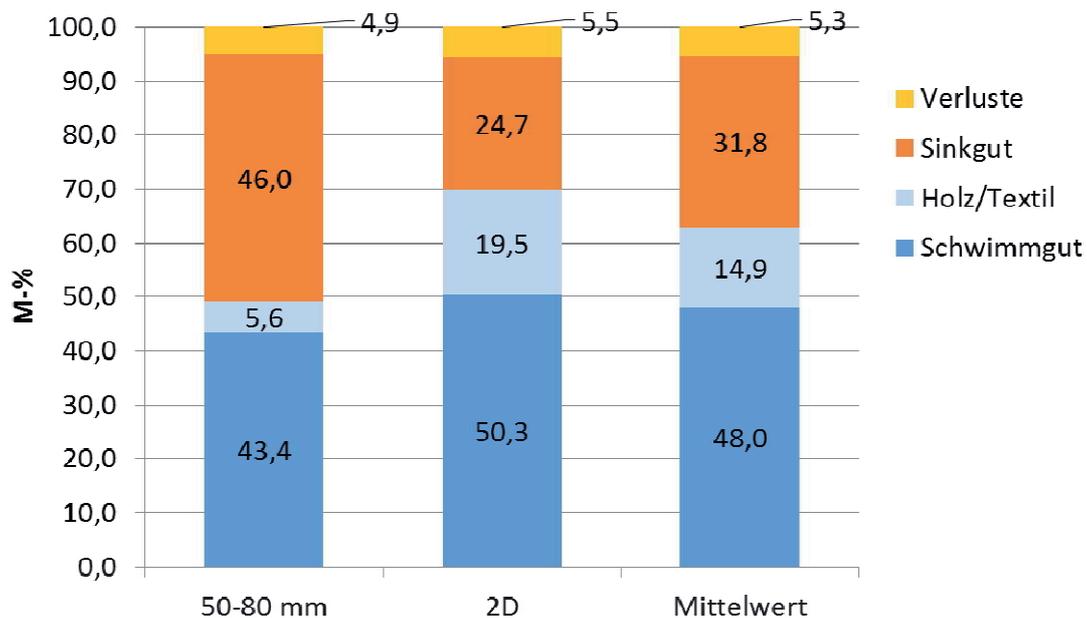


Abbildung 46: Ergebnisse der Schwimm-Sink-Sortierung der LFM-Fraktionen

Die Ergebnisse der SSS beider LFM-Fraktionen zeigen, dass beide Proben einen relativ hohen Schwimmgutanteil bzw. PO-Gehalt aufweisen. Dies wurde wie bereits erwähnt, auf Grund der optischen Probenbegutachtung erwartet. Dabei ist der vermutliche PO-Gehalt der 2D-Fraktion um ca. 7 % höher als bei der Fraktion 50 - 80 mm.

Ein signifikanter Unterschied zwischen den beiden Proben konnte bei der aus dem Schwimmgut manuell absortierten Holz-/Textil-Fraktion festgestellt werden. Diese war mit 19,5 % aus der 2D-Fraktion um knapp 14 % größer als bei der Fraktion 50 - 80 mm. Ursache

dafür ist, dass sich die flächigen Textilstücke durch die Trennung im Ballistikseparator in der 2D-Fraktion sammeln.

Ebenso konnte ein großer Unterschied der Sinkgutanteile (ca. 21 %) zwischen den Proben festgestellt werden, wobei dieser bei der Fraktion 50 – 80 mm mit 46 % am Größten war. Eine Ursache dafür ist, dass sich in dieser Fraktion vermehrt schweres Inertmaterial befand. Weitere Bestandteile des Sinkgutes beider Proben waren diverse Verbundkomponenten und Kunststoffe. Die Verluste waren bei beiden Proben ähnlich (4,9 % und 5,5 %) und lassen sich auf den vergleichsweise hohen Feingutanteil (Siebdurchgang verbleibt im Trennmedium) zurückführen.

Da bei diesen beiden LFM-Fraktionen davon ausgegangen werden kann, dass diese gemeinsam dem Aufbereitungsprozess zugeführt werden, kann ein gewichteter Mittelwert des **PO-Gehalts** von ca. **48 M-%** für die LFM-Fraktionen erwartet werden. Auch in diesem Fall darf kein allgemeiner Schluss gezogen werden. Es handelt sich bei diesem Ergebnis ebenso wie bei den anderen Ergebnissen vielmehr um einen Richtwert, der je nach Deponiegut stark schwanken kann.

Die Fotodokumentation der mittels SSS sortierten Fraktionen beider LFM-Fraktionen ist dem Anhang zu entnehmen.

### Zusammenfassung

Die Ergebnisse aller mittels Schwimm-Sink-Sortierung untersuchten Fraktionen sind zusammengefasst der nachfolgenden Tabelle 24 zu entnehmen.

*Tabelle 24: Auflistung aller Ergebnisse aus der Schwimm-Sink-Sortierung*

<b>Abfallfraktion</b>	<b>Bestimmter PO-Gehalt M-%</b>
<i>LVP-Fraktion [48]</i>	
- Kunststofffolien	89
- Leichtfraktion aus der Verpackungssammlung	54
- Kunststoffemballagen und -behältnisse	57
EBS [48]	58
<i>Rejekt-Fraktionen</i>	
- Zopf	52
- Papier	41
- Karton	28
<i>LFM-Fraktionen (gewichteter Mittelwert)</i>	<i>48</i>
- 2D	50
- 50-80 mm	43

Wie bereits aus der Literatur erwartet wurde, konnte für die LVP-Fraktion „Kunststofffolien“ mit Abstand der höchste PO-Gehalt (89 %) bestimmt werden. Der zweithöchste PO-Gehalt wurde mit 58 M-% bei den EBS ermittelt. Ein solcher Wert wurde bereits auf Grund von Expertengesprächen erwartet. Ein ähnlicher PO-Gehalt konnte für die verbleibenden LVP-Fraktionen mit 57 M-%, sowie 54 M-%, bestimmt werden. Der PO-Anteil für die LFM-Fraktionen wurde mit 48 M-% ermittelt. Der geringste PO-Gehalt mit ca. 28 M-% und 41 M-% wurde für die Rejekt-Fraktionen Karton und Papier festgestellt. Dies war ein unerwartetes

Ergebnis, da für diese Fraktion auf Grund der Expertengespräche ein deutlich höherer PO-Gehalt erwartet wurde. Das Zopf-Rejekt ergab einen mittleren PO-Gehalt von 52 M-%.

### **6.2 Bewertung der Aufbereitungslinien**

In diesem Kapitel werden die Aufbereitungslinien beider Recyclingoptionen einander gegenübergestellt und miteinander verglichen. Da einige Aufbereitungslinien für das werkstoffliche Recycling zum Teil nur theoretisch sind und in stark vereinfachter Form in dieser Arbeit abgebildet werden, stehen auch keine Daten, die einen Vergleich ermöglichen würden, für diese Anlagen zur Verfügung. Es kann also kein quantitativer, sondern lediglich ein qualitativer Vergleich erfolgen.

#### **Vergleich der trockenmechanischen Aufbereitungslinien**

Obwohl beide Aufbereitungslinien nach dem trockenmechanischen Prinzip arbeiten und die gleichen internen Prozessschritte (Zerkleinern, abtrennen von Feingut und Störstoffe, sowie Aufkonzentration der Zielfraktion(en)) aufweisen, unterscheiden sich die eingesetzten Aufbereitungsanlagen wesentlich voneinander. Ein Grund dafür ist, dass jede Anlage für den aufzubereitenden Abfallstrom und den gewünschten Output aufgebaut und ausgelegt wird. Reale Anlagen unterscheiden sich noch zusätzlich durch ihre individuelle Entwicklungsgeschichte, sodass man i.d.R. kaum eine zweite baugleiche, Aufbereitungslinie finden wird.

Ein wesentliches Unterscheidungskriterium ist, dass für die Aufbereitung der vier Abfallströme für das werkstoffliche Recycling jeder Abfallstrom eine separate trockenmechanische Aufbereitung erfährt, wohingegen für das rohstoffliche Recycling eine Aufbereitungslinie für alle vier Abfallströme genügt. Ein Grund dafür ist, dass die Anforderungen an die Qualität bzw. Sortenreinheit der Outputfraktionen unterschiedlich sind. So genügt es für das rohstoffliche Recycling als Output der trockenmechanischen Aufbereitung eine aufkonzentrierte PO-Fraktion zu generieren.

Der Sortieroutput aus den jeweiligen Aufbereitungslinien für das werkstoffliche Recycling ist hingegen in die aufkonzentrierten Fraktionen PE, PP und Folien aufgeteilt, wodurch neben zusätzlichen Aggregaten (z.B. Sichter) auch NIR-Sortiermodule notwendig werden. Auf Grund dieser Tatsache steigt teilweise die Komplexität dieser Anlage an und reicht im einfachsten Fall von fünf (für Rejekte) bis zu 15 Aufbereitungsaggregaten (für Deponiegut). Im Vergleich dazu ist die Komplexität der trockenmechanischen Aufbereitung für das rohstoffliche Recycling mit nur vier Aggregaten als vergleichsweise gering einzustufen.

Zusammenfassend kann gesagt werden, dass die Aufbereitungslinie für das rohstoffliche Recycling auf Grund der geringeren Anforderungen an den Outputstrom einfacher aufgebaut ist und für alle Abfallströme gleichermaßen Anwendung findet.

#### **Vergleich der nassmechanischen Aufbereitung**

Das Aufgabegut unterscheidet sich hier primär hinsichtlich der Sortenreinheit. Der Aufbereitungsanlage für das werkstoffliche Recycling werden vorab aufkonzentrierte PE bzw. PP-Ballen zugeführt, während ein ebenso aufkonzentrierter PO/PS-Mix als loses Stückgut der rohstofflichen Aufbereitungslinie aufgeben wird. Beide Inputströme müssen einen entsprechend hohen Anteil der Zielfraktion (Überprüfung in der Wareneingangskontrolle) sowie eine Korngröße von max. 20 mm aufweisen.

Die prinzipielle Vorgehensweise beider nassmechanischen Linien ist in diesem konkreten Fall sehr ähnlich. Die erste Reinigung sowie die Abtrennung von Störstoffen erfolgt in beiden Anlagen in einem nassarbeitenden Aggregat. Anschließend erfolgt in beiden Linien die zweite Wasch- bzw. Trennstufe. In dieser werden anhaftende Verunreinigungen und Störstoffe abgetrennt sowie die Zielfraktion aufkonzentriert. Dabei erfolgt in beiden Verfahren die Abtrennung der Polyolefine nach dem Prinzip der Dichtentrennung in Wasser als Trennmedium. Daran anschließend folgt für beide Aufbereitungslinien eine Abtrennung der Zielfraktion vom Wasser bzw. ein Trocknungsschritt. Am Ende der Aufbereitung für das werkstoffliche Recycling könnte einerseits zur Qualitätssicherung bzw. andererseits zur Sortierung nach Farben zusätzlich ein mehrstufiges NIR-Modul folgen.

Ebenso wie das aufgegebenene Inputmaterial, unterscheidet sich auch das generierte Outputmaterial hinsichtlich der gestellten Anforderungen für den jeweiligen Folgeprozess (Extrusion bzw. ReOil). So müssen beispielsweise zusätzlich zur geforderten Korngröße, Grenzwerte für Störstoffgehalte und Feuchtigkeit eingehalten werden. Das detaillierte Eigenschaftsprofil der Outputströme ist in Tabelle 26 im nachfolgenden Kapitel 6.3 angegeben.

Zusammenfassend kann festgestellt werden, dass die beiden Aufbereitungsanlagen einen ähnlichen Aufbau und somit auch vergleichbare Komplexität (jeweils ca. fünf Aggregate) aufweisen. Auf Grund der unterschiedlichen Aggregate in beiden Linien konnte beim Vergleich der Energieverbräuche sowie der CO<sub>2</sub>-Emissionen beider Anlagen ein signifikanter Unterschied festgestellt werden. Die entsprechenden Werte, sowie deren Vergleich sind der nachstehenden Tabelle 25 zu entnehmen. Da ein geringerer Energieverbrauch sowie geringere CO<sub>2</sub>-Emissionen als vorteilhaft zu beurteilen sind, wurde der Bewertungsfaktor 1 für diese Beurteilung den niedrigeren Werten zugeteilt. Die Erklärung zu den Bewertungsfaktoren als Vergleichswerkzeug ist dem nachfolgenden Kapitel 6.3 zu entnehmen.

*Tabelle 25: Energieverbrauch und CO<sub>2</sub>-Emissionen als Vergleichswerte*

<b>Kriterium</b>	<b>nassmechanische Aufbereitung [39]</b>	<b>Bewertungs-faktor</b>	<b>Plastic Reborn [39]</b>	<b>Bewertungs-faktor</b>
Energieverbrauch	1,768 GJ/t	0,043	0,076 GJ/t	1
CO <sub>2</sub> -Emissionen	11,967 kg CO <sub>2</sub> /t	0,635	7,599 kg CO <sub>2</sub> /t	1
<b>Mittelwert</b>		<b>0,339</b>		<b>1</b>

Aus den angegebenen Werten und Bewertungsfaktoren der vorangestellten Tabelle 25 ist ersichtlich, dass die Aufbereitungsanlage Plastic Reborn einen deutlich geringeren Energieverbrauch sowie geringere CO<sub>2</sub>-Emissionen aufweist. Die Ursachen dafür sind die energie-aufwendigeren Aggregate in der nassmechanischen Aufbereitungslinie für das werkstoffliche Recycling. Beispielsweise erfolgt die Vorreinigung in diesem Fall mit heißem Waschwasser und die abschließende Trocknung ausschließlich in einem Zentrifugaltrockner mit einem durchschnittlichen Energieverbrauch von 0,117 GJ/t und durchschnittlichen CO<sub>2</sub>-Emissionen von 6,67 kg CO<sub>2</sub>/t.

### 6.3 Bewertung der Hauptaggregate

In diesem Kapitel werden die Hauptaggregate beider Recyclingoptionen einander gegenübergestellt und miteinander verglichen.

Bei den beiden Hauptaggregaten handelt es sich für das werkstoffliche Recycling um das in Kapitel 4.1.2 beschriebene Extrudersystem und um die thermochemische Konversion (ReOil Verfahren) für den rohstofflichen Recyclingweg, welche in Kapitel 4.2.2 im Detail beschrieben wird.

Für den nachfolgenden Vergleich wird die ReOil Anlage, welche derzeit nur als Versuchsanlage existiert, auf einen Durchsatz von 200.000 t/a (Volllast) hochskaliert. Um einen Vergleich dieser beiden Anlagen überhaupt zu ermöglichen, wird für beide Anlagen als Bezugsgröße derselbe Durchsatz in Tonnen pro Jahr vorausgesetzt. Hierfür wurde für eine bessere Vergleichbarkeit anstelle der geforderten 200.000 t/a für die großtechnische ReOil Anlage, 219.000 t/a unter Volllast angenommen. Der Nutzungsgrad beider Anlagen wurde mit 85 % festgelegt. Damit ergibt sich für die ReOil Anlage ein Durchsatz von 186.150 t/a. Um mit den Extrudern diesen Durchsatz im Jahr erreichen zu können, wurde der größte Extruder der Baureihe (INTAREMA 2021 TVEplus) der Firma EREMA mit einer durchschnittlichen Ausstoßleistung von 2.500 kg/h gewählt. Ein Extruder dieser Baureihe würde somit unter Volllast 21.900 t/a Ausstoßleistung erzielen. Unter Berücksichtigung des Nutzungsgrades von 85 %, ergibt sich eine Ausstoßleistung von 18.615 t/a für eine Extruderlinie. Um den Durchsatz der ReOil Anlage erreichen zu können, müssen demnach zehn Extruderlinien der oben genannten Baureihe betrieben werden. Diese zehn Extruderlinien werden entsprechend der Sortiererergebnisse der Inputströme auf die Kunststofftypen folgendermaßen verteilt:

- 3 x PP Linien
- 2 x PE-HD Linien
- 3 x PE-LD Linien
- 2 x PE-LLD Linien

Diese Überlegungen sind jedoch rein theoretisch, da sich die marktführenden Betriebe in der Kunststoffrecycling-Branche in Österreich in einem Durchsatzbereich von 30.000 t/a bis 60.000 t/a bewegen. Eine Ausnahme stellt die Firma Sky Plastic Recycling and Commerce GesmbH dar, welche in den kommenden Jahren das Produktionsvolumen auf 75.000 t/a anheben wird. Um dieses erhöhte Produktionsvolumen zu realisieren, wird neben baulichen Erweiterungen und einer Erhöhung der Mitarbeiterzahl auch der 3-Schichtbetrieb von fünf Tagen pro Woche auf sieben Tage pro Woche umgestellt.

Für die Durchführung der Bewertung werden Bewertungsfaktoren angewandt. Der Bewertungsfaktor kann dabei einen Wert zwischen 0 und 1 annehmen und entspricht dabei einem Prozentwert zwischen 0 % und 100 %. Als Ausgangsbasis wird dabei bei jedem Parameter der (normativ betrachtet) bessere Wert mit dem Bewertungsfaktor 1 angenommen und der schlechtere Wert wird in Relation dazu errechnet.

In dieser Arbeit muss der Bewertungsfaktor mancher Kriterien z.B. auf Grund der mangelnden Datenlage angenommen bzw. geschätzt werden. Dies wird bei den jeweiligen Kriterien angegeben und in den nachfolgenden Tabellen mit einem Stern gekennzeichnet. Für die abschließende Bewertung wird der Durchschnitt aller Bewertungsfaktoren des Extruders sowie des ReOil Verfahrens gebildet und diese beiden einander gegenübergestellt. Um den Einfluss der angenommenen Bewertungsfaktoren zu untersuchen, wird zum Abschluss dieses Kapitels eine Sensitivitätsanalyse durchgeführt.

Im Zuge dieser Arbeit ergaben sich für den Vergleich beider Anlagen nachfolgend aufgelistete Vergleichsparameter bzw. -kriterien. Das Ergebnis hängt von der Parameterauswahl ab.

### Input

Die Anforderungen an das eingesetzte Inputmaterial (Einsatzspezifikationen) sind teilweise unterschiedlich. Die Einsatzspezifikationen, welche zur Bewertung beider Verfahren herangezogen werden können, sind Tabelle 26 zu entnehmen.

*Tabelle 26: Für die Bewertung herangezogene Einsatzspezifikationen des Inputmaterials*

Einsatzspezifikationen	Extruder [33]	Bewertungsfaktor	ReOil [39]	Bewertungsfaktor
Max. Feuchtegehalt	10 %	0,67	15 %	1
Min. Wertstoffgehalt	98 %	0,65	92 %	1
Max. PVC-Anteil	0,1 %	0,05	2 %	1
Max. Verunreinigungen	2-3 %	0,5	5 %	1
Korngröße	< 300 mm	1	< 20 mm	0,07
Sortenreinheit	JA	0,5*	NEIN	1

Der max. Feuchtigkeitsgehalt, welchen die Inputmaterialien aufweisen dürfen, kann beim ReOil Verfahren höchstens 15 % betragen, während für den Extrusionsprozess nur 10 % zulässig sind. Dies ermöglicht für die thermochemische Konversion eine höhere Anlagenflexibilität und daher wird der Bewertungsfaktor 1 zugewiesen.

Ebenso verhält es sich beim min. Wertstoffgehalt, welcher beim ReOil Verfahren lediglich 92 % betragen muss. Daraus ergibt sich, dass ein deutlich höherer Grad an Verunreinigungen und PVC-Gehalt für die thermochemische Konversion zulässig ist, wodurch eine geringere Sortiergenauigkeit gefordert ist.

Bei der Korngröße des Inputmaterials bietet die Extruderlinie der Firma Erema den Vorteil, dass diese primär durch den Abstand des Förderbandes zum Metalldetektor auf rd. 300 mm begrenzt ist. Folien können auch als Endlosware zugeführt werden. Dies bietet im Vergleich zum ReOil Verfahren, welches eine Korngröße kleiner 20 mm vorschreibt, einen erheblichen Vorteil, da ein Zerkleinerungsschritt eingespart werden kann.

In Bezug auf die geforderte Sortenreinheit (Extruder: 98 %; ReOil: 92 %) wird in dieser Arbeit von einer sortenreinen Verarbeitung der PO-Typen im werkstofflichen Recycling ausgegangen. Dies ist für das ReOil Verfahren jedoch keine Anforderung, da ein PO/PS-Mix als Inputstrom einen ähnlichen Output in ähnlicher Qualität liefert, als würde nur PP oder PE zugeführt werden. Der Bewertungsfaktor mit 0,5 wurde in diesem Fall abgeschätzt.

### Kosten und Wartungsaufwand

Die Investitionskosten für eine, wie in Kapitel 4.1.2 beschriebene Extruderlinie belaufen sich durchschnittlich auf rd. 200.000 € [33]. Die Kosten für den Bau der ReOil Anlage werden laut Angaben der OMV Refining & Marketing GmbH auf mehr als 10 Mio. € [39] geschätzt. Die angegebenen Kosten beziehen sich ausschließlich auf die Kernaggregate. Kosten für Lager, Fundament, Infrastruktur, usw. wurden hier nicht miteinberechnet. Ein weiterer interessanter Vergleichswert wären die Betriebskosten beider Anlagen. Da jedoch keine Daten über die Betriebskosten der ReOil-Anlagen vorliegen, kann hier kein Vergleich angestellt werden.

Der Wartungsaufwand eines einzelnen Extruders wird mit 1 angenommen, da es sich um ein Aggregat handelt, welches gewartet werden muss. Es wurde hier die Vereinfachung angenommen, dass Schneidverdichter, Extruder und Granuliertvorrichtung ein Aggregat bzw. eine Extruderlinie bilden. Bei der ReOil Anlage wird ein Wert von 5 geschätzt, da es sich um min. fünf sehr unterschiedliche Aggregate (Extruder, Mischer- und Filtereinheit, Rohrreaktor, Stripperkolonne und Trennbehälter) handelt, welche gewartet werden müssen und somit der fünffache Wartungsaufwand zu erwarten ist. Die Bewertung der genannten Vergleichsparameter ist in Tabelle 27 aufgeführt.

Tabelle 27: Kosten und Wartungsaufwand als Vergleichswerte

Kosten	1 Extruder [33]	10 Extruder	Bewertungsfaktor	ReOil [39]	Bewertungsfaktor
Investitionskosten	200.000 €	2 Mio. €	1	>10 Mio. €	0,2
Wartungsaufwand	1	10	0,5	5	1

### Energieverbrauch, CO<sub>2</sub>-Emissionen und Umweltrelevanz

Der Energieverbrauch für die einzelne Extruderlinie beträgt durchschnittlich 0,27 kWh/kg bzw. 0,972 GJ/t [62]. Für die ReOil Anlage wurde der Energieverbrauch, wie in Tabelle 28 dargestellt, errechnet. Neben elektrischer Energie wird auch Öl und Gas zur Energieerzeugung für die Anlage eingesetzt. Zudem soll im ReOil Prozess mittels Gasturbine elektrische Energie generiert werden.

Tabelle 28: Berechnung des Energieverbrauchs für die ReOil Anlage [38]

ReOil	GJ/t	GJ/a
unterfeuerte Leistung	- 3,51	- 702.000
generierte elektrische Leistung	1,40	280.000
Bedarf elektrischer Leistung	- 0,56	- 112.000
Energiebedarf, der der „Plastic Reborn“ Anlage zugeordnet wird	0,05	10.000
<b>Summe</b>	<b>- 2,62</b>	<b>-524.000</b>

Die CO<sub>2</sub>-Emissionen einer einzelnen Extruderlinie betragen im Durchschnitt 55,447 kg CO<sub>2</sub>/t [62]. Für die ReOil Anlage wurden die CO<sub>2</sub>-Emissionen in Höhe von 128,93 kg CO<sub>2</sub>/t entsprechend der Tabelle 29 sowie Formel 6 berechnet. Für die Energiebereitstellung werden Misch- und Restgase, welche als Nebenprodukte in der Raffinerie entstehen, in zwei Heizkraftwerken verbrannt.

Tabelle 29: Aus Energieverbrauch berechnete CO<sub>2</sub>-Emissionen der ReOil Anlage [38]

Input Heizkraftwerke	[t CO <sub>2</sub> / t]	[GJ/t]	[t CO <sub>2</sub> /GJ]	Gasinput [t/a]
Mischgas	2,89	49,00	0,05908	90,1
Restgas	1,43	55,00	0,02597	38,2
Gewichteter Mittelwert			0,04922	

$$\begin{aligned}
 \text{CO}_2\text{-Emissionen:} & \quad \text{Gewichteter Mittelwert * Summe Energieverbrauch} & (6) \\
 & \quad 0,04922 \text{ t CO}_2/\text{GJ} \quad * 2,62 \text{ GJ/t} = 0,12893 \text{ t CO}_2/\text{t} \\
 & \quad \triangleq 128,93 \text{ kg CO}_2/\text{t}
 \end{aligned}$$

Beim Extrusionsprozess fällt neben den Anfahrabfällen auch der Filtrerrückstand als Abfallprodukt an. Dieser besteht überwiegend aus den abgefilterten Füllstoffen und kann daher unter der SN 57202 „Fabrikationsrückstände aus der Kunststoffherstellung und -verarbeitung (ausgestuft) entsorgt werden. Bei den Filtrerrückständen aus dem ReOil Prozess kann das nicht so einfach angenommen werden, da der Filtrerrückstand weitere Komponenten enthalten kann und zusätzlich mit dem Lösungsmittel durchtränkt ist. Da das eingesetzte Lösungsmittel nicht bekannt ist, kann hier keine Angabe über die Entsorgung oder eine evtl. Umweltrelevanz gemacht werden.

Die Bewertung der genannten Vergleichsparameter ist der nachfolgenden Tabelle 30 zu entnehmen.

*Tabelle 30: Energieverbrauch und CO<sub>2</sub>-Emissionen als Vergleichswerte*

Kriterium	Extruder	Bewertungs-faktor	ReOil	Bewertungs-faktor
Energieverbrauch	0,972 GJ/t	1	2,62 GJ/t	0,37
CO <sub>2</sub> -Emissionen	55,45 kg CO <sub>2</sub> /t	1	128,93 kg CO <sub>2</sub> /t	0,43

## Output

Am Ende des Extrudersystems bzw. der Compoundierlinie, wenn Zuschlagstoffe dem Material hinzugefügt werden, erhält man i.d.R. ein rieselfähiges, qualitätsgesichertes Kunststoffgranulat als Output. Das erhaltene Granulat wird in weiterer Folge als Endprodukt an kunststoffverarbeitende Betriebe weiterverkauft, um dort in den jeweiligen Anlagen (z.B. Spritzgussmaschine) zu neuen Produkten verarbeitet zu werden. Es ist auch möglich anstelle der Granuliertvorrichtung ein Werkzeug (z.B. Rohrkopf oder Profildüse) zu installieren, welches die Kunststoffschmelze direkt zu einem Endlosprodukt umformt. In diesem Fall müssten zusätzliche Kalibrier-, Kühl- und Konfektionierungsstationen nachfolgen.

Beim ReOil Verfahren werden zwei Produktfraktionen gewonnen. Ein leichtes und ein schweres Stripper-Produkt. Beide Produkte eignen sich für die Herstellung von Ethylen bzw. Propylen. Bis jedoch ein neuwertiges Polymer als verkaufsfertiges Produkt für die verarbeitende Industrie erhalten wird, sind noch weitere Prozesse bzw. Aggregate notwendig. Daher handelt es sich beim Output der thermochemischen Konversion um Zwischenprodukte, welche den Rohstoffkreislauf noch nicht vollständig schließen. Da ein Zwischenprodukt nicht den gleichen Wert wie ein Endprodukt aufweist, wird in Tabelle 31 der Bewertungsfaktor mit 0,5 angenommen.

Beim werkstofflichen Recycling sinkt mit jedem Recyclingzyklus die Materialqualität (Downcycling) und somit auch der erzielbare Marktwert. Gründe dafür sind z.B. Restverunreinigungen im Material und Materialalterung. Laut Rohstoffbörse vom Februar 2017 kostet eine Tonne Standardkunststoff als Neuware ca. 1.261 €. Für das Rezyklat bezahlt man

hingegen nur rd. 774 €/t (Durchschnittswert für Polyolefine). Dies entspricht einer Ersparnis von rd. 40 %. [63]

Welchen Wert die erhaltenen Zwischenprodukte aus dem ReOil Verfahren haben, kann auf Grund mangelnder Daten nicht abgeschätzt werden.

*Tabelle 31: Produkt als Vergleichswert*

	<b>Extruder</b>	<b>Bewertungs- faktor</b>	<b>ReOil</b>	<b>Bewertungs- faktor</b>
Output/Produkt	Endprodukt	1	Zwischenprodukt	0,5*

### Zusammenfassung

Nachfolgend werden nochmals alle Ergebnisse dieses Kapitels tabellarisch (vgl. Tabelle 32) aufgeführt und das Endergebnis interpretiert.

*Tabelle 32: Zusammenfassung und Gegenüberstellung aller Kriterien*

<b>Kriterium</b>	<b>1 Extruder</b>	<b>10 Extruder</b>	<b>Bewertungs- faktor</b>	<b>ReOil</b>	<b>Bewertungs- faktor</b>
Max. Feuchtegehalt	10 %		0,67	15 %	1
Min. Wertstoffgehalt	98 %		0,65	92 %	1
Max. PVC-Anteil	0,1 %		0,05	2 %	1
Max. Verunreinigungen	2-3 %		0,5	5 %	1
Korngröße	< 300 mm		1	< 20 mm	0,07
Sortenreinheit	JA		0,5*	NEIN	1
Investitionskosten	200.000 €	2 Mio. €	1	> 10 Mio. €	0,2
Wartungsaufwand	1	10	0,5	5	1
Energieverbrauch	0,972 GJ/t		1	2,62 GJ/t	0,37
CO <sub>2</sub> -Emissionen	55,447 kg CO <sub>2</sub> /t		1	128,93 kg CO <sub>2</sub> /t	0,43
Produkt	Endprodukt		1	Zwischenprodukt	0,5*
<b>Mittelwert</b>			<b>0,72</b>		<b>0,69</b>

Der Mittelwert der jeweiligen Bewertungsfaktoren ergibt für die zehn Extruderlinien einen Wert von 0,72. Dieser ist um lediglich 4 % höher als der Mittelwert des ReOil Prozesses (0,69). Anhand dieses Ergebnisses, lässt sich keine bevorzugte Verwendung einer der beiden Recyclingoptionen für eine Durchsatzmenge von 200.000 t/a ableiten. Es müssen für eine konkretere Aussage weitere Daten erhoben und einander gegenüber gestellt werden.

Da für diesen Vergleich einige Werte des ReOil Verfahrens lediglich grobe Hochrechnungen aus der Hochskalierung der Anlage sind, kann nicht davon ausgegangen werden, dass dieser

Vergleich belastbar ist. Für einen belastbaren Vergleich muss bei Vorliegen genauerer (z.B. für jedes Aggregat), sowie weiterer Daten (z.B. Betriebskosten) erneut ein Vergleich mit Bewertung durchgeführt werden.

Um den Einfluss der beiden frei gewählten Bewertungsfaktoren zu ermitteln, wurde eine Sensitivitätsanalyse durchgeführt. Bei der Variation des ersten freien Bewertungsfaktors (Sortenreinheit Extruder) in einem Bereich von 0,1 bis 0,9 ergab sich ein Schwankungsbereich von 0,68 - 0,75 für den Mittelwert der Bewertungsfaktoren der Extruderanlage. Der Schwankungsbereich bei Variation (Bereich: 0,1 bis 0,9) des zweiten Bewertungsfaktors (Produkt ReOil) betrug 0,65 - 0,72. Daraus kann geschlossen werden, dass beide Faktoren einen ähnlichen Einfluss auf das Ergebnis haben und gegebenenfalls das Gesamtergebnis stark beeinflussen.

## 7 Zusammenfassung und Ausblick

Auf Grund der stetig steigenden Mengen an altkunststoffhaltigen Abfällen sowie der zukünftig zu erfüllenden Recyclingquoten (55 M-% für Kunststoffverpackungsabfälle vorgesehen bis 2025) wird es notwendig werden, dass auch neue Abfallströme, welche bisher für andere Behandlungsanlagen bestimmt sind (z.B. thermische Verwertung) geeigneten Recyclinganlagen zugeführt werden müssen. Dafür wird es nicht ausreichen, nur bestehende Recyclingsysteme an die neuen Herausforderungen anzupassen, sondern es müssen auch neue Konzept entwickelt werden. Eventuell ist ein Erreichen der zukünftigen Recyclingziele auch nur durch die intensive Weiterentwicklung rohstofflicher Verwertungsoptionen vom Pilot- zum Industriemaßstab möglich.

### 7.1 Ausgewählte Abfallströme

Ein Ziel dieser Arbeit war es, vier potentielle Abfallströme für ein Polyolefinrecycling auf ihre Eignung für die beiden betrachteten Recyclingoptionen (rohstofflich oder werkstofflich) zu untersuchen, wodurch die Forschungsfrage 1 wie folgt beantwortet werden kann.

***Frage 1:** Welche der beiden Verwertungsoptionen ist basierend auf der Charakteristik des jeweiligen Abfallstromes zu bevorzugen?*

#### LVP

Leichtstoffverpackungen fallen in Österreich jährlich in großen Mengen an. Diese Abfallfraktion weist einen vergleichsweise geringen Verschmutzungsgrad auf, beinhaltet einen sehr hohen Folienanteil von 89 M-% sowie einen PO-Gehalt von über 50 M-%. Diese Ergebnisse lassen den Schluss zu, dass dieser Abfallstrom am besten für das **werkstoffliche Recycling** geeignet ist. Zusätzlich sind LVP-Sortieranlagen, welche geeignete Fraktionen, z.T. bereits sortenrein generieren, schon lange Stand der Technik.

Die Datenlage zu diesem Abfallstrom war gut und es konnten belastbare Ergebnisse ermittelt werden. Eine Vereinheitlichung des Sammelsystems für Österreich wäre für die gesamte Datenlage aller Abfälle, welche aus der getrennten Sammlung stammen, von Vorteil.

#### Gemischter Siedlungsabfall (Restmüll)

Der Abfallstrom gemischter Siedlungsabfall fällt unter den betrachteten Strömen mengenmäßig in Österreich am meisten an und weist einen moderaten (max. 25 M-%), aber z.T. verschmutzten, Kunststoffanteil auf. Jene Restmüllmengen, welche nicht direkt einer thermischen Verwertung zugeführt werden, werden nach dem aktuellen Stand der Technik in Splitting- oder mechanisch-biologischen Behandlungsanlagen so aufbereitet, dass eine heizwertreiche Mischkunststoff- bzw. EBS-Fraktion entsteht. Diese Fraktion weist entsprechend der Schwimm-Sink-Ergebnisse einen hohen PO-Anteil (58 M-%) auf. Diese Fraktion eignet sich grundsätzlich für **beide Recyclingverfahren** gleichermaßen, wobei in weiterführenden Forschungsarbeiten untersucht werden muss, ob und wie gut diese Fraktion auch praktisch in PP und PE sortierbar ist.

Ein Problem, welches sich bei der Datenerhebung stellte, war, dass keine aktuellen Daten bezüglich des Anteils von Gewerbemüll bzw. Hausmüll am Gesamtaufkommen des gemischten Siedlungsabfalls zu finden waren.

### **Reststoffe aus dem Altpapier- bzw. Altkartonrecycling**

Die jährlich anfallende Rejektmenge hängt von der schwankenden Einsatzmenge an Altpapier und Altkarton im Papierrecyclingprozess ab. Ebenso ist der im Rejekt enthaltene Kunststoffanteil Schwankungen unterworfen und weist einen PO-Anteil von ca. 40 M-% auf. Da diese Fraktion jedoch deutliche Verunreinigungen (z.B. Holz, Textil, PPK-Fasern) in der Schwimmfraktion zeigte, welche im werkstofflichen Recycling zu Problemen führen können, eignet sich dieser Abfallstrom eher für das **rohstoffliche Recycling**. Bei diesem Prozess ist auch der zulässige Maximalgehalt an Verunreinigungen (max. 5 %) höher als beim Extrusionsprozess (2 % - 3 %).

Die Erhebung der Datenlage gestaltete sich bei diesem Abfallstrom sehr schwierig, da kaum Literatur vorhanden war und auch die Fachexperten nur grobe Schätzwerte angeben konnten. In weiteren Forschungsarbeiten wäre der Fokus auf die Datenerhebung und die Bestimmung des Schwankungsbereichs zu legen.

### **Deponiematerial**

Das abgegrabene Deponiematerial eignet sich nicht für einen direkten Einsatz in einer Recyclinganlage. Es muss ähnlich wie bei der Aufbereitung der gemischten Siedlungsabfälle eine Splittung in geeignetere, kunststoffreiche Fraktionen erfolgen. Es hat sich gezeigt, dass mit Hilfe eines Ballistikseparators solch geeignete Fraktionen (2D sowie 50 - 80 mm) gewonnen werden können. Diese beiden LFM-Fraktionen weisen zwar einen starken Verschmutzungsgrad, aber auch einen für das Recycling ausreichend hohen Kunststoffgehalt auf. Des Weiteren kann z.B. auf Grund der langen Deponierungszeiten des Deponiegutes davon ausgegangen werden, dass eine Materialschädigung durch Alterung vorliegt. Daher ist dieser Abfallstrom nicht für ein werkstoffliches Recycling, sondern besser für das **rohstoffliche Recycling** geeignet. Da auch beim Deponiegut die Datenlage nicht zufriedenstellend war, ist es für zukünftige Projekte erforderlich, Untersuchungen an weiteren Deponiestandorten durchzuführen, um genauere Hochrechnungen über das Wertstoff- und Kunststoffpotential erstellen zu können.

### **Resümee**

Für die Zukunft müssen noch weitere polyolefinhaltige Abfallströme bzw. deren Fraktionen identifiziert und auf ihre Eignung für das Kunststoffrecycling untersucht werden (z.B. Sperrmüll). Es bietet sich auch an, die Datenerhebung auf den EU-Raum auszudehnen, um eine weitläufigere Potentialerhebung zu erhalten. Um eine noch genauere, belastbare Datenlage generieren zu können, müssen zusätzliche Analysemethoden (z.B. FTIR, NIR, usw.) zur Charakterisierung der PO-haltigen Kunststoffabfälle angewendet werden.

Die Abfallströme sollten in weiteren Forschungsarbeiten ebenso auf andere Altkunststoffsorten (z.B. PET, PA, PC, u.A.) untersucht werden, welche sich für ein Recycling eignen würden.

## 7.2 Behandlungslinien

Die untersuchten Abfallströme wurden für das Recycling einer geeigneten Vorbehandlung unterzogen. Dabei wurde das Ziel verfolgt, einen für das jeweilige Recyclingverfahren geeigneten Stoffstrom zu generieren. Inwieweit sich diese Vorbehandlungskette vom jeweiligen Recyclingsystem unterscheidet, ist vorwiegend vom zugeführten Abfallstrom abhängig. In diesem Zusammenhang war folgende Forschungsfrage zu beantworten:

**Frage 2:** *Worin unterscheiden sich die Aufbereitungslinien für das werkstoffliche und rohstoffliche Recycling und wie lautet das Ergebnis eines direkten Vergleichs?*

Ein wesentliches Unterscheidungskriterium ist, dass für die Aufbereitung für das werkstoffliche Recycling, jeder Abfallstrom eine eigene trockenmechanische Aufbereitung erfährt, wohingegen für das rohstoffliche Recycling eine Aufbereitungslinie für alle vier Abfallströme genügt. Weiters unterscheiden sich die beiden trockenmechanischen Anlagen in ihrer Komplexität bzw. Aggregatzahl z.T. stark voneinander. Auf Grund dieser Unterschiede ist ein direkter Vergleich ohne eine Verbesserung der Datenlage durch weitere Untersuchungen nicht möglich.

Da manche Aufbereitungslinien bereits dem Stand der Technik entsprechen, andere hingegen für diese Arbeit modelliert werden mussten, war eine genauere Datenerhebung mit den zur Verfügung stehenden Ressourcen nicht möglich. Für zukünftige Forschungsarbeiten müssen die in dieser Arbeit entworfenen Behandlungsanlagen im Detail modelliert sowie die Daten (z.B. Energieverbrauch, Anschaffungs- und Wartungskosten, usw.) der einzelnen Aggregate erhoben werden. Nur so kann ein genauerer Anlagenvergleich ermöglicht werden.

Die beiden nassmechanischen Aufbereitungsanlagen weisen im Vergleich zu den trockenmechanischen keine großen Unterschiede auf. Beiden Anlagen liegt die gleiche prinzipielle Vorgehensweise zu Grunde und auch der Komplexitätsgrad bzw. die Aggregatanzahl ist ähnlich. Da sich aber die verwendeten Aggregate selbst stark voneinander unterscheiden, erreicht beim Vergleich der Energieverbräuche sowie der CO<sub>2</sub>-Emissionen die nassmechanische Aufbereitungsanlage „Plastic Reborn“ bessere Werte.

Die nassmechanische Aufbereitung für das werkstoffliche Recycling ist bereits Stand der Technik, aber es existiert eine Vielzahl an unterschiedlichen Anlagenkonzepten, was die Datenerhebung erschwerte. Da die Einsicht in die meisten Anlagenbilanzierungen zudem kostenpflichtig ist und die finanziellen Ressourcen dafür nicht vorhanden waren, konnte keine detailliertere Datenbasis generiert werden. Die Anlage „Plastic Reborn“ existiert erst im Pilotmaßstab und wird derzeit weiter optimiert. Für zukünftige Betrachtungen müssen aktuelle Daten für einen Vergleich berücksichtigt werden.

Für die Aufbereitung von neuen sowie altbekannten Abfallströmen zur Generierung der Zielfraktion „Polyolefine“ wird es in Zukunft auch notwendig sein, neue Sortieraggregate zu entwickeln bzw. bestehende Systeme für die neuen Anforderungen zu adaptieren (z.B. Nachrüsten von NIR-Aggregaten).

### 7.3 Recyclingaggregate

Die aufbereiteten Zielfractionen erfahren eine Endbehandlung in den entsprechenden Recyclingaggregaten (Extruder bzw. ReOil). Je nach Verfahrensschema (werkstofflich oder rohstofflich) sind diese ganz unterschiedlich beschaffen. In diesem Zusammenhang, ist die dritte Forschungsfrage zu beantworten:

**Frage 3:** *Welches der beiden Hauptaggregate (Extruder und ReOil Verfahren) des werkstofflichen und rohstofflichen Recyclingprozesses ist für den großindustriellen Einsatz besser geeignet?*

Diese Forschungsfrage lässt sich anhand der Gegenüberstellung beider Prozesse nur mit einer quantitativen Bewertung beantworten. Für den Überblick ist die durchgeführte Bewertung für beide Aggregate der nachstehenden Tabelle 33 zu entnehmen.

*Tabelle 33: Ergebnisse der Bewertung beider Hauptaggregate*

Kriterium	1 Extruder	10 Extruder	Bewertungs-faktor	ReOil	Bewertungs-faktor
Max. Feuchtegehalt	10 %		0,67	15 %	1
Min. Wertstoffgehalt	98 %		0,65	92 %	1
Max. PVC-Anteil	0,1 %		0,05	2 %	1
Max. Verunreinigungen	2-3 %		0,5	5 %	1
Korngröße	< 300 mm		1	< 20 mm	0,07
Sortenreinheit	JA		0,5*	NEIN	1
Investitionskosten	200.000 €	2 Mio. €	1	> 10 Mio. €	0,2
Wartungsaufwand	1	10	0,5	5	1
Energieverbrauch	0,972 GJ/t		1	2,62 GJ/t	0,37
CO <sub>2</sub> -Emissionen	55,447 kg CO <sub>2</sub> /t		1	128,93 kg CO <sub>2</sub> /t	0,43
Produkt	Endprodukt		1	Zwischenprodukt	0,5*
<b>Mittelwert</b>			<b>0,72</b>		<b>0,69</b>

Mit den für diese Arbeit zur Verfügung stehenden Daten konnte keine bevorzugte Verwendung einer der beiden Recyclingoptionen für eine Durchsatzmenge von 200.000 t/a abgeleitet werden. Es müssen für eine konkretere Aussage weitere Daten erhoben und einander gegenüber gestellt werden. Zudem hat die Variation der beiden frei gewählten Faktoren (Sortenreinheit - Extruder und Produkt - ReOil) einen nicht vernachlässigbaren Einfluss auf das Ergebnis.

Die Datenerhebung stellte sich auf Grund der kooperativen Interviewpartner als vergleichsweise einfach heraus. Dennoch stammen die Daten der ReOil Anlage aus groben Hochrechnungen. Sobald die Planung der Großanlage abgeschlossen ist, sollte diese Gegenüberstellung überarbeitet werden.

Wo die Zukunft des Kunststoffrecyclings liegt, hängt letztendlich von vielen Faktoren ab. Aber die veränderte gesetzliche Lage in Europa wird der Anstoß für neue Entwicklungen sein. Das Thema „Kunststoffrecycling“ stellt daher auch in Zukunft noch ein großes und herausforderndes Forschungsgebiet dar.

## 8 Verzeichnisse

### 8.1 Literaturverzeichnis

- [1] MENGES, G. ; MICHAELI, W. ; BITTNER, M.: *Recycling von Kunststoffen*. München : Hanser, 1992
- [2] PLASTICSEUROPE: *Plastics - the Facts 2016 : An analysis of European plastics production, demand and waste data*
- [3] POMBERGER, Roland ; SARC, Renato ; LORBER, Karl: Dynamic visualisation of municipal waste management performance in the EU using Ternary Diagram method, Bd. 61. In: *Waste Management*, S. 558–571
- [4] BUNDESMINISTERIUM FÜR LAND- UND FORSTWIRTSCHAFT, UMWELT UND WASSERWIRTSCHAFT: *BUNDES-ABFALLWIRTSCHAFTSPLAN 2017 TEIL 1*. Wien, 2017
- [5] DOMININGHAUS, Hans ; ELSNER, Peter ; EYERER, Peter ; HIRTH, Thomas: *Kunststoffe : Eigenschaften und Anwendungen ; mit 275 Tabellen*. 8., neu bearb. und erw. Aufl. Heidelberg [u.a] : Springer, 2012 (VDI-Buch)
- [6] RATIOFORM: *HDPE, LDPE, PP, PVC... und was sich dahinter verbirgt – eine Materialkunde*. URL <http://verpackungswelt.net/hdpe-ldpe-pp-pvc-und-was-sich-dahinter-verbirgt-eine-materialkunde/> – Überprüfungsdatum 2015-07-29
- [7] PLASTICKER: *Aktuelle Marktpreise für Commodities in Mittel- und Osteuropa*. URL [http://plasticker.de/preise/preise\\_ecebd.php](http://plasticker.de/preise/preise_ecebd.php) – Überprüfungsdatum 2017-02-14
- [8] MARTENS, Hans: *Recyclingtechnik : Fachbuch für Lehre und Praxis*. Heidelberg : Spektrum, Akad. Verl, 2011
- [9] KAISER, Wolfgang: *Kunststoffchemie für Ingenieure : Von der Synthese bis zur Anwendung*. 3. Aufl. München : Hanser, 2011
- [10] EYERER, Peter ; HIRTH, Thomas ; ELSNER, Peter: *Handbuch Polymer Engineering*. 1. Aufl. Berlin : Springer, 2007 ((VDI-Buch) Chemische Technik Verfahrenstechnik)
- [11] EHRENSTEIN, Gottfried W. ; PONGRATZ, Sonja: *Beständigkeit von Kunststoffen*. München : Hanser, 2007 (Edition Kunststoffe)
- [12] BUNDESMINISTERIUM FÜR LAND- UND FORSTWIRTSCHAFT, UMWELT UND WASSERWIRTSCHAFT: *Bundesrecht konsolidiert: Abfallwirtschaftsgesetz 2002 § 16, Fassung vom 12.09.2016* (idF v. 193 2013) (2016-09-12). URL [https://www.bmlfuw.gv.at/greentec/abfall-ressourcen/abfall-altlastenrecht/abfallwirtschaftsgesetz/awg\\_idgf.html](https://www.bmlfuw.gv.at/greentec/abfall-ressourcen/abfall-altlastenrecht/abfallwirtschaftsgesetz/awg_idgf.html) – Überprüfungsdatum 2017-03-09
- [13] EUROPÄISCHE UNION: Richtlinie 2008/98/EG des europäischen Parlaments und des Rates vom 19. November 2008 über Abfälle und zur Aufhebung bestimmter Richtlinien (in Kraft getr. am 22. 11. 2008). In: *Amtsblatt der Europäischen Union L 312/3*, 2008
- [14] HEIDI SCHMITT: *T wie "Thermisches Recycling"*. URL <http://laeufer-pro-umwelt.de/thermisches-recycling-sportbekleidung/> – Überprüfungsdatum 2015-03-18

- [15] EUROPÄISCHE UNION: *RICHTLINIE 2008/98/EG DES EUROPÄISCHEN PARLAMENTS UND DES RATES: Amtsblatt der Europäischen Union L 312/3*. URL [http://europa.eu/legislation\\_summaries/environment/waste\\_management/ev0010\\_de.htm#KEY](http://europa.eu/legislation_summaries/environment/waste_management/ev0010_de.htm#KEY). – Aktualisierungsdatum: 2009-03-04
- [16] BILITEWSKI, Bernd ; HÄRDITTE, Georg ; MAREK, Klaus: *Abfallwirtschaft : Handbuch für Praxis und Lehre*. 4., aktualisierte und erw. Aufl. Berlin : Springer, 2009
- [17] PROMENTE: *Recyclingtasche mit Reißverschluss*. URL [http://www.promente-shop.at/product\\_info.php/products\\_id/152](http://www.promente-shop.at/product_info.php/products_id/152) – Überprüfungsdatum 2014-12-04
- [18] SIMONAITIENE, Almante Batisaite ; FISCHER, Ramune Dudenaite ; SIMONAITIS, Tomas: Polyolefine als Füllstoff für Klebstoffe : Wiederverwertung von Abfällen aus PP und PE. In: *KU Kunststoffe*, S. 92
- [19] PLASTICSEUROPE: *Plastics - the Facts 2014/2015 : An analysis of European plastics production, demand and waste data*. URL <http://www.plasticseurope.org/Document/plastics-the-facts-20142015.aspx?FolID=2> – Überprüfungsdatum 2015-03-18
- [20] GEHRKE, Klaus ; LECHNER, Manfred D. ; NORDMEIER, Eckhard H.; K. Wittstock und S. Meyer, BASF SE, U. Schlotter und S. Cieplik, BKV GmbH (Mitarb.): *Makromolekulare Chemie : Ein Lehrbuch für Chemiker, Physiker, Materialwissenschaftler und Verfahrenstechniker*. 5. Aufl. Berlin [u.a.] : Springer Spektrum, 2014
- [21] BUNDESMINISTERIUM FÜR LAND- UND FORSTWIRTSCHAFT, UMWELT UND WASSERWIRTSCHAFT: *184. Verordnung: Verpackungsverordnung 2014* (in Kraft getr. am 22.Juli.2014) (22.Juli.2014). URL [https://www.ris.bka.gv.at/Dokumente/BgblAuth/BGBLA\\_2014\\_II\\_184/BGBLA\\_2014\\_II\\_184.pdf](https://www.ris.bka.gv.at/Dokumente/BgblAuth/BGBLA_2014_II_184/BGBLA_2014_II_184.pdf) – Überprüfungsdatum 2015-10-12
- [22] SKUBEL, CHRISTOPHER: *Kunststoffrecycling bei Sky Plastics*. Interviewt von Möllnitz Selina. 22.04.15
- [23] EUROPÄISCHE UNION: *Verordnung über das Europäische Abfallverzeichnis (Abfallverzeichnis-Verordnung - AVV)* (in Kraft getr. am 10. 12. 2001) (2001-12-10). URL <https://www.gesetze-im-internet.de/bundesrecht/avv/gesamt.pdf> – Überprüfungsdatum 08.03.17
- [24] BUNDESMINISTERIUM FÜR LAND- UND FORSTWIRTSCHAFT, UMWELT UND WASSERWIRTSCHAFT: *Verordnung des Bundesministers für Land- und Forstwirtschaft, Umwelt und Wasserwirtschaft über ein Abfallverzeichnis (Abfallverzeichnisverordnung)* (idF v. BGBl. II Nr. 498/2008) (2008-12-31). URL <https://www.bmlfuw.gv.at/greentec/abfall-ressourcen/abfall-altlastenrecht/awg-verordnungen/abfallverzeichnisvo.html> – Überprüfungsdatum 2017-03-08
- [25] STEINERT ELEKTROMAGNETBAU GMBH: *URL: <http://www.steinertglobal.com/grp/de/aktuelles/details/class-instead-of-mass-the-maxim-of-the-waste-disposal-company-huendgen-in-swisttal/>; Überprüfungsdatum: 03.03.2017*

- [26] HEINRICH SCHUBERT: *Handbuch der mechanischen Verfahrenstechnik*. 1. Aufl., 1. Nachdr. Weinheim : Wiley-VCH, 2008
- [27] TANJA WOLFSBERGER: *Landfill Mining : Beurteilung und Bewertung des Rohstoffpotentials und der Verwertbarkeit von Abfällen österreichischer Massenabfalldeponien*. Leoben, Montanuniversität Leoben, Lehrstuhl für Abfallverwertungstechnik und Abfallwirtschaft. Dissertation. 2006-02-01
- [28] MONTANUNIVERSITÄT LEOBEN: *Entwicklung nasser mechanischer Aufbereitungsverfahren zur Erhöhung der stofflichen Recyclingquote von Kunststoffen : Plastic Reborn*. pdf. – Leoben. 2014
- [29] VEREIN DEUTSCHER INGENIEURE (Hrsg.): *Aufbereitungstechnik beim Verwerten von Kunststoffen : Vom Abfall zum Werkstoff*. Düsseldorf : VDI-Verl., 1993 (Kunststofftechnik)
- [30] FLEISCHHACKER, Stephanie: *Stoffliche Verwertung von Abfällen : Einsatz der Nahinfrarot-Sortiertechnik im Bereich von Gewerbeabfällen*. Leoben, Montanuniversität Leoben, Institut für nachhaltige Abfallwirtschaft und Entsorgungstechnik. Masterarbeit. 2011-02-23
- [31] KRANERT, Martin (Hrsg.): *Einführung in die Abfallwirtschaft : Mit 131 Tabellen ; [mit Online-Service]*. 4., vollst. aktualisierte und erw. Aufl. Wiesbaden : Vieweg + Teubner, 2010 (Studium)
- [32] KARRAS, Wolf: *Vergleichende Normierende Betrachtung bei der Verwertung von Abfällen aus Kunststoffverkausverpackungen*. Berlin, 1999 (Schriftenreihe Kunststoff-Forschung 50)
- [33] AIGNER, MICHAEL: *Geeignete Extruderlinien für die Aufbereitung von komplexen Altkunststoffen*. Interviewt von Möllnitz Selina. Ansfelden, 02.05.2016
- [34] HOFFMANN, Harald: *Lindner reSource: Recycling agricultural film at a top quality level*. URL:[http://plasticker.de/Plastics\\_Article\\_144\\_Lindner\\_reSource\\_Recycling\\_agricultural\\_film\\_at\\_a\\_top\\_quality\\_level](http://plasticker.de/Plastics_Article_144_Lindner_reSource_Recycling_agricultural_film_at_a_top_quality_level) – Überprüfungsdatum 2015-03-18
- [35] BÜHRIG-POLACZEK, Andreas ; MICHAELI, Walter ; SPUR, Günter: *Handbuch Urformen*. [2. Aufl.]. München : Hanser, 2014 (Edition: Handbuch der Fertigungstechnik)
- [36] SCHEIRS, John ; KAMINSKY, W.: *Feedstock recycling and pyrolysis of waste plastics : Converting waste plastics into diesel and other fuels*. Chichester, UK, Hoboken, NJ : J. Wiley & Sons, 2006 (Wiley series in polymer science)
- [37] POMBERGER, Roland: *Recy & DepoTech 2016 : Recycling & Abfallverwertung, Abfallwirtschaft & Ressourcenmanagement, Deponietechnik & Altlasten, Sondersession : Tagungsband zur 13. Recy & DepoTech-Konferenz, Montanuniversität Leoben, Österreich, 8.-11. November 2016*. Leoben, 2016
- [38] HOFER, Wolfgang: *Verfahren und Vorrichtung zur energieeffizienten Aufbereitung sekundärer Lagerstätten*. OMV REFINING & MARKETING GMBH. Anmeldenr. A 632/2011, Österreich. 15.02.2013. Österreich. Veröffentlichungsnr. AT 511 772 A1 2013-02-15. IPC C10G 9/00; C08J 11/10

- [39] SCHÖFFL, Paul: *LCA-Vorlage ReOil-Verfahren, Verfahrensbeschreibung und Einsatz*. E-Mail. 2015-07-23. MÖLLNITZ, Selina; ARNBERGER, Astrid; SCHWARZ, Therese (Adressat)
- [40] CABKA GROUP GMBH: *Produkte*; Online: <http://cabka.com/at/de/m/produkte/#co2730>; Überprüfungsdatum: 03.03.2017
- [41] ELECTROLUX: *Staubsauger ZUSGREEN58*; <http://www.electrolux.ch/de-ch/vacuums-home-comfort/vacuum-cleaners/vacuum-cleaners/vacuum-cleaner/zusgreen58/#&gid=null&pid=1>; Überprüfungsdatum: 09.03.2017
- [42] ISLANDER: *Islander Fiesta "denk" Freizeitkajak*; Online: <https://www.denk-outdoor.de/freizeitkajak-denk?number=>; Überprüfungsdatum: 09.03.17
- [43] GREENTOYS: *Recycling Truck*; Online: <http://www.greentoys.com/green-toys-vehicles>; Überprüfungsdatum: 09.03.2017
- [44] GREENLOGIC: *Tacker*; Online: [https://www.amazon.de/dp/B004MLWZ5Q/ref=asc\\_df\\_B004MLWZ5Q40775387?smid=A1AK27ZZ6JREB9&tag=i-dexde-21&linkCode=df0&creative=22506&creativeASIN=B004MLWZ5Q&childASIN=B004MLWZ5Q](https://www.amazon.de/dp/B004MLWZ5Q/ref=asc_df_B004MLWZ5Q40775387?smid=A1AK27ZZ6JREB9&tag=i-dexde-21&linkCode=df0&creative=22506&creativeASIN=B004MLWZ5Q&childASIN=B004MLWZ5Q); Überprüfungsdatum: 09.03.2017
- [45] BOREALIS POLYOLEFINE GMBH: *Anlagen und Produkte der Borealis*; URL: <http://www.borealisgroup.com/de-AT/schwechat/Standort/standort/produktionsanlagen/>; Überprüfungsdatum: 09.03.2017
- [46] SCHUG, Hartmut ; EICKENBUSCH, Heinz ; MARSCHEIDER-WEIDEMANN, Frank ; ZWECK, Axel: *Zukunftsmarkt Technologie zur Stofferkennung und -trennung : Fallstudie im Auftrag des Umweltbundesamtes im Rahmen des Forschungsprojektes Innovative Umweltpolitik in wichtigen Handlungsfeldern*. Düsseldorf, Dezember 2007
- [47] ALTSTOFF RECYCLING AUSTRIA AG: *Leistungsreport 2014*; URL: [http://www.ara.at/uploads/tx\\_wxfilelist/ARA\\_Leistungsreport2014\\_WEB\\_A4.pdf](http://www.ara.at/uploads/tx_wxfilelist/ARA_Leistungsreport2014_WEB_A4.pdf); Überprüfungsdatum: 12.10.2015. Wien, April 2015
- [48] GILL, Johanna Andrea: *Charakterisierung der Kunststofffraktion verschiedener Abfallströme mittels FTIR*. Leoben, Montanuniversität Leoben, Lehrstuhl für Abfallverwertungstechnik und Abfallwirtschaft. Bachelorarbeit. 2016-09-29
- [49] MAGISTRATSABTEILUNG 48: *Mülltrennung*. URL <https://www.wien.gv.at/umwelt/ma48/beratung/muelltrennung/>. – Aktualisierungsdatum: 2016-03-23
- [50] BAUER, Beda Werner: *Sortieranalysen von Restmüll und Altstoffen: Untersuchungen zu den Verschmutzungen und Feuchteübergängen ausgewählter Stoffgruppen*. Wien, Universität für Bodenkultur Wien, Insitut für Wasservorsorge, Gewässerökologie und Abfallwirtschaft (IWGA). Diplomarbeit. 2002
- [51] SCHLÖGL, Thomas: *Umwelterklärung 2014 (V.2.0) : Burgenländischer Müllverband*. Oberpullendorf, April 2014

- [52] RABITSCH, Michael; BARTEL, Gerald (Mitarb.); FERA, Karin (Mitarb.); TSCHABUSCHNIG, Harald (Mitarb.) : *Kärntner Abfallbericht und Abfallwirtschaftskonzept : 3. Fortschreibung 2012*. 3. Fortschreibung. Klagenfurt am Wörthersee, September 2012
- [53] AMT DER NIEDERÖSTERREICHISCHEN LANDESREGIERUNG: *Niederösterreichische Restmüllanalyse und Detailanalyse der Feinfraktion 2010-2011*. Wien, Dezember 2011
- [54] OBERÖSTERREICHISCHER LANDESABFALLVERBAND: *Restmüllanalyse Oberösterreich 2013 : im Auftrag des OÖ. Landesabfallverbandes*. ARGE Abfallanalyse Oberösterreich 2013. Korneuburg, Wien, Mai 2014. – ARGE Abfallanalyse Oberösterreich 2013
- [55] HARATHER, K. ; BUCHNER, A. ; FAIST, V.: Restmüllanalysen in der Steiermark. In: POMBERGER, Roland (Hrsg.): *Abfallwirtschaft, Abfallverwertung und Recycling, Deponietechnik und Altlasten : Tagungsband zur 12. DepoTech-Konferenz, Montanuniversität Leoben, Österreich, 4. - 7. November 2014*. Leoben : Montanuniv, 2014, S. 131–134
- [56] AMT DER TIROLER LANDESREGIERUNG: *Restmüllanalysen Tirol 2010 : Im Auftrag Amt der Tiroler Landesregierung*. Korneuburg, Dezember 2010
- [57] ÖSTERREICHISCHES ÖKOLOGIE-INSTITUT: *Analyse von kommunalem Restabfall sowie von getrennt gesammelten biogenen Abfällen in Vorarlberg 2012 : Ergebnisse der Städte Bludenz, Dornbirn, Feldkirch und Hohenems*. Projekt im Auftrag des Umweltverband Vorarlberg und der Städte Bludenz, Dornbirn, Feldkirch, Hohenems. Korneuburg, August 2012. – Projekt im Auftrag des Umweltverband Vorarlberg und der Städte Bludenz, Dornbirn, Feldkirch, Hohenems
- [58] BUNDESMINISTERIUM FÜR LAND- UND FORSTWIRTSCHAFT: *Die Bestandsaufnahme der Abfallwirtschaft in Österreich : Statusbericht 2014*. Wien, Februar 2015
- [59] AUSTROPAPIER: *Die Statistik der Papierindustrie : Austropapier Branchenbericht 14/15*. URL:[http://www.austropapier.at/fileadmin/austropapier.at/dateiliste/Dokumente/36\\_Statistik\\_GESAMT\\_\\_v2\\_\\_Einzelseiten.pdf](http://www.austropapier.at/fileadmin/austropapier.at/dateiliste/Dokumente/36_Statistik_GESAMT__v2__Einzelseiten.pdf) – Überprüfungsdatum 23.03.17
- [60] BUNDESMINISTERIUM FÜR LAND- UND FORSTWIRTSCHAFT, UMWELT UND WASSERWIRTSCHAFT ÜBER DEPONIEEN: *Verordnung des Bundesministers für Land- und Forstwirtschaft, Umwelt und Wasserwirtschaft über Deponien* (in Kraft getr. am 29. 3. 2017) (2017-03-29). URL <https://www.ris.bka.gv.at/GeltendeFassung.wxe?Abfrage=Bundesnormen&Gesetzesnummer=20005653> – Überprüfungsdatum 2017-03-29
- [61] KREINDL, Gernot: *Technischer Endbericht zur FFG-Feasibility Studie 846412 : Stoffliche Verwertung von Hartkunststoffen aus Siedlungs- und ähnlichen Gewerbeabfällen*. erstellt für Anton Mayer Ges.m.b.H. Leoben, 11.05.2015. – erstellt für Anton Mayer Ges.m.b.H.
- [62] SHONFIELD, Peter: *LCA of Management Options for Mixed Waste Plastics : Final Report*. Juni 2008
- [63] PROBST, Thomas: *bvse-Marktbericht: Kunststoffe*. Bonn, 02.2017
- [64] *Wirbelstromabscheider*. URL <https://www.flickr.com/photos/38193896@N06/with/3512625090/> – Überprüfungsdatum 2015-07-21

- [65] BILITEWSKI, Bernd ; HÄRDTLE, Georg ; MAREK, Klaus: *Abfallwirtschaft : Eine Einführung*. Berlin [u.a.] : Springer, 1990
- [66] FEUCHTER, Michael: *Kunststoffrecycling - Kunststofftechnische Grundlagen*. Leoben, 2015
- [67] STEINERT ELEKTROMAGNETBAU GMBH: *STEINERT präsentiert sortenreine Trennung schwarzer Kunststoffe auf der IFAT 2016 : Steinert -Gruppe bringt neues optisches Sortiersystem UniSort BlackEye auf den Markt*. URL [http://www.steinertglobal.com/fileadmin/user\\_upload/germany/news/UniSort\\_BlackEye\\_Press\\_Release\\_DE.pdf](http://www.steinertglobal.com/fileadmin/user_upload/germany/news/UniSort_BlackEye_Press_Release_DE.pdf) – Überprüfungsdatum 02.04.17
- [68] ENGELKE, Nils: *Kunststoffrecycling: Effizient getrennt; URL: <http://www.ingenieur.de/UmweltMagazin/2015/Ausgabe-04-05/Abfall-Recycling/Kunststoffrecycling-Effizient-getrennt>; Überprüfungsdatum: 07.03.2017*. Vilsbiburg
- [69] KOMTECH GMBH: *TERMINATOR; URL: [https://www.komptech.com/fileadmin/komptech/brochures/Terminator\\_2016\\_D.pdf](https://www.komptech.com/fileadmin/komptech/brochures/Terminator_2016_D.pdf); Überprüfungsdatum: 27.02.2017 : Langsam laufender Universal-Müllzerkleinerer*. Frohnleiten
- [70] KOMTECH GMBH: *BALLISTOR; URL: [https://www.komptech.com/fileadmin/komptech/brochures/Ballistor\\_deu\\_0212.pdf](https://www.komptech.com/fileadmin/komptech/brochures/Ballistor_deu_0212.pdf); Überprüfungsdatum: 27.02.2017 : Stationärer Ballistikseparator*. Frohnleiten
- [71] SIEBTECHNIK GMBH: *Schwing-Setzmaschine; URL. [http://www.siebtechnik-gmbh.de/fileadmin/user\\_upload/PDF/de/Abt1/wb206d.pdf](http://www.siebtechnik-gmbh.de/fileadmin/user_upload/PDF/de/Abt1/wb206d.pdf); Überprüfungsdatum: 04.09.2015 : Baureihe SK*
- [72] IFE AUFBEREITUNGSTECHNIK GMBH: *Linearschwingsieb*. URL <http://www.ife-bulk.com/de/siebtechnik/linearschwingsieb.html> – Überprüfungsdatum 2017-02-25

## 8.2 Abkürzungen und Symbole

<b>Abkürzung</b>	<b>Bedeutung</b>
°C	Grad Celsius
a	Jahr
Abb.	Abbildung
AC	Ethylenanlage
Al	Aluminium
AVAW	Lerhstuhl für Abfallverwertungstechnik und Abfallwirtschaft
AVV	Abfallverzeichnisverordnung
BOKU	Universität für Bodenkultur Wien
Br	Brom
bzw.	beziehungsweise
ca.	circa
Cl	Chlor
cm <sup>3</sup>	Kubikzentimeter
CO <sub>2</sub>	Kohlenstoffdioxid

d.h.	das heißt
€	Währungseinheit Euro
EAK	Europäischer Abfallkatalog
EBS	Ersatzbrennstoff
EPS	expandiertes Polystyrol
etc.	et cetera
EU	Europäische Union
EU28	Die 28 Unionsmitgliedstaaten der EU
EU28+2	Die 28 Unionsmitgliedstaaten der EU sowie die Schweiz und Norwegen
Fa.	Firma
FCC	Fluid Catalytic Cracking
FG	Feingut
g	Gramm
GJ	Giga Joule
HWF	heizwertreiche Fraktion
i.A.	im Allgemeinen
i.d.R.	in der Regel
IR	Infrarotstrahlung
kg	Kilogramm
KS	Kunststoff
kWh	Kilowattstunden
l	Liter
LFM	Landfill Mining
LG	Leichtgut
LKW	Lastkraftwagen
LVP	Leichtstoffverpackungen
M-%	Massenprozent
Max.	maximal
MBA	Mechanisch-biologische Behandlungsanlage
MFR	Melt Flow Rate
MG	Mittelgut
Min.	minimal
min <sup>-1</sup>	pro Minute
MKF	Mischkunststofffraktion
M-%	Massenprozent
mm	Millimeter
Mio.	Millionen
NIR	Nahinfrarot
NÖ	Niederösterreich
OÖ	Oberösterreich
PA	Polyamid
PB	Polybuten
PE	Polyethylen
PE-HD	Polyethylen „high density“

PE-LD	Polyethylen „low density“
PE-LLD	Polyethylen „linear low density“
PET	Polyethylenterephthalat
PO	Polyolefine
PP	Polypropylen
PPK	Papier-, Pappe-, Kartonfraktion
PS	Polysyrol
PVC	Polyvinylchlorid
rd.	rund
RSA	Research Studio Austria
SD	Siebdurchgang
SG	Schwergut
SN	Schlüsselnummer
SSS	Schwimm-Sink-Analyse
stat.	statistisch
SÜ	Siebüberlauf
t	Tonnen
Tab.	Tabelle
TGU	Thermische Gasöl Unit
u.a.	und andere(s)
u.U.	unter Umständen
UV	Ultraviolett
u.v.m.	und vieles mehr
VIS	visuelle Spektroskopie
vgl.	vergleiche
VTIU	Verfahrenstechnik des industriellen Umweltschutzes
z.B.	zum Beispiel
ZG	Zwischengut
Zn	Zink
z.T.	zum Teil

### 8.3 Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: Die wichtigsten Vertreter der Polyolefine [4].....	7
Tabelle 2: Eigenschaftsüberblick von Polypropylen und Polyethylen [4].....	8
Tabelle 3: Verträglichkeitsmatrix für Thermoplaste [7].....	9
Tabelle 4: Einflussfaktoren auf die Alterung von Kunststoffen [10] .....	11
Tabelle 5: Heizwerte einiger Kunst- und Naturstoffe bezogen auf die Originalsubstanz [9]..	18
Tabelle 6: Jährlich zu erreichende Recyclingquoten für die jeweiligen Packstoffe [20] .....	20
Tabelle 7: Anzahl der geführten Interviews, gegliedert nach Prozessphasen .....	49
Tabelle 8: Schrittweise Eingrenzung der Schlüsselnummern bzw. Abfallcodes beider Abfallkataloge .....	50
Tabelle 9: Auflistung der ausgewählten Schlüsselnummern .....	51

Tabelle 10: Zusammensetzung zweier LVP-Ströme aus dem Jahr 2014 .....	60
Tabelle 11: Aufkommen des Abfalls „gemischter Siedlungsabfall“ nach Bundesländern [3]..	62
Tabelle 12: Zusammensetzung des gemischten Siedlungsabfalls, Steiermark 2014 [3].....	62
Tabelle 13: Kunststoffpotential im gemischten Siedlungsabfall nach Bundesländern .....	63
Tabelle 14: Erhobene Daten aus der Altpapier-/Altkartonaufbereitung in Österreich 2014...	65
Tabelle 15: Wesentliche deponierte Abfallarten im Jahr 2015 [3].....	66
Tabelle 16: Zusammenfassung aller Ergebnisse der Potentialerhebung der Abfallströme.....	66
Tabelle 17: Zusammensetzung zweier LVP-Ströme aus dem Jahr 2014 .....	67
Tabelle 18: Ergebnisse der manuellen Sortieranalyse vom gemischten Siedlungsabfall unterschiedlicher Herkunft [60] .....	68
Tabelle 19: Vergleich der Sortierergebnisse mit Literaturdaten .....	70
Tabelle 20: Ergebnisse der händischen Sortieranalysen der Rejekte unterschiedlicher Herkunft .....	70
Tabelle 21: Ergebnisse der händischen Sortieranalysen der LFM-Fraktionen .....	73
Tabelle 22: Urproben sowie sortierte Kunststofffraktionen beider LFM-Proben .....	75
Tabelle 23: Auflistung aller Ergebnisse der händischen Sortierung .....	76
Tabelle 24: Auflistung aller Ergebnisse aus der Schwimm-Sink-Sortierung .....	81
Tabelle 25: Energieverbrauch und CO <sub>2</sub> -Emissionen als Vergleichswerte .....	83
Tabelle 26: Für die Bewertung herangezogene Einsatzspezifikationen des Inputmaterials ...	85
Tabelle 27: Kosten und Wartungsaufwand als Vergleichswerte .....	86
Tabelle 28: Berechnung des Energieverbrauchs für die ReOil Anlage [37] .....	86
Tabelle 29: Aus Energieverbrauch berechnete CO <sub>2</sub> -Emissionen der ReOil Anlage [37] .....	86
Tabelle 30: Energieverbrauch und CO <sub>2</sub> -Emissionen als Vergleichswerte .....	87
Tabelle 31: Produkt als Vergleichswert .....	88
Tabelle 32: Zusammenfassung und Gegenüberstellung aller Kriterien .....	88
Tabelle 33: Ergebnisse der Bewertung beider Hauptaggregate .....	93
Tabelle 34: Häufig eingesetzte Identifikationsverfahren zur Altkunststoffsartierung [7, 65] .....	XVII
Tabelle 35: Berechnung des Kunststoffanteils im Restmüll .....	XXV
Tabelle 36: Fotodokumentation der Sortierversuche der Rejektprobe vom Kartonhersteller .....	XXVII
Tabelle 37: Fotodokumentation der Sortierversuche der Rejektprobe vom Papierhersteller .....	XXVIII
Tabelle 38: Fotodokumentation der Sortierversuche der Zopf-Rejektprobe vom Entsorger .....	XXIX
Tabelle 39: Fotodokumentation des Sortierversuches des 2D-Materials .....	XXX
Tabelle 40: Fotodokumentation des Sortierversuches der 50-80 mm Fraktion .....	XXXI
Tabelle 41: Fotodokumentation der Schwimm- und Sinkfraktionen aller Rejektproben ...	XXXII
Tabelle 42: Fotodokumentation der Schwimm- und Sinkfraktionen aller LFM-Fraktionen	XXXIII

## 8.4 Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Darstellung der Entwicklung der Kunststoffabfallbehandlung in Europa in Form eines Ternärdiagramms.....	6
Abbildung 2: Schematische Darstellung der Bildung von PE (links) sowie PP (rechts) [5] .....	8
Abbildung 3: Effekte der Alterung [10] .....	11
Abbildung 4: Fünfstufige Abfallhierarchie [13].....	15
Abbildung 5: Beispiele für die Wiederverwendung von Altkunststoffen [16] .....	16
Abbildung 6: Stoffliche Verwertungsmöglichkeiten von Kunststoffabfällen [19] .....	17
Abbildung 7: A: Leichtstoffverpackungsabfälle vor der Sortierung; B: Sortierte und verpresste Kunststoffe; C: Kunststoffflakes nach der Aufbereitung; D: Regranulate [24]....	20
Abbildung 8: Links: Gemischte Siedlungsabfälle vor der Sortierung; Rechts: Aus dem gemischten Siedlungsabfall erzeugter Ersatzbrennstoff (EBS) .....	21
Abbildung 9: Links: separiertes Rejekt aus der Altpapieraufbereitung; Rechts: angelieferter Rejekt-Zopf beim Entsorger vor der Zerkleinerung.....	23
Abbildung 10: Beispielhafte Probe eines abgegrabenen Deponiegutes.....	24
Abbildung 11: Einteilung der Behandlungsprozesse für das werkstoffliche und rohstoffliche Recycling .....	26
Abbildung 12: Verfahrensschema mit Systemgrenze für das werkstoffliche Recycling .....	28
Abbildung 13: Verfahrensschema mit Systemgrenze für das rohstoffliche Recycling; in Anlehnung an [27].....	28
Abbildung 14: Vereinfachtes Fließschema einer LVP-Sortieranlage; in Anlehnung an [7] .....	30
Abbildung 15: Vereinfachtes Fließschema einer MBA; in Anlehnung an [25, S. 265–266] ....	32
Abbildung 16: vereinfachtes Fließschema einer trockenmechanischen Aufbereitungslinie für die heizwertreiche Fraktion.....	32
Abbildung 17: Fließschema einer theoretischen, trockenmechanischen Aufbereitungsanlage für Rejekt .....	34
Abbildung 18: Fließschema einer theoretischen, trockenmechanischen Aufbereitungsanlage für Deponiegut.....	34
Abbildung 19: Fließschema einer theoretischen, nassmechanischen Aufbereitungslinie für PE-Hartkunststoff als Inputmaterial; in Anlehnung an [1, S. 89] .....	36
Abbildung 20: Funktionsschema der INTAREMA® TVEplus® [33] .....	38
Abbildung 21: Funktionsprinzip des Schneidverdichters von EREMA [33] .....	38
Abbildung 22: Systematik der Granuliertvorrichtungen; in Anlehnung an [34, S. 527].....	40
Abbildung 23: Rohstoffliche Verwertungsmöglichkeiten für Altkunststoffe [7] .....	41
Abbildung 24: Fließbild der trockenmechanischen Aufbereitungsanlage als Vorbereitung für die nassmechanische Aufbereitung.....	42
Abbildung 25: Fließbild der nassmechanischen Aufbereitungsanlage „Plastic Reborn“; in Anlehnung an [36, S. 174] .....	43

Abbildung 26: Verfahrensschema zur thermochemischen Konversion von Kunststoffen nach dem ReOil Verfahren [38] .....	45
Abbildung 27: Beispiele für Produkte aus recyceltem PO-Material minderer Qualität [39]....	46
Abbildung 28: Produktbeispiele aus recyceltem PO-Material hoher Qualität [40, 41, 42, 43]	46
Abbildung 29: Typische Prozessphasen und involvierte Stakeholder im werkstofflichen und rohstofflichen Recyclingprozess von Kunststoffen .....	49
Abbildung 30: Darstellung des Probenmaterials von LVP 2 vor der Zerkleinerung: Links: Kunststoffemballagen und –behältnisse; Mitte: Kunststofffolien; Rechts: Leichtfraktion aus der Verpackungssammlung .....	53
Abbildung 31: Links: Gemischte Siedlungsabfälle vor der Sortierung; Rechts: Aus diesem Abfallstrom erzeugter, zerkleinerter Ersatzbrennstoff (EBS) .....	53
Abbildung 32: Darstellung der drei Rejektproben: Links: Rejektprobe der Firma B; Mitte: Rejektprobe der Firma F; Rechts: Probe des Zopf-Rejekts der Firma A .....	54
Abbildung 33: Probenfraktionen aus dem Deponiegut: Links: Fraktion 50-80 mm; Rechts: Fraktion 2D .....	55
Abbildung 34: Links: Aufbau eines manuellen Sortiersuchversuchs am Firmengelände; Rechts: Durchführung eines Sortiersuchversuchs .....	56
Abbildung 35: Vorbehandlungsschritte als Vorbereitung für die Schwimm-Sink-Sortierung: Links: Schneidmühle zur Probenzerkleinerung; Mitte: Trockenschrank geschlossen; Rechts: Innenraum des mit Proben gefüllten Trockenschanks .....	58
Abbildung 36: Prinzip der Dichtentrennung im Schwerfeld .....	58
Abbildung 37: Versuchsaufbau für die Schwimm-Sink-Sortierung .....	59
Abbildung 38: Gegenüberstellung der Ergebnisse der manuellen Sortieranalyse des gemischten Siedlungsabfalls unterschiedlicher Herkunft [60] .....	69
Abbildung 39: Ergebnisse der manuellen Sortieranalyse von Rejekten unterschiedlicher Herkunft; Links: Summe der Ergebnisse; Rechts: Detail 85 M-% bis 100 M-% ..	71
Abbildung 40: Ergebnisse der manuellen Sortieranalyse des Deponiegutes [26] .....	72
Abbildung 41: Ergebnisse der manuellen Sortieranalyse der zwei LFM-Fraktionen .....	74
Abbildung 42: Ergebnisse der Schwimm-Sink-Sortierung aller drei Fraktionen aus der LVP-Sortierung [47] .....	77
Abbildung 43: Ergebnisse der Schwimm-Sink-Sortierung einer EBS-Fraktionen [47] .....	78
Abbildung 44: Durch eingetrocknetes Fasermaterial verklebter Rejektbündel .....	79
Abbildung 45: Ergebnisse der Schwimm-Sink-Sortierung der drei Rejektproben .....	79
Abbildung 46: Ergebnisse der Schwimm-Sink-Sortierung der LFM-Fraktionen .....	80
Abbildung 47: Skizze eines Kammwalzenzerkleinerers [30, S. 146] .....	XIII
Abbildung 48: Überbandmagnete als Querbandscheider (A) und in Förderrichtung angeordnet (B) zur Metallabscheidung [1, S. 129] .....	XIII
Abbildung 49: Funktionsprinzip und Aufbau eines Zickzacksichters [25] .....	XIV
Abbildung 50: Magnettrommel zur Metallabscheidung [1, S. 129] .....	XV
Abbildung 51: Schema und Funktionsweise eines Wirbelstromabscheiders [63] .....	XV

Abbildung 52: Funktionsprinzip sensorgestützter Sortierung (schematisch) [30, S. 177] ...	XVI
Abbildung 53: Schematische Darstellung eines Schneidwalzenzerkleinerers [28] .....	XVIII
Abbildung 54: Dichtebereich verschiedener Kunststoffe und Trennschnitt mit Wasser [67]	XIX
Abbildung 55: Schematische Darstellung von Schwerkraftscheidern [7, S. 26] .....	XX
Abbildung 56: Links: schematischer Aufbau des Einwellen-Zerkleinerers [68]; .....	XXI
Abbildung 57: Links: Schematische Funktionsweise eines Trommelsiebes [7]; .....	XXI
Abbildung 58: Links: Schematische Funktionsweise eines Ballistikseparators [69]; .....	XXII
Abbildung 59: Schematische Darstellung des Aufbau- und Funktionsprinzips einer Schwingsetzmaschine [70] .....	XXIII
Abbildung 60: Schematische Darstellung des Funktionsprinzips eines Zentrifugalkraft- scheiders [36, S. 174–175].....	XXIV
Abbildung 61: Links: Darstellung eines Linearschwingsiebes zur Trennung von Fördergut und Wasser der Firma IFE Aufbereitungstechnik GmbH [71]; Rechts: Schematische Darstellung eines Siebprozesses [7] .....	XXIV
Abbildung 62: Beispiele für Sortierfraktionen der Hauptfraktion Kunststoff [53] .....	XXVI

## Anhang

### Aufbereitungsaggregate

#### Kammwalzenzerkleinerer

Der Kammwalzenzerkleinerer ist speziell für komplex zusammengesetzte Abfälle wie z.B. Siedlungsabfälle geeignet. Aus der Abbildung 47 gehen der Aufbau sowie das nachfolgend beschriebene Funktionsprinzip eines Kammwalzenzerkleinerers hervor.

Das Aufgabegut wird von oben in den Vorratstrichter des Zerkleinerers gegeben. Das Material wird von der zahnbesetzten Walze (Rotor) erfasst und nach unten durch einen ausweichbaren Gegenrost (Kamm) (in Abbildung 47 nicht sichtbar) gezogen, wodurch die Zerkleinerung überwiegend durch Zug- und Reißbeanspruchung erfolgt. Die Zerkleinerung von zähen, elastischen Materialien wie Kunststofffolien ist dabei nur schwer möglich, da diese durch den Kamm gezogen werden, ohne dabei eine wesentliche Zerkleinerung zu erfahren (selektive Zerkleinerung). Im Falle einer Überbelastung z.B. durch ein massives Metallteil wird der Gegenkamm nach untern geklappt, der Störstoff abgeworfen und der Gegenkamm wieder vollautomatisch in die Arbeitsposition gefahren. Der in Abbildung 47 sichtbare Rost oberhalb des Rotors dient zum Zurückhalten des Aufgabematerials, um ein Durchfallen auf den darunterliegenden Kamm zu verhindern. [31, S. 146]

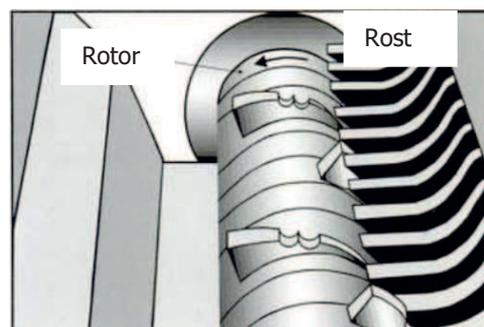


Abbildung 47: Skizze eines Kammwalzenzerkleinerers [31, S. 146]

#### Überbandmagnetabscheider

Bei der Beschickung von Zerkleinerungsaggregaten mittels Förderbändern besteht die Möglichkeit Überband- bzw. Aushubmagnete (vgl. Abbildung 48) zu implementieren. Diese sind in einem bestimmten Abstand über dem Materialstrom angeordnet und entziehen diesem die Eisenteile nach oben. Durch ein umlaufendes Band um den Magnet wird ein kontinuierlicher Eisenteilaustrag bewerkstelligt. [1, S. 128]

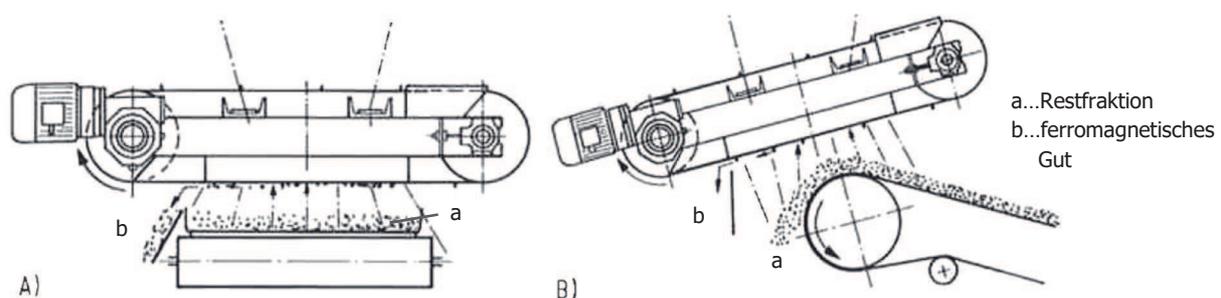


Abbildung 48: Überbandmagnete als Querbandscheider (A) und in Förderrichtung angeordnet (B) zur Metallabscheidung [1, S. 129]

### Windsichter

Die Auftrennung einer festen, dispersen Phase in mindestens zwei Sinkgeschwindigkeits- oder Größenklassen in einem Luftstrom, wird windsichten genannt. Dabei greifen eine Vielzahl von partikelgrößenabhängigen Kräften (z.B. Schwer-, Widerstands- und Trägheitskräfte) an den Partikeln an. Feine bzw. leichte Partikel folgen der Luftströmung und grobe bzw. schwere Partikel der Schwerkraft.

Windsichter existieren in den unterschiedlichsten Bauweisen. Zur Abtrennung von Folienfraktionen eignet sich ein Zickzack-Windsichter besonders gut. Ein Zickzack-Windsichter, wie er in der Abbildung 49 dargestellt ist, besteht aus lotrechten, abwechselnd unter einem Winkel gegeneinander versetzt angeordneten Kanalabschnitten mit einem rechteckigen Querschnitt. Der Kanal wird von unten nach oben von Luft durchströmt. Bedingt durch den zickzackartigen Kanalverlauf, entsteht hinter den Kanten Luftverwirbelungen (Pos. 1 in Abbildung 49), welche die Strömungsturbulenzen im Kanal verstärken.

In jeder Ebene des Sichters erfolgt eine Trennung, sodass ein Zickzack-Windsichter als eine Kaskade von Gegenstromsichtern beschrieben werden kann. Kleine, leichte Partikel werden mit dem Luftstrom in die nächsthöhere Ebene transportiert und am oberen Ende des Sichters ausgetragen. Große bzw. schwerere Partikel wandern hingegen nach unten und werden am unteren Ende ausgetragen. Die Aufgabe des Trenngutes erfolgt in einer mittleren Stufe (Pos. 2 in Abbildung 49).

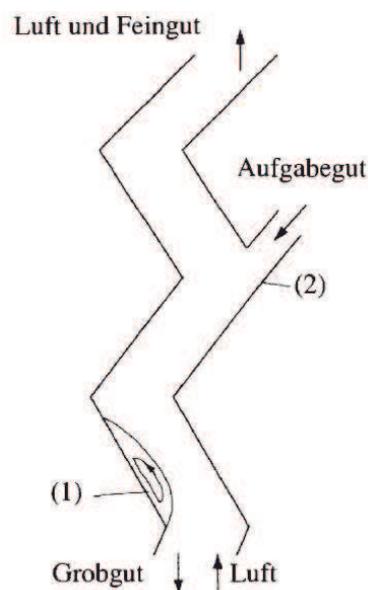


Abbildung 49: Funktionsprinzip und Aufbau eines Zickzacksichters [26]

### Magnettrommelabscheider

Trommelabscheider werden ebenso wie die Überbandmagneten zur Eisenteilabscheidung eingesetzt. Die Magnettrommel wird, wie in Abbildung 50 dargestellt ist, von oben beschickt und ist daher unterhalb der Abwurfstelle angeordnet. Ungefähr der halbe Umfang der Magnettrommel besteht aus einem elektro- oder permanentmagnetischen Rundkörper um den sich der unmagnetische Trommelmantel dreht. Das unmagnetische Material fällt nach etwa einem Viertel des Trommelumfangs ab, während etwaige Eisenteile festgehalten werden, bis die untere Trommelmitte erreicht ist. [1, S. 129]

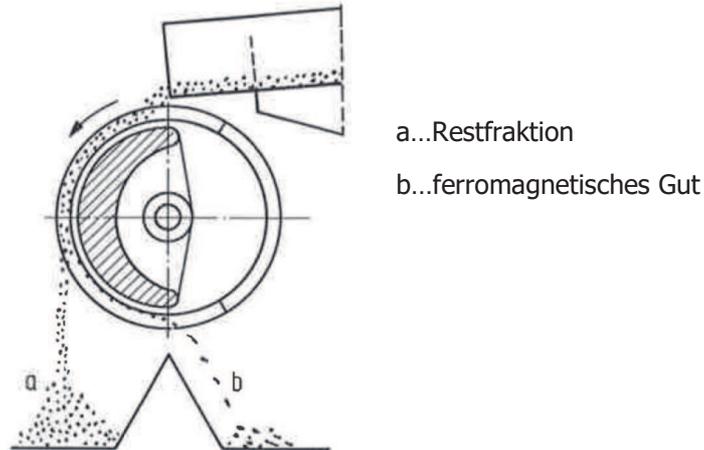


Abbildung 50: Magnettrommel zur Metallabscheidung [1, S. 129]

### Wirbelstromabscheider

Zusätzlich zur Abscheidung von Eisenmetallen ist auch die Ausschleusung von Nichteisenmetallen aus dem Prozess notwendig. Dies wird durch den Einsatz von Wirbelstromabscheidern realisiert. Mit einem Wirbelstromabscheider wie er in Abbildung 51 schematisch dargestellt ist, werden unmagnetische, elektrisch leitfähige Stoffe wie z.B. Aluminium, Kupfer von Nichtleitern (z.B. Kunststoff, Glas, u.A.) separiert.

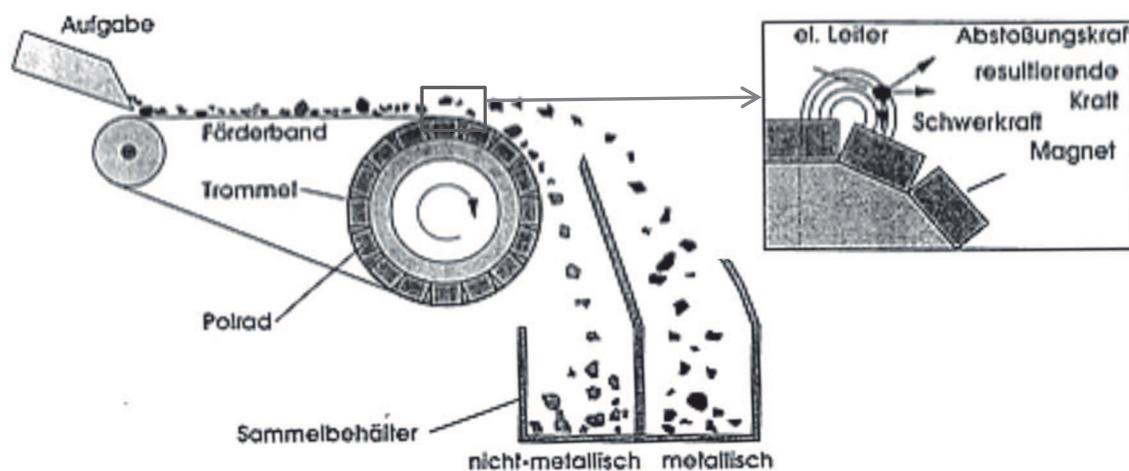


Abbildung 51: Schema und Funktionsweise eines Wirbelstromabscheiders [64]

Auf einem schnell rotierenden Polrad sind Permanent- oder Elektromagnete angebracht, welche in die leitfähigen Materialpartikel Wirbelströme induzieren. Diese Wirbelströme führen zur Ausbildung von Magnetfeldern, die den induzierenden Magnetfeldern entgegenwirken, was zu einer abstoßenden Kraft führt. Die elektrisch leitenden Teile werden daher aus dem Materialstrom ausgeworfen. [65]

Die Separierungsmerkmale sind die unterschiedlichen spezifischen Leitfähigkeiten oder der spezifische Widerstand der Stoffe. Ein Metallteil wird im magnetischen Wechselfeld umso stärker abgestoßen, je höher dessen elektrische Leitfähigkeit ist. Andererseits lassen sich spezifisch leichtere Metalle leichter auslenken, als solche die eine höhere Dichte besitzen. Somit stellt der Quotient aus spezifischer elektrischer Leitfähigkeit und der Stoffdichte ein wesentliches Trennkriterium dar. [65]

### Sensorgestützte Sortierung (NIR-Sortierung und Farbzeilenkamera)

Diese Methode der Einzelkornsortierung erfolgt anhand äußerlich identifizierbarer, mittels Sensorik berührungslos messbarer Trennmerkmale und gilt als die Weiterentwicklung der händischen Sortierung. Beispiele für Trennmerkmale sind u.a. Kornfarbe, -form, -größe und -dichte, Materialstruktur sowie -beschaffenheit, Fluoreszenz oder elektrische Leitfähigkeit. Sensorgestützte Sortieranlagen bestehen grundlegend, wie in Abbildung 52 schematisch dargestellt ist, aus einer Materialzuführung und -vereinzelnung, dem Sensorsystem bestehend aus Emissionsquelle und Detektor zur Erkennung spezifischer Materialeigenschaften, einer Auswerteeinheit sowie einer Auswurfvorrichtung (meistens Druckluftimpuls) für positiv detektierte Körner. Analysiert wird dabei entweder nach dem Transmissions- oder dem Reflexionsprinzip.

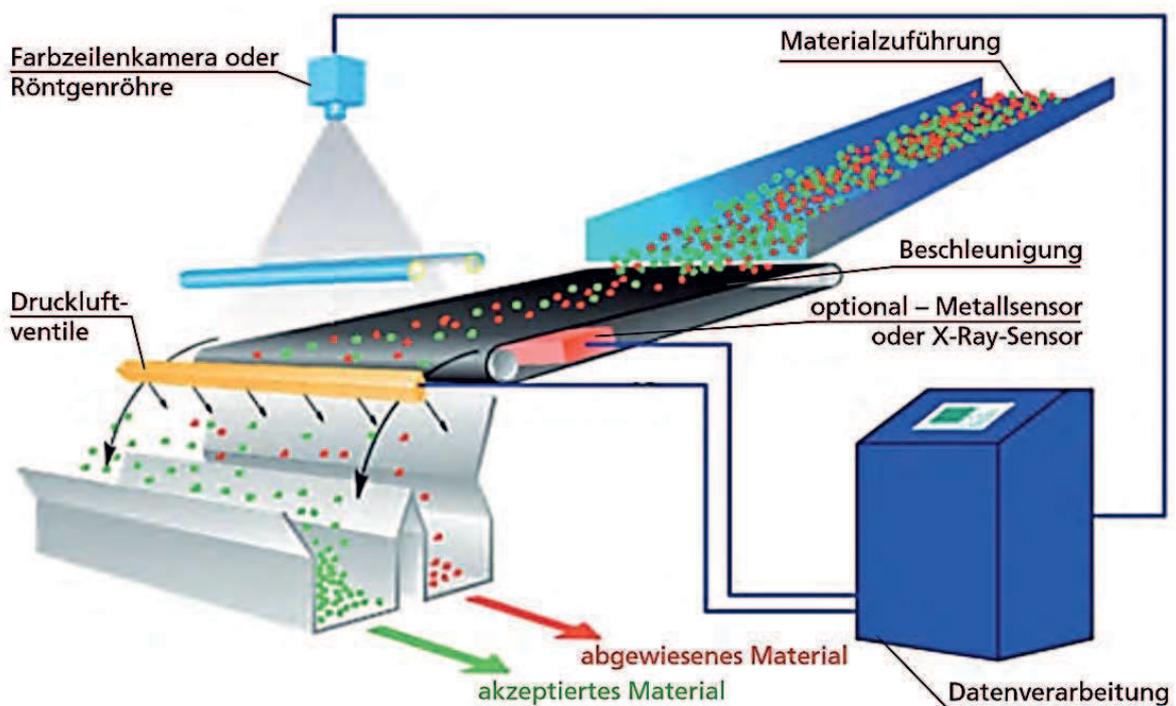


Abbildung 52: Funktionsprinzip sensorgestützter Sortierung (schematisch) [31, S. 177]

Voraussetzung zur Erzielung guter Trennergebnisse ist nicht nur eine gute Vereinzelung der Teilchen, sondern auch ein bestimmter Korngrößenbereich (obere zu untere Korngröße ca. 3 zu 1 [31, S. 174]). Detektion, Auswertung und Ausstoß müssen mit extrem hohen Geschwindigkeiten geschehen, um die wirtschaftlich erforderlichen Durchsatzleistungen zu erreichen. Im technischen Einsatz zur Sortierung von Kunststoffen sind die in Tabelle 34 aufgelisteten Identifikationsverfahren [8, S. 32–33]. Für diese Arbeit wird jedoch nur auf das eingesetzte Verfahren der Kunststoffidentifikation mittels NIR-Spektroskopie eingegangen.

Tabelle 34: Häufig eingesetzte Identifikationsverfahren zur Altkunststoffsartierung [8, 66]

Identifikationsverfahren	Anwendung
Infrarot- (IR) Spektroskopie (nahes IR (NIR); mittleres IR (MIR))	Identifikation verschiedener Kunststofftypen anhand unterschiedlicher Spektren
UV-Spektroskopie, visuelle Spektroskopie (VIS) und Fluoreszenzmessung (UV VIS)	Identifikation optischer Merkmale (Farbe, Helligkeit, Transparenz, Fluoreszenz)
Röntgentransmissionsmessung mit spektraler Auflösung (RSA)	Messung der materialspezifische Dichte, unabhängig von Partikelgröße, Teilchenform, Stückgewicht oder Oberflächenfarbe
Röntgenfluoreszenz (XRF)	Sortieren über chemische Zusammensetzung
RAMAN-Spektroskopie	Nachweis halogenbasierter Flammschutzmittel
Laserinduzierte Emissionsspektralanalyse (LIESA)	Identifikation verschiedener Kunststofftypen anhand Spektrum

Moderne, sensorgestützte Sortieranlagen sind mit Sensorkombinationen (Multisensorik) ausgestattet, was eine mehrstufige Objektidentifizierung (z.B. Material, Farbe und Form) ermöglicht. Durch den Einsatz von Multisensorik können deutlich bessere Trennerfolge, besonders bei komplex zusammengesetzten Inputströmen, erzielt werden. Da zur Erzielung einer besseren Qualität der Produkte in dieser Arbeit eine Farbsortierung vorgesehen war, wurde dem NIR-Modul eine Farbzeilenkamera (Modul) nachgeschaltet, welche die PE- bzw. PP-Flakes nach Farbkategorien sortiert. Ein weiterer Vorteil ist ihre softwarebasierte Lernfähigkeit, wodurch eine automatische Anpassung an die sich ständig ändernden Sortieranforderungen ermöglicht ist. [8]

Für Sensoren klassischer optischer Sortiermaschinen waren schwarze Kunststoffe bislang nicht nach ihrer Art zu unterscheiden. Ursache war der zum Schwärzen eingesetzte Ruß, der die elektromagnetische Strahlung im sichtbaren und infraroten Wellenlängenbereich absorbiert. Jedoch stellte am 30. Mai 2016 die Steinert-Gruppe auf der IFAT 2016 den „UniSort BlackEye“ vor, welcher auch die sortenreine Trennung schwarzer Kunststoffteile in ihre Kategorien PE, PP, PS und PVC beherrscht, welche dem Recycling bislang verloren gegangen sind. Für die Identifizierung der schwarzen Kunststofflakes werden die im detektierten Spektrum fehlenden Frequenzen mit einem Referenzspektrum abgeglichen und so die Kunststoffsorte erkannt. Dabei ist ein Durchsatz von einer Tonne Kunststofflakes pro Stunde erzielbar. [67]

### Schneidwalzenzerkleinerer

Der Schneidwalzenzerkleinerer bzw. -shredder (vgl. Abbildung 53) wird je nach Hersteller und Bauform auch als Rotorschere oder Zwei-/Vierwellenzerkleinerer bzw. -shredder bezeichnet.

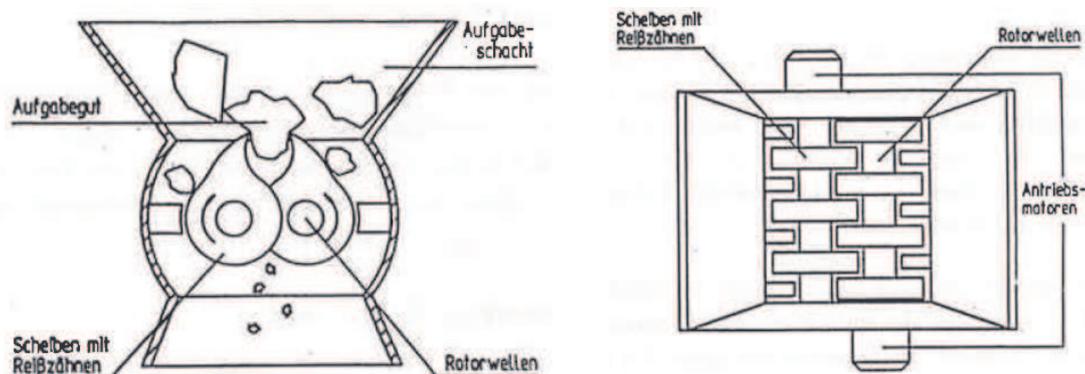


Abbildung 53: Schematische Darstellung eines Schneidwalzenzerkleinerers [29]

Das Aufgabegut gelangt entweder über ein Transport- oder Greifersystem in den oben offenen Aufgabeschacht. Da das Schneidwerk eine selbständige Einzugswirkung aufweist, ist dieses Aggregat sehr gut zur Zerkleinerung von sperrigen und glatten Materialien geeignet. Das Aufgabegut wird dabei zwischen dem gegenläufig, langsam laufenden, zweiachsigen Messerwellensystem auf eine annähernd konstante Korngröße verformt und zerkleinert. Die beiden Wellen sind zueinander so angeordnet, dass die Zähne auf den zueinander versetzt angeordnete Messerscheiben, kämmend ineinander greifen. [29]

Die Korngröße des zerkleinerten Materials ist dabei durch die Breite der Messerscheiben vorgegeben. Bei Überlastung des Aggregates durch zu große Aufgabemengen oder Störstoffe wird die Drehrichtung vorübergehend umgekehrt, bis die Wellen freigelaufen sind und die Systemsteuerung wieder auf Einzugsdrehrichtung umschaltet. Zur Vermeidung von Einzugsproblemen bei der Zerkleinerung von Kunststoffen kann eine hydraulische Anpressvorrichtung integriert werden. Dabei wird das Aufgabegut mittels Balken auf die Mitte des Schneidwerkes gepresst. Um eine kontinuierliche Beschickung gewährleisten zu können, führt der Pressbalken eine periodische Auf- und Abbewegung durch. [29]

### Dichtesortierung mittels Schwimm-Sink-Sortierung

Die Dichtesortierung basiert auf der Ausnutzung der Dichteunterschiede zwischen den zu trennenden Materialien und einem Fluid (Luft oder Flüssigkeit). So erfolgt eine Trennung in Leicht- bzw. Schwimmgut und Schwer- bzw. Sinkgut. Für die Trennung von Polyolefinen von anderen Kunststoffen wird als Trennmedium Wasser eingesetzt. In der Abbildung 54 ist der Dichtebereich verschiedener Kunststoffe und der Trennschnitt mit Wasser dargestellt. Für die Dichtesortierung von Kunststoffen werden häufig folgende drei Aggregate eingesetzt: Schwimm-Sink-Scheider (Schwerkraftscheider) und als Vertreter der Zentrifugalkraftscheider die Sortierzentrifuge und der Hydrozyklon [8, 16]. Für diese Arbeit wurde der Schwimm-Sink-Scheider ausgewählt und daher wird auf dieses Prinzip nachfolgend genauer eingegangen.

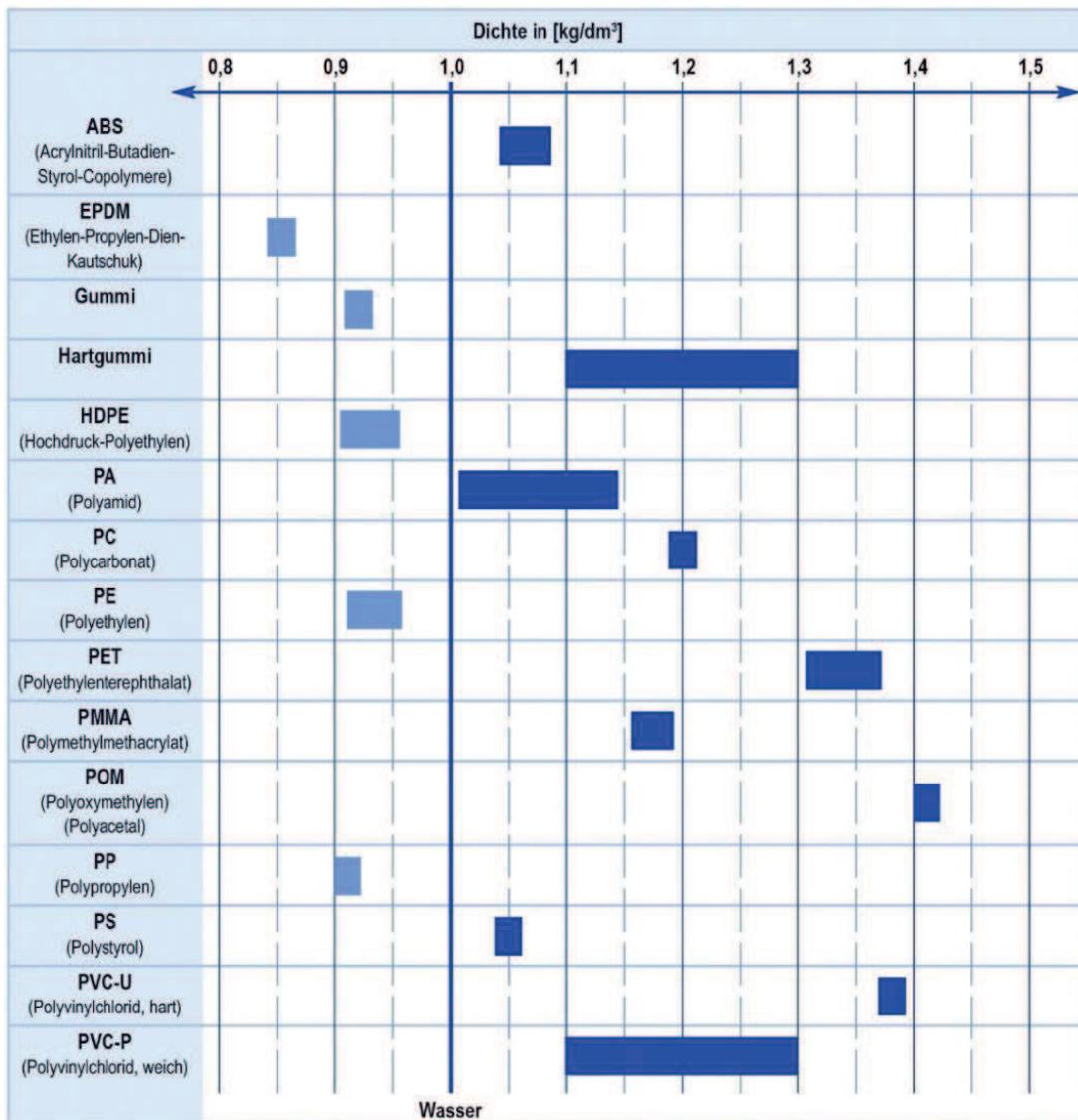


Abbildung 54: Dichtebereich verschiedener Kunststoffe und Trennschnitt mit Wasser [68]

Die Auftrennung in Kunststofffraktionen nach der Dichte in einer ruhenden Flüssigkeit ist das industriell am häufigsten angewandte Verfahren. Dabei wird das zu trennende Material in eine ruhende oder schwach strömende Trennflüssigkeit gegeben, deren Dichte zwischen jenen der zu trennenden Stoffe liegt. Als Folge sinken unter Schwerkrafteinfluss jene Stoffe, welche eine höhere Dichte aufweisen, ab (Sinkgut) und jene mit niedrigerer Dichte schwimmen auf (Schwimmgut). Um eine bestimmte Wertfraktion aus dem Kunststoffgemisch im Schwimm- oder Sinkgut abtrennen zu können, werden mehrere Sink-Schwimm-Scheider mit unterschiedlichen Trennmedien (verschiedene Dichtestufen) in Kaskade geschaltet. Um die natürliche Hydrophobie der Kunststoffe aufzuheben, werden der Trennflüssigkeit geeignete Netzmittel zugegeben. Als Trennmedium zur Abtrennung der Polyolefinfraktion wird häufig Wasser (Dichte  $1,0 \text{ g/cm}^3$ ) eingesetzt. Dabei kann diese Fraktion mit einer Reinheit von über 98 % [16, S. 518] ausgetragen werden.

Zu beachten ist, dass mindestens eine grobe Vorreinigung des Materials erfolgen muss, da die eingebrachten oberflächlich, anhaftenden Verunreinigung die Dichte des Trennmediums verändern können. Andere Dichten können unter Verwendung von Trennmedien wie

Salzlösungen, Wasser-Alkohol-Gemische sowie Schwertrüben eingestellt werden. Für den Trennerfolg entscheidend ist die Verweilzeit im Trennbehälter und dass die Trennzone frei von Turbulenzen ist, da das Schwergut sonst aufschwimmen könnte, was den Durchsatz limitiert. Auf Grund dessen kommen industriell nur kontinuierlich arbeitende Sink-Schwimm-Scheider zum Einsatz. Aggregatbeispiele sind Schwerkraftscheider in Kasten- und Konusform oder Trommelscheider. In der nachstehenden Abbildung 55 sind beispielhaft ein kontinuierlich arbeitender sowie ein mit Schwertrübe arbeitender Sink-Schwimm-Scheider schematisch dargestellt [8]. Des Weiteren stellen Feinanteile, geschlossenzellige Schaumstoffe und Zuschlagstoffe insbesondere Füll- und Verstärkungsstoffe ein Problem dar, da sie zu Fehlausträgen beitragen.

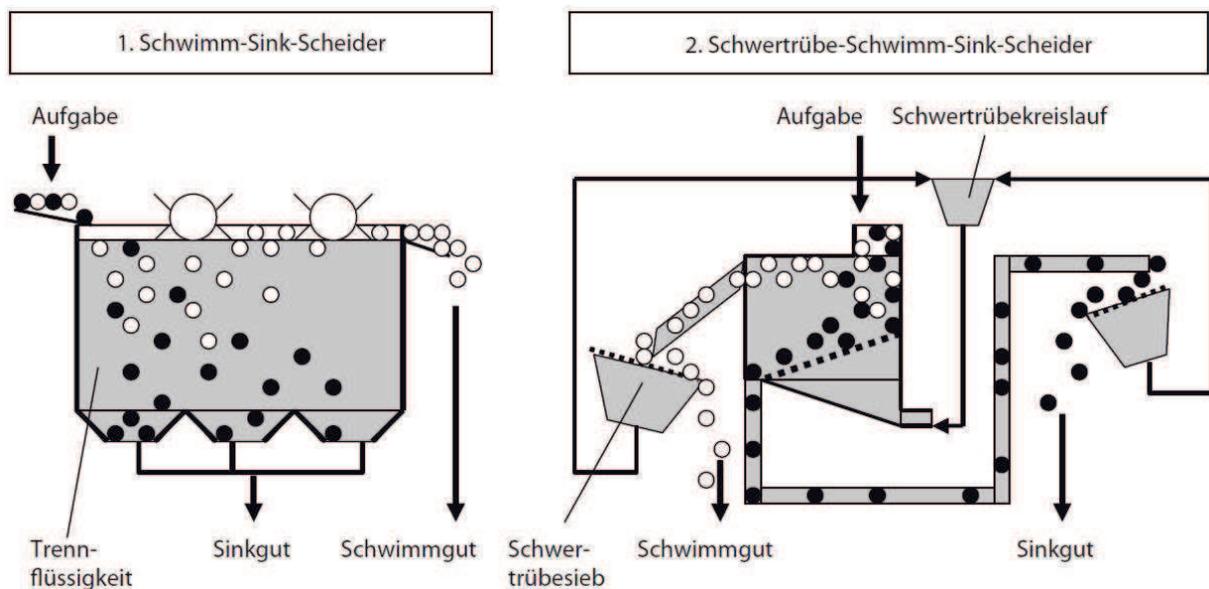


Abbildung 55: Schematische Darstellung von Schwerkraftscheidern [8, S. 26]

#### Einwellen-Zerkleinerer mit Überbandmagnet

Die Aufbereitung beginnt mit der Zerkleinerung, um das Material für weitere Prozessschritte zu konditionieren. Um die grobstückigen Abfallströme zerkleinern zu können, wurde hier ein mobiler Terminator der Firma Komptech GmbH eingesetzt. Es handelt sich dabei um einen langsam laufenden Einwellen-Zerkleinerer mit stufenloser Schnittpaltverstellung der zusätzlich mit einem Überbandmagneten zur Eisenteilentfrachtung am Austrag ausgestattet ist.

Das Aufgabegut gelangt entweder über ein Transport- oder Greifersystem in den oben offenen Aufgabeschacht. Da das Schneidwerk eine selbständige Einzugswirkung aufweist, ist dieses Aggregat sehr gut zur Zerkleinerung von sperrigen sowie glatten Materialien geeignet. Das Aufgabegut wird zwischen dem verstellbaren Gegenkamm (Korngrößeneinstellung, Ausgleich des Werkzeugverschleißes, Zugänglichkeit für Wartungszwecke) und der langsam laufenden ( $\max. 29 \text{ min}^{-1}$ ) zahnbesetzten Walze, auf die voreingestellte Korngröße zerkleinert. Die Walze besitzt dazu spiralförmig verlaufende Zahnreihen, welche in die Zähne des Gegenkamms greifen und so für eine optimale Förder- und Zerkleinerungswirkung sorgen. Das zerkleinerte Material wird unterhalb der Walze mittels Förderband über dem der Überbandmagnet angebracht ist, abtransportiert. [69]



Abbildung 56: Links: Schematischer Aufbau des Einwellen-Zerkleinerers [69];  
Rechts: Verwendeter Terminator der Firma Komptech GmbH zur Zerkleinerung  
Trommelsieb

Da die Materialien einen erheblichen Feinanteil aufweisen, wurde zu dessen Abtrennung ein mobiles Trommelsieb der Firma Komptech GmbH eingesetzt. Die Siebklassierung ist ein sehr häufig eingesetztes Verfahren zur Materialauftrennung nach Korngröße. Dabei erfolgt die Trennung durch die Materialbewegung (Siebgut) über den perforierten Siebboden. Die Trennkorngröße ist dabei durch die Lochabmessung im Siebboden definiert, wobei der Siebboden unterschiedlich gestaltet sein kann z.B. Spaltroste, gelochte Platten, Drahtgewebe oder Siebmatten. Die erforderliche Relativbewegung des Siebgutes zum Siebboden wird im Fall des Trommelsiebes durch Wälzen des Siebgutes in einer sich drehenden Siebtrommel erreicht. Der Siebdurchgang wird als Feingut bezeichnet und wird unterhalb des Siebbodens aufgefangen oder abtransportiert. Der Siebüberlauf (Grobgut) wird am Siebende von der Anlage abgeführt. Das schematische Funktionsprinzip eines Trommelsiebes kann der Abbildung 57 (links) entnommen werden. Wie die Siebmaschine bei der Aufbereitung vor Ort gearbeitet hat, ist in der Abbildung 57 (rechts) zu sehen. [8, S. 22–23]

Die Anforderungen an die Siebung sind eine freie Beweglichkeit der Partikel (Vermeidung der Agglomeratbildung), eine kontinuierliche Siebgutdurchmischung sowie eine Relativbewegung zwischen Siebgut und –boden. Die Siebung kann sowohl nass als auch trocken durchgeführt werden. Die Trockensiebung weist die Nachteile einer enormen Staubentwicklung sowie unvermeidbarer Anhaftung von Fein- an Grobgut auf. Wohingegen durch die Nasssiebung die Staubentwicklung vollständig unterbunden und die Anhaftungsproblematik deutlich vermindert ist. Als Nachteil der Nasssiebung ist die erhöhte Neigung zur Agglomeratbildung zu nennen. [8, S. 22–23]



Abbildung 57: Links: Schematische Funktionsweise eines Trommelsiebes [8];  
Rechts: Verwendetes Trommelsieb der Firma Komptech GmbH zur Abtrennung  
der Feinfraktion

### Ballistikseparator

Um die Materialien grob von großen Steinen, Holz, etc. entfrachten zu können und einen mit Kunststoffen aufkonzentrierten Stoffstrom (2D-Fraktion) zu erzeugen, wurde ein mobiler Ballistikseparator der Firma Komptech GmbH eingesetzt.

Mit Hilfe des Ballistikseparators werden aus einem heterogenen Abfallgemisch mehrere (drei oder vier) nutzbare Fraktionen in einem Arbeitsgang abgetrennt. Die Auftrennung erfolgt durch die Kombination ballistischer Separation mit einer Siebung nach den folgenden Kriterien: drei-/zweidimensional bzw. rollend-kubisch/flach und nach der Korngröße. Die schematische Funktionsweise sowie das verwendete Aggregat der Firma Komptech GmbH sind der Abbildung 58 zu entnehmen. [70]

Die Aufgabe des Trenngutes erfolgt im mittleren Teil des Aggregats von oben und gelangt in der Anlage auf die durch Exzenterwellen angetriebenen, leicht geneigten, perforierten Paddel. Durch die elliptische Paddelbewegung wird die 2D-Fraktion aufgeworfen und auf ihrem Weg über die Siebelemente (Paddel) vom Feingut, welches als Siebdurchgang unterhalb des Aggregats aufgefangen wird, befreit und nach oben transportiert. Die 3D-Fraktion wird auf Grund der ballistischen Bewegung in die entgegengesetzte Richtung nach unten bewegt und ebenso von den feinkörnigen Verunreinigungen befreit. Die variable Lochgröße der Paddel erlaubt eine Fraktionierung des Siebdurchgangs in eine obere und untere Feinfraktion nach Korngröße. [70]

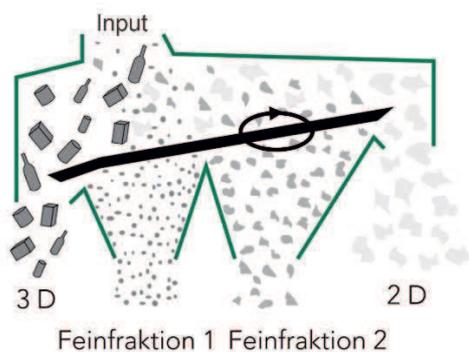


Abbildung 58: Links: Schematische Funktionsweise eines Ballistikseparators [70];  
Rechts: Verwendeter Ballistor der Firma Komptech GmbH zur Abtrennung der 2D-Fraktion

### Setzmaschine

Bei der verwendeten Setzmaschine handelt es sich um eine Schwingsetzmaschine der Firma Siebtechnik GmbH vom Typ SK 3-10. Das Aggregat trennt Leichtgut aus Schwergut nach dem Prinzip der Dichtentrennung. Der Aufbau (vgl. Abbildung 59) besteht aus einem Grundrahmen auf dem ein Setzkasten mit Setzgutträger (Kunststoff-Spaltsiebe) und wassergefülltem Oberkasten befestigt ist. Der Setzkasten ist mit dem darunter liegenden Schwingkasten über Gummikompensatoren flexibel verbunden. Der Schwingkasten wird über Pleuelstangen mittels einstellbaren Exzenterantrieb (Hubhöhe und -frequenz) in Schwingung versetzt, was einen pulsierenden Wasserstrom im Oberkasten bewirkt. Das Aufgabegut bewegt sich auf Grund der Neigung des Setzgutträgers, der Hubarbeit und der Strömung in Richtung Austrag, am Ende des Setzgutträgers. Die Hubarbeit bewirkt gleichzeitig eine Schichtung des Setzgutes

entsprechend der Materialdichte. Am Ende des Setzgutträgers wird das Leichtgut über eine höhenverstellbare, quer zur Förderrichtung liegende Rinne, seitlich ausgetragen. Das Schwergut wird über das darunter liegende, über einen Schwimmer höhengesteuerte Wehr, nach vorne ausgetragen. Feines Schwergut (Fassgut), welches durch das Setzbett und Setzgutträger in den Schwingkasten gelangt, wird unterhalb des Schwingkastens abgeführt. [26, S. 639, 71]

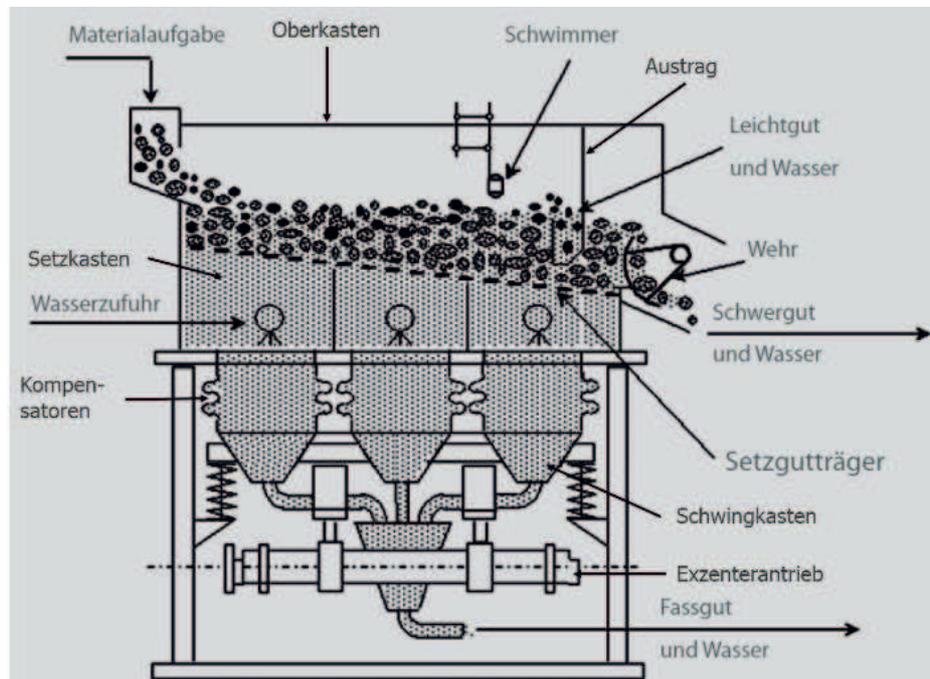


Abbildung 59: Schematische Darstellung des Aufbau- und Funktionsprinzips einer Schwingsetzmaschine [71]

#### Zentrifugalkraftscheider [37, S. 174–175]

Als Trennmedium dient in diesem Fall Wasser, welches tangential an der mit 1 gekennzeichneten Position in Abbildung 60 am unteren Ende des geneigten Scheiders (Neigung ist einstellbar) zugeführt wird. Es bildet sich spontan ein Fluidwirbel mit Luftkern aus, die den Scheider einander entgegengerichtet durchströmen. Das Aufgabegut wird am oberen Ende (Position 2, Abbildung 60) in den Scheider eingebracht. Das Schwergut, welches eine höhere Dichte als das Trennmedium aufweist, wird durch die wirkenden Zentrifugalkräfte nach außen an die Scheiderwand bewegt und als Schwergutfraktion mit dem Großteil des Trennmediums am oberen Ende des Scheiders (Position 3, Abbildung 60) tangential abgeschieden. Das spezifisch leichtere Material verbleibt hingegen im Grenzbereich Trennmedium/Luftkern und wird als Leichtgutfraktion mit einem geringen Anteil an Trennmedium am unteren Ende des Scheiders (Position 4, Abbildung 60) ausgetragen.

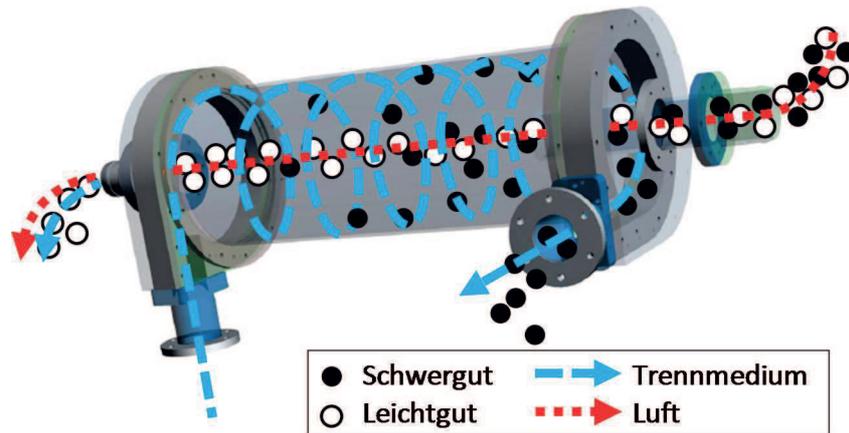


Abbildung 60: Schematische Darstellung des Funktionsprinzips eines Zentrifugalkraftscheiders [37, S. 174–175]

Mit dieser Scheidertechnologie wird eine nahezu vollständige Anreicherung der Polyolefine im Leichtgut sichergestellt und der Wertstoffverlust gering gehalten. Im Vergleich zu anderen Zyklontechnologien besitzt dieses Konzept den Vorteil, dass durch die separate Aufgabe von Trenngut und -medium die Pumpen nicht durch Feststoff belastet werden. [37, S. 174–175]

#### Entwässerungssieb

Zur anschließenden Entwässerung nach den vorab erklärten Aggregaten, wurde ein Linearschwingsieb der Firma IFE Aufbereitungstechnik GmbH eingesetzt. Mit Hilfe dieser Siebmaschine wird das Fördergut, welches am oberen Ende des Aggregates aufgegeben wird, kontinuierlich durch eine gerichtete Schwingung, erzeugt durch Vibrationsantriebe, über die Siebbahn (einstellbare Bahnneigung 0 - 15° fallend [72]) nach unten transportiert und dabei fraktioniert bzw. vom Wasser abgetrennt. Das Fördergut wird am Siebende ausgetragen und das abgetrennte Wasser unterhalb des Siebes abgeleitet.

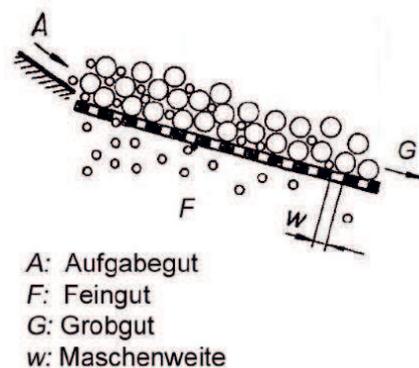
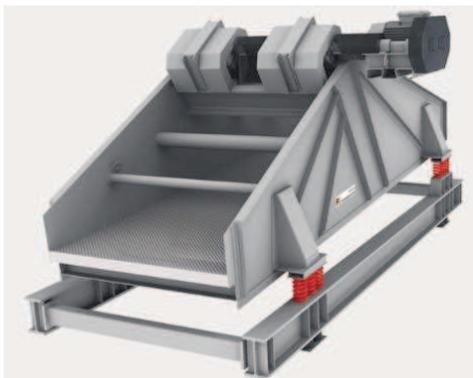


Abbildung 61: Links: Darstellung eines Linearschwingsiebes zur Trennung von Fördergut und Wasser der Firma IFE Aufbereitungstechnik GmbH [72]; Rechts: Schematische Darstellung eines Siebprozesses [8]

## Kunststoffanteil im Restmüll

In der folgenden Auflistung (vgl. Tabelle 35) wird gezeigt, wie sich die Daten der Tabelle 13 aus den Teilfraktionen zusammensetzen.

Tabelle 35: Berechnung des Kunststoffanteils im Restmüll

Fraktion/Bundesland	M-%
<b>Steiermark [55]</b>	
Kunststofffolien	5,2
Hartkunststoffe	5,0
<b>Summe</b>	<b>10,2</b>
<b>Kärnten [52]</b>	
Kunststoffverpackungen	9,7
Kunststoffnichtverpackungen	5,9
<b>Summe</b>	<b>15,6</b>
<b>Vorarlberg [57]</b>	
Müllsäcke	1,1
Kunststoffe NVP	4,7
Kunststoffe VP	5,7
<b>Summe</b>	<b>11,5</b>
<b>Oberösterreich [54]</b>	
KST sonst Hohlkörper Verpackung	0,9
KST Verpackung Folien	2,7
KST sonstige Verpackungen	1,8
KST NVP	3,6
<b>Summe</b>	<b>9,0</b>
<b>Niederösterreich [53]</b>	
sonst. Kunststoffflaschen	0,7
KST Kübel und Kanister	0,2
KST Folien und Säcke (VP)	4,0
sonstige KST VP	3,3
sonstige KST NVP	3,4
<b>Summe</b>	<b>11,6</b>
<b>Tirol [56]</b>	
KST sonst Verpackung	6,8
KST Verpackung	8,3
<b>Summe</b>	<b>15,1</b>
<b>Burgenland [51]</b>	
<b>Kunststoffe ges.</b>	<b>13,0</b>

## Fotodokumentationen

In der nachfolgenden Abbildung 62 ist eine beispielhafte händische Sortierung von gemischten Siedlungsabfällen in unterschiedliche Kunststofffraktionen gezeigt.



Abbildung 62: Beispiele für Sortierfraktionen der Hauptfraktion Kunststoff [54]

Nachfolgend werden die Fotodokumentationen zu den manuellen Sortierversuchen der drei Rejekt- sowie der zwei LFM-Proben angeführt (vgl. Tabelle 38 bis 42).

Tabelle 36: Fotodokumentation der Sortiersversuche der Rejektprobe vom Kartonhersteller



Urprobe



Kunststoff



PPK



Textil



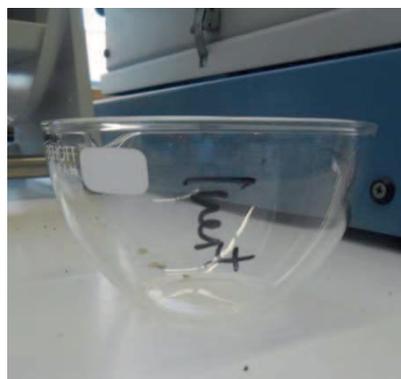
Holz



Metall



Naturfasern



Inert



Sortierrest

*Tabelle 37: Fotodokumentation der Sortierversuche der Rejektprobe vom Papierhersteller*



Urprobe



Kunststoff



PPK



Textil



Holz



Metall



Inert

*Tabelle 38: Fotodokumentation der Sortierversuche der Zopf-Rejektprobe vom Entsorger*



Urprobe



Kunststoff



PPK



Textil



Holz



Metall



Naturfasern



Inert



Sortierrest

*Tabelle 39: Fotodokumentation des Sortierversuches des 2D-Materials*



Unsortierte Probe des 2D-Materials



Kunststoff



Sortierrest



Textil



Verbund



Inert



Holz



Metall

*Tabelle 40: Fotodokumentation des Sortierversuches der 50 - 80 mm Fraktion*



Unsortiertes Material (50-80 mm)



Kunststoff



Sortierrest



Textil



Verbund



Inert



Holz



Metall

In den nachfolgenden zwei Tabellen 43 und 44 ist die Fotodokumentation der Schwimm-Sink-Analysen der Rejekt- sowie LFM-Proben gezeigt.

*Tabelle 41: Fotodokumentation der Schwimm- und Sinkfraktionen aller Rejektproben*

Schwimmgut	Holz-/Textilfraktion	Sinkgut
<i>Rejekt aus der Kartonherstellung</i>		
		
<i>Rejekt aus der Papierherstellung</i>		
		

<i>Zopf-Rejekt vom Entsorger</i>		
	Keine Holz-/Textilfraktion vorhanden!	

*Tabelle 42: Fotodokumentation der Schwimm- und Sinkfraktionen aller LFM-Fractionen*

<b>Schwimmgut</b>	<b>Holz-/Textilfraktion</b>	<b>Sinkgut</b>
<i>2D-Fraktion</i>		
		
<i>50 - 80 mm - Fraktion</i>		
		