



Lehrstuhl für Abfallverwertungstechnik und Abfallwirtschaft

Masterarbeit

Experimentelle Konzepte zur Gewinnung  
von Polyolefinen aus gemischten  
Siedlungs- und Gewerbeabfällen für das  
mechanische und chemische Recycling

Thomas Haider, BSc

Dezember 2022



## EIDESSTÄTTLICHE ERKLÄRUNG

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

Ich erkläre, dass ich die Richtlinien des Senats der Montanuniversität Leoben zu "Gute wissenschaftliche Praxis" gelesen, verstanden und befolgt habe.

Weiters erkläre ich, dass die elektronische und gedruckte Version der eingereichten wissenschaftlichen Abschlussarbeit formal und inhaltlich identisch sind.

Datum 09.12.2022

A handwritten signature in blue ink that reads "Thomas Haider".

---

Unterschrift Verfasser/in  
Thomas, Haider, BSc  
Matrikelnummer: m01356040

## **DANKSAGUNG**

Vorab möchte ich mich bei Herrn Renato Sarc für die Ermöglichung dieser Masterarbeit in seiner Arbeitsgruppe bedanken.

Besonderer Dank gilt meiner Betreuerin Sandra Viczek für die großartige Begleitung und Unterstützung während der gesamten Arbeit, den Versuchen sowie während des Schreibprozesses. Sie hatte immer ein offenes Ohr für alle meine Fragen und konnte mir immer mit Rat und Tat zu Seite stehen.

Ein großes Dankeschön gilt all meinen Studienkollegen und Freunden, vor allem meinen ehemaligen WG-Kollegen Andi, Florian und Stefan für eine unvergessliche Studienzeit in Leoben.

Mein größter Danke gilt meiner Familie, die mir ein Studium an der Montanuniversität ermöglicht hat und mich während der gesamten Zeit immer bestmöglich unterstützt hat, auch wenn ich in stressigen Phasen nicht immer die Dankbarkeit zeigen konnte, die eigentlich angebracht gewesen wäre.

## **Kurzfassung**

### **Experimentelle Konzepte zur Gewinnung von Polyolefinen aus gemischten Siedlungs- und Gewerbeabfällen für das mechanische und chemische Recycling**

Das Recycling von Kunststoffen ist eine große technische Herausforderung und stellt dabei hohe Anforderungen an die jeweiligen Prozesse. Das Mechanische und Chemische Recycling sind beides Verfahren, welche in unterschiedlichen Bereichen ihre Stärken besitzen und somit Relevanz für das Kunststoffrecycling haben. In dieser Arbeit wurden unterschiedliche Ansätze für die Gewinnung von Polyolefinen verfolgt, wobei der Fokus hier auf den bereits zur Verfügung stehenden Anlagen und mobilen Maschinen diverser Hersteller lag sowie ihre Eignung für die genannte Problematik. Als die vielversprechendste Technologie in der Sortierung von Abfall hat sich die Sortierung mittels Nah-Infrarot (NIR) in den letzten Jahren herauskristallisiert. Damit die Verwendung einer NIR-Sortierung funktioniert, benötigt es eine definierte Korngröße des aufzugebenden Materials. Aus diesem Grund wurde im Zuge der Konzeptentwicklung und der anschließenden Versuche ein Augenmerk auf die unterschiedlichen Zerkleinerer Varianten gelegt. Eine weitere wichtige Bedingung für die Recyclingverfahren war die Trennung der Kunststofffraktion in 2D- und 3D-Material, dabei hat sich gezeigt, dass eine grundsätzliche Trennung des Abfalles mittels Komptech Hurrikan möglich ist. Bei weiteren Versuchen mit einem Anlagen NIR-Sortierer hat sich gezeigt das PO in einem Verhältnis von 1:2 (2D:3D) ausgeschleust wird. Dabei konnte erkannt werden, dass ein großer Anteil der 2D-Fraktion (Folien) nicht ausgebracht werden konnte und somit ein nicht unerheblicher Anteil von Recyclingpotential im Reststrom zurückbleibt. Zusammengefasst wurde, anhand der Ergebnisse, ein mögliches Konzept für die Gewinnung von Polyolefinen dargestellt, welches Ansätze für weitere Untersuchungen aufzeigen soll.

## **Abstract**

### **Experimental concepts for the recovery of polyolefins from mixed municipal and commercial waste for mechanical and chemical recycling**

The recycling of plastics is a major technical challenge and places high demands on the respective processes. Mechanical and chemical recycling are both processes that have their strengths in different areas and are therefore relevant for plastics recycling. In this work, different approaches for the recovery of polyolefins were pursued, whereby the focus here was on the already available plants and mobile machines of various manufacturers as well as their suitability for the problem mentioned. In recent years, near-infrared (NIR) sorting has emerged as the most promising technology for sorting waste. In order for NIR sorting to work, it requires a defined grain size of the material to be fed. For this reason, attention was paid to the different shredder variants in the course of the concept development and the subsequent trials. Another important condition for the recycling process was the separation of the plastic fraction into 2D and 3D material. It was shown that a basic separation of the waste is possible using Komptech Hurrikan. Further tests with a NIR sorter showed that PO is discharged in a ratio of 1:2 (2D:3D). It could be seen that a large proportion of the 2D fraction (foils) could not be discharged and thus a not inconsiderable proportion of recycling potential remains in the residual stream. In summary, a possible concept for the recovery of polyolefins was presented on basis the results, which should indicate approaches for further investigations.

# Inhaltsverzeichnis

	Seite
<b>1 EINLEITUNG .....</b>	<b>4</b>
1.1 Problemstellung .....	5
1.2 Zielsetzung .....	5
<b>2 THEORETISCHE GRUNDLAGEN DES KUNSTSTOFFRECYCLINGS .....</b>	<b>6</b>
2.1 Beschreibung der Abfallströme .....	6
2.2 Gewinnung von Kunststofffraktionen aus gemischten Abfällen .....	7
2.2.1 Input-Lager .....	7
2.2.2 Sacköffner .....	7
2.2.3 Zerkleinerer.....	8
2.2.4 Klassierer.....	8
2.2.5 Eisen und Nicht-Eisen Abtrennung .....	9
2.2.6 Windsichter .....	10
2.2.7 Ballistischer Separator .....	11
2.2.8 Sensorgestützte Sortierung.....	13
2.2.9 Manuelle Sortierung.....	13
2.2.10 Beispielhafter Aufbau einer Sortieranlage .....	14
2.3 Kunststoffe Allgemein .....	16
2.3.1 Thermoplaste.....	16
2.4 Eigenschaften PE, PP und PS .....	17
2.4.1 Polyethylen (PE) .....	17
2.4.2 Polypropylen (PP).....	19
2.4.3 Polystyrol (PS).....	19
2.5 Recyclingverfahren .....	21
2.5.1 Mechanisches Recycling.....	21
2.5.2 Chemisches Recycling.....	24
2.6 Probleme beim Recycling .....	27
2.6.1 Fehlwürfe.....	27
2.6.2 Verschmutzung.....	27
2.6.3 Schadstoffe.....	27
<b>3 MATERIAL UND METHODEN .....</b>	<b>30</b>
3.1 Methodik .....	30
3.2 Probenahme an bestehender Aufbereitungsanlage.....	30

3.3	Analysemethoden .....	31
3.3.1	Fourier Transformation Infrarot Spektroskopie (FTIR).....	31
3.3.1.1	Untersuchung der 2D-Fraktion der Kunststoffproben .....	33
3.3.2	Sortier-Analyse mit Technikum Sortierer.....	33
3.3.2.1	Untersuchung der 3D-Fraktion der Kunststoffproben .....	34
3.4	Versuchsequipment .....	35
3.4.1	Zerkleinerer.....	35
3.4.1.1	Mobiler 1-Wellen-Zerkleinerer .....	35
3.4.1.2	Terminator 5000S-mobil.....	36
3.4.2	Trommelsieb .....	37
3.4.3	Volumenstrommesser .....	37
3.4.4	Metalflex .....	38
3.4.5	Hurrikan S Windsichter .....	38
3.4.6	NIR-Sortierer der Firma Redwave .....	39
3.5	Manuelle Sortierung.....	39
<b>4</b>	<b>ERGEBNISSE UND DISKUSSION.....</b>	<b>40</b>
4.1	Erarbeitung von Konzepten .....	40
4.1.1	Entwickelte Gewinnungslinie für Polyolefine .....	40
4.1.2	Eignung einer potenziellen Anlage eines österreichischen Aufbereitungsunternehmens für die Gewinnung von Polyolefinen.....	43
4.2	Praktische Tests .....	46
4.2.1	Ergebnisse der Proben aus der Anlage des österreichischen Aufbereitungsunternehmens .....	46
4.2.1.1	2D-Material .....	46
4.2.1.2	3D-Material .....	47
4.2.2	Ergebnis der Zerkleinerer Versuche.....	49
4.2.2.1	Mobiler 1-Wellen-Zerkleinerer .....	49
4.2.2.2	Terminator Zerkleinerer.....	50
4.2.3	Mobile Versuchslinie .....	51
4.2.4	PO-Ausschleusung mittels NIR.....	54
4.2.5	Manuelle Sortierung der gewonnenen PO-Fraktion.....	56
<b>5</b>	<b>ZUSAMMENFASSUNG UND AUSBLICK.....</b>	<b>58</b>
<b>6</b>	<b>VERZEICHNISSE .....</b>	<b>60</b>
6.1	Literaturverzeichnis.....	60
6.2	Abkürzungsverzeichnis .....	64
6.3	Tabellen.....	64

---

6.4 Abbildungen .....64

# 1 Einleitung

Kunststoffe haben seit der ersten industriell hergestellten Polymere im Jahre 1907 [1] einen langen Weg hinter sich gebracht. Sie haben einen wahrlich kometenhaften Aufstieg erlebt und haben sich als die am meisten verwendeten Stoffe der Gegenwart etabliert. Es gibt keine Branche oder Produktklasse wo Kunststoffe nicht in irgendeiner Art und Weise vorkommen. Sei es angefangen von Kinderspielzeug, Lebensmittelverpackung über Baustellenmaterial bis hin zu Hochleistungskunststoffen für Spezialanwendungen in der Luft- und Raumfahrt. Dies lässt sich nicht zuletzt auch an der weltweit produzierten Kunststoffmenge ableiten. Der Verlauf der globalen Kunststoffproduktion seit 1950 wird in Abbildung 1 dargestellt.

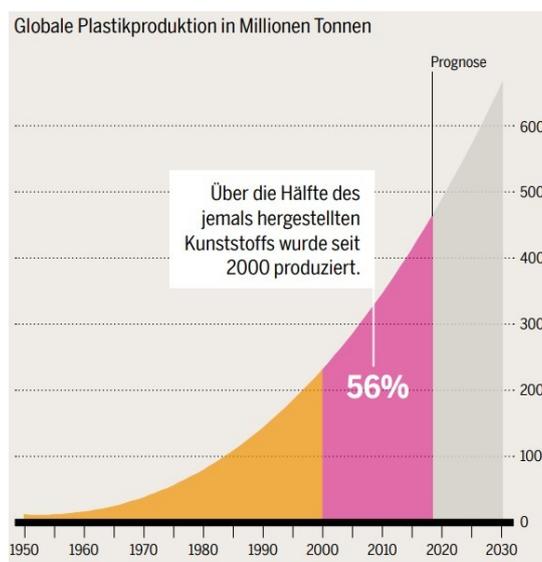


Abbildung 1: Globale Kunststoffproduktion seit 1950 [2]

Wenn man den globalen Anstieg der Kunststoffproduktion betrachtet, wirft dies natürlich irgendwann die Frage auf „Was passiert mit den ganzen Kunststoffen am Ende Ihrer Lebenszeit?“. Diese Frage ist nicht neu, nur wurde diese bis Anfang der 2000er weitestgehend vernachlässigt oder gar verdrängt, hatte man doch mit Deponierung und Müllverbrennung ein geeignetes Mittel gegen die Massen an Kunststoffabfällen in der Hand. Dieser Umstand ließ Gedanken an Wiederverwendung, geschweige denn Kreislaufwirtschaft einem Fremdwort gleichkommen und machte die Erzeugung eines Momentums in Richtung Nachhaltigkeit und Umweltbewusstsein, in den Köpfen der Menschen um ein Vielfaches schwieriger.

Erst durch verschiedene politisch orientierte Regelungen und Gesetze, wie etwa dem Deponierungsverbot, kam langsam, aber sicher Bewegung in diese Thematik und endete in ihrem jetzigen Höhepunkt, dem zuletzt von der EU verabschiedetem „Circular Economy Package“. Mit diesem hat sich die Europäische Union aber auch ambitionierte Recyclingziele gesteckt.

In diesem Paket [3] wird bis 2035 eine Recyclingquote von 65 % bei Siedlungsabfällen vorgeschrieben. Diese Ziele können nur dadurch erreicht werden, dass auch die Kunststoffe aus gemischten Siedlungs- und Gewerbeabfällen einem Recycling zugeführt werden. Dabei stehen vor allem die beiden Massenkunststoffe der Gruppe der Polyolefine, Polyethylen und

Polypropylen, aufgrund ihres großen Anteils an der Gesamtkunststoffproduktion, im Vordergrund der Betrachtungen.

Eine Möglichkeit für das Recycling von Kunststoffen ist eine bereits seit längerem bekannte und auch angewandte Variante des mechanischen Recyclings. Dabei wird anhand verschiedener mechanischer Aufbereitungsschritte versucht, ohne Zerstörung der Molekularstruktur, wieder ein Kunststoffgranulat zu erzeugen.

Die zweite hier relevante Möglichkeit ist das chemische Recycling der genannten Kunststoffe. Dabei wird aber im Vergleich zum mechanischen Recycling die molekulare Struktur zerstört und die dabei entstehenden Produkte können wieder für die Erzeugung von Grundstoffen verwendet werden.

## 1.1 Problemstellung

Die Produktion und die Qualität, der durch Recyclingverfahren erzeugten, Basisstoffe, hängen sehr stark von den verwendeten Abfallströmen, der Qualität der Aufbereitung dieser, der Verschmutzung, dem Gehalt an Stör- und Schadstoffen sowie dem wirklich darin enthaltenen Anteil an recycelbaren Kunststoffen ab. Diese Kunststofffraktion ist auch die für das Recycling wichtige Komponente und muss von allen Störstoffen befreit werden. Vorabuntersuchungen bzw. Sortieranalysen geben zwar einen guten Überblick auf die genaue Zusammensetzung eines Abfallstromes, sind aber aufgrund der Heterogenität des Abfalls nicht in dem für das Recycling gewünschte Ausmaß repräsentativ. Daher werden bereits Probeläufe bzw. Versuche mit mehreren Tonnen Material benötigt, um aussagekräftige Annahmen treffen zu können. Diese Probeläufe erfordern bereits einen hohen apparativen Aufwand und können nur mit einem oder mehreren Partnerunternehmen verwirklicht werden. Bevor dies geschehen kann, werden intensive Überlegungen und Voruntersuchungen benötigt, um die richtigen Aggregate, für den Prozess der Materialgewinnung, auswählen zu können.

## 1.2 Zielsetzung

Ziel der Arbeit ist die Erstellung von Konzepten zur maschinellen Gewinnung von Polyolefin-Konzentraten, die für das chemische bzw. mechanischen Recycling geeignet sind. Um die notwendigen Aggregate und den Verfahrensablauf auswählen zu können werden Untersuchungen der Materialien und Prozesse der Partnerunternehmen benötigt sowie die Anforderungen der Recycler im Sinne von Reinheit, Korngrößen etc. berücksichtigt. In der vorliegenden Arbeit sollen Proben von bestehenden Sortier- und Aufbereitungsprozessen auf die gesuchten Kunststofffraktionen untersucht werden, um den Anteil der wirklich enthaltenen Massenprozent zu erhalten, sowie die Eignung der aufbereiteten Fraktionen für die Verwendung in einem der beiden möglichen Recyclingverfahren zu beurteilen. Weiters sollen Tests mit unterschiedlichen Aggregaten und Anlagen diverser Partnerunternehmen durchgeführt werden, um mögliche Probleme vor der Konzepterstellung aufzeigen zu können. In weiterer Folge soll ein möglicher theoretischer Verfahrensablauf für die Gewinnung der gewünschten Fraktionen erarbeitet werden.

## 2 Theoretische Grundlagen des Kunststoffrecyclings

In diesem Kapitel wird zuerst ein Überblick über die verwendeten Abfallströme gegeben. In weiterer Folge wird die Gewinnung der Kunststofffraktionen aus gemischten Abfällen, die Eigenschaften und die Herstellung von Polyolefinen sowie die unterschiedlichen Möglichkeiten des Recyclings und der dabei auftretenden Probleme dieser Polymere beschrieben.

### 2.1 Beschreibung der Abfallströme

In diesem Unterkapitel werden die beiden in dieser Arbeit verwendeten Abfallströme genauer beschrieben. Es handelt sich dabei um die Abfallströme

- Gemischter Siedlungsabfall (Restmüll) sowie
- Gewerbeabfall

Der Gesetzgeber definiert den Begriff „Siedlungsabfall“ laut § 2 Abs. 4 Z 2 AWG 2002 [4] als jene Abfälle (gemischt oder getrennt gesammelt), aus privaten Haushalten, sowie andere Abfälle die in ihrer Beschaffenheit oder Zusammensetzung den Abfällen aus privaten Haushalten ähnlich sind, somit auch Abfälle aus Gewerbe und Industrie unter den genannten Voraussetzungen. Beispiele für Siedlungs- und Gewerbeabfälle sind u.a. Kunststoffe, Papier, Textilien, Verpackungen, Elektroaltgeräte etc.

Unter dem Begriff des „gemischten Siedlungsabfalls“ [5] auch Restmüll genannt, werden als nicht gefährlich eingestufte, Siedlungsabfälle welche aufgrund Ihrer Verschmutzung oder ihrer fehlenden Sortenreinheit, nicht einer definierten Abfallfraktion zugeordnet werden können, verstanden. Restmüll wird nach ÖNORM S 2100 die Schlüsselnummer SN 91101 (Siedlungsabfälle und ähnliche Gewerbeabfälle) [6] zugeordnet.

Unterschiedliche Faktoren beeinflussen die Zusammensetzungen der gemischten Siedlungsabfälle. Zu diesen Faktoren [7] zählen unter anderem das vorherrschende Abfallsammelsystem, die sozioökonomische Struktur oder auch die Lage der Haushalte im städtischen oder ländlichen Bereich. Die Hauptbestandteile des gemischten Siedlungsabfalls sind Kunst- und Verbundstoffe, Organische Anteile sowie Papier und Kartonagen.

Laut Bundesabfallwirtschaftsplan 2022 [8] betrug das Aufkommen von gemischten Siedlungs- und Gewerbeabfällen im Jahr 2019 rund 2 Mio. t, was einen pro Kopf Aufkommen von knapp 230 kg entspricht. Der Anteil der Kunststoffverpackungsfraktion entspricht dabei in etwa 12,3 m% was eine Menge von ca. 250 000 t darstellt.

Der Großteil dieser gemischten Siedlungs- und Gewerbeabfälle, genauer ca. 87 % [8], werden einer Thermischen Verwertung zugeführt. Dies kann entweder direkt geschehen oder nach einer erfolgten Vorbehandlung. Die Thermische Verwertung erfolgte fast ausschließlich in sogenannten „thermischen Behandlungsanlagen für Siedlungsabfälle“. Eine Verwertung in Mitverbrennungsanlagen, als Ersatz- oder Zusatzbrennstoff, spielte im Allgemeinen eine geringe Rolle.

## 2.2 Gewinnung von Kunststofffraktionen aus gemischten Abfällen

Damit ein effektives Recycling von Kunststoffabfällen aus gemischten Siedlungs- und Gewerbeabfällen erfolgen kann, müssen diese Fraktionen zuvor aus den Abfallströmen entfernt werden. Dies ist wie bereits beschrieben nur durch großen Verfahrenstechnischen Aufwand realisierbar. Es gibt dafür kein allgemeines Verfahren, welches in jeder Anlage Anwendung findet. Die einzelnen Unterschiede entstehen aufgrund der Anforderungen an die Qualität des jeweiligen Output-Materials. Hier sollen die Grundlegenden notwendigen Apparate genauer beschrieben werden.

### 2.2.1 Input-Lager

Das Anlieferungs- bzw. Input-Lager einer Abfallsortierungsanlage ist dafür zuständig den angelieferten Abfall zu homogenisieren (mit dem jeweilig genutzten Aufgabegerät oder einem eigens dafür verwendeten Gerät z.B. Radlader) und dient als Puffer um die Anlage kontinuierlich zu befüllen oder um bei etwaigen ungeplanten Stillständen den angelieferten Abfall aufnehmen zu können. Die Anlieferung des Abfalls erfolgt durch die Müllabfuhr oder wird durch Container und Lastwagen angeliefert. Bei der Lagerung ist insbesondere auf die Brandgefahr [9] zu achten und für den Brandschutz geeignete Maßnahmen zu treffen.

### 2.2.2 Sacköffner

Ein Sacköffner ist dazu notwendig um die angelieferten Abfälle welche sich, aufgrund der Sammlung [10], in einem Sack oder einer ähnlichen Hülle befinden zu öffnen und den Inhalt freizulegen. Dies ist insofern wichtig da eine effektive Sortierung nur dann stattfinden kann, wenn jedes einzelne Abfallpartikel dem Prozess zugeführt wird. Die Anforderungen [10] an eine Sacköffner sind die, dass dieser nur die Säcke öffnen soll und den Inhalt nicht zerkleinern darf. Falls dies der Fall wäre, ist dieser Öffner ungeeignet.

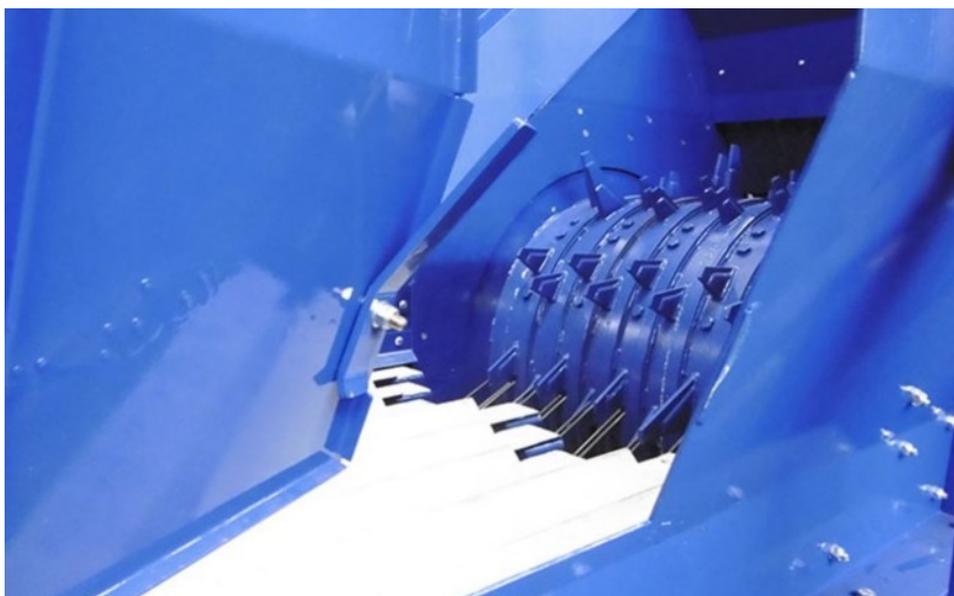


Abbildung 2: Sacköffner der Firma BRT HARTNER GmbH [11]

### 2.2.3 Zerkleinerer

Ein Zerkleinerer ist dafür verantwortlich das Material auf eine gewünschte Größe zu reduzieren. Dies ist notwendig, um die Abtrennbarkeit gewünschter Stoffe zu erhöhen und um mögliche Materialverbunde im Abfall aufzuschließen. Es gibt unterschiedliche Ausführungen solcher Aggregate wie z.B. Ein-Wellen- oder Mehr-Wellen-Zerkleinerer (siehe Abbildung 3). Diese Ausführungen hängen stark vom jeweiligen Einsatzpunkt innerhalb der Anlage ab. Die möglichen Einsatzpunkte wären

- Als Vorzerkleinerer direkt zu Beginn der Anlage nach dem Sacköffner, wobei hier die Korngröße noch groß, im Vergleich zum Endprodukt, ist (ca. 200-300 mm)
- Als Mittelzerkleinerer vor einem bestimmten Aggregat für das eine kleinere Korngröße z.B. vor einer letzten Kontrollsiebung, benötigt wird.
- Als Endzerkleinerer vor der Verpackung, um die Schüttdichte für den Transport und die weitere Verarbeitung zu erhöhen.



Abbildung 3: Mehr-Wellen-Zerkleinerer der Firma WEIMA Maschinenbau GmbH [12]

### 2.2.4 Klassierer

Als Klassierung wird die Trennung nach der Korngröße bezeichnet. Dies kann z.B. durch unterschiedlichste Siebe erreicht werden. Beispiele für Siebe sind Kreisschwingsiebmaschine, Resonanz- oder Linearschwingsiebmaschinen, Sternsiebe oder auch Trommelsiebe. Diese Aggregate können für verschiedenste Zwecke, innerhalb der Abfallaufbereitung, eingesetzt werden, wobei hervorzuheben ist, dass nicht jedes Sieb für jeden Abfall geeignet ist. Da es sich in unserem Fall um gemischten Siedlungs- und Gewerbeabfall eignet sich für die grobe Siebung ein Trommelsieb (siehe Abbildung 4) am besten, da dieses auch als mobile Einheit

verwendet werden kann. Für die Klassierung von kleineren Korngrößen [9] würden sich jedoch Resonanz- oder Linearschwingsiebmaschinen eignen.



Abbildung 4: Trommelsieb der Firma Neuenhauser Maschinenbau GmbH [13]

### 2.2.5 Eisen und Nicht-Eisen Abtrennung

Die Abtrennung von Eisen- (Fe) und Nicht-Eisen-Metallen (NEM) aus dem Abfallstrom ist ein wichtiger Bestandteil der Abfallaufbereitung. Hier geht es im Wesentlichen darum die enthaltenen Metalle möglichst vollständig zu entfernen, um nachfolgende Prozesse nicht mit Falschmaterial zu belasten oder sogar eine Beschädigung zu riskieren.

Bei der Abtrennung von Materialien auf Basis von Eisenmetallen, ist die zugrundeliegende Physikalische Kraft der Magnetismus. Dabei wird über einem Fließband ein Elektromagnet montiert, welcher in einem gewissen Abstand zu diesem die gesamte Breite des Fließbandes abdeckt und durch das erzeugte Magnetfeld die eisenhaltigen Bestandteile nach oben hin aus dem Abfall entfernt. Wie in Abbildung 5 gezeigt verfügt der Magnetscheider über ein eigenes Fließband, welches das abgetrennte Material von der magnetischen Stelle entfernt und am anderen Ende durch das Fehlen einer Magnetischen Kraft nicht mehr gehalten werden kann und dadurch den Überbandmagneten wieder verlässt.



Abbildung 5: Überbandmagnetscheider der Firma Steinert GmbH [14]

Für Nicht-Eisen-Metalle funktioniert die Abtrennung mittels Magnetscheider nicht, da diese nicht magnetisiert werden können. Hierfür muss ein sogenannter Wirbelstromscheider

verwendet werden. In diesen werden durch schnell rotierende Permanentmagneten [9], hochfrequente, magnetische Wechselfelder erzeugt, welche in den Nicht-Eisen-Metall Teilen starke Wirbelströme induzieren. Die induzierten Wirbelströme erzeugen wiederum eigene Magnetfelder, welche dem anderen Magnetfeld entgegenwirken und dadurch aus dem Abfallstrom abgelenkt werden. Die Funktion der Trennung wird in Abbildung 6 dargestellt. Mit diesem können Aluminium, Kupfer oder auch Edelstahl abgeschieden werden.

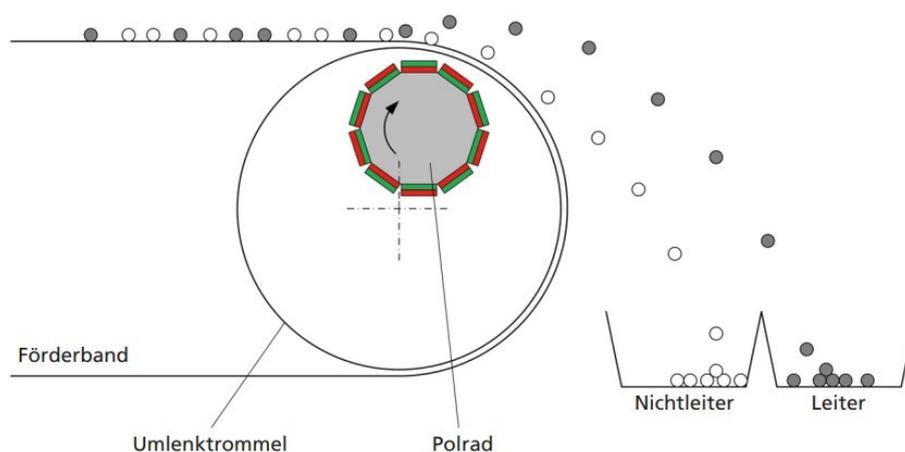


Abbildung 6: Funktionsprinzip eines Wirbelstromscheiders [15]

## 2.2.6 Windsichter

Als Windsichten [16] versteht man das Trennen von fester, disperser Phase in mindestens zwei Größenklassen in einem gasförmigen Umgebungsmedium. Es erfolgt dabei die Trennung [9] aufgrund der Dichte, Kornform und Korngröße. Es gibt eine große Palette an Windsichtern wobei die Auswahl anhand der Ausgangsmaterialien zu wählen ist. Ein Beispiel für einen weitverbreiteten Windsichter wäre ein Zik-Zak-Sichter. Anhand diesem soll das Prinzip der Sichtung näher erläutert werden. Wie in Abbildung 7 dargestellt wird das Aufgabegut in einen bestehenden Luftstrom aufgeben. Dabei werden die Teilchen, welche eine kleinere Gewichtskraft als die Auftriebskraft besitzen, mit dem Luftstrom nach oben ausgetragen. Die Teilchen welche eine größere Gewichtskraft als die Auftriebskraft besitzen, werden durch den Luftstrom nicht behindert und fallen nach unten auf z.B. ein Förderband und werden dadurch entfernt. Der Trennerfolg eines Windsichters hängt stark von dem Verhältnis der oberen zu unteren Korngröße ab. Dieses sollte maximal 3:1 [9] betragen.

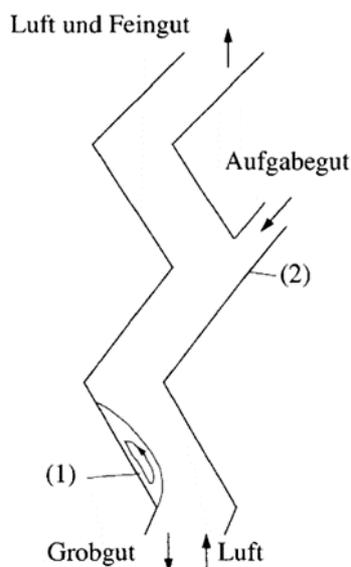


Abbildung 7: Funktionsprinzip eines Zik-Zak-Windsichters [16]

### 2.2.7 Ballistischer Separator

Die zugrundeliegende Sortiertechnik eines Ballistischen Sortierers beruht auf dem Wurfverhalten [9; 17] der unterschiedlichen Teilchen in einem Abfallstrom. Ausschlaggebend dafür sind die Form, Korngröße und Dichte der Abfallteilchen. Die Siebpaddeln werden durch Exzenter in eine Rüttelbewegung versetzt. Die Aufgabe erfolgt in der Mitte des Apparates wobei zu beachten ist, dass das Aufgabegut vereinzelt vorliegt, um einen positiven Trenngrad zu erreichen. Aufgrund der Neigung der Rüttelplatte und die Rüttelbewegung selbst werden Leicht- und Schwerfraktion voneinander getrennt. Die Leichtfraktion (z.B. Kunststoffe oder flächige Stücke) wandert nach oben, wohingegen die Schwerfraktion (z.B. Holz, Steine oder Metalle) nach unten ausgetragen werden. Die Siebpaddeln besitzen einen löchrigen Aufbau, wodurch eine zusätzliche Feinabtrennung stattfindet. In Abbildung 8 wird der schematische Aufbau eines ballistischen Separators dargestellt. Weiters ist in Abbildung 9 ein Computermodell für die bessere Vorstellbarkeit abgebildet.

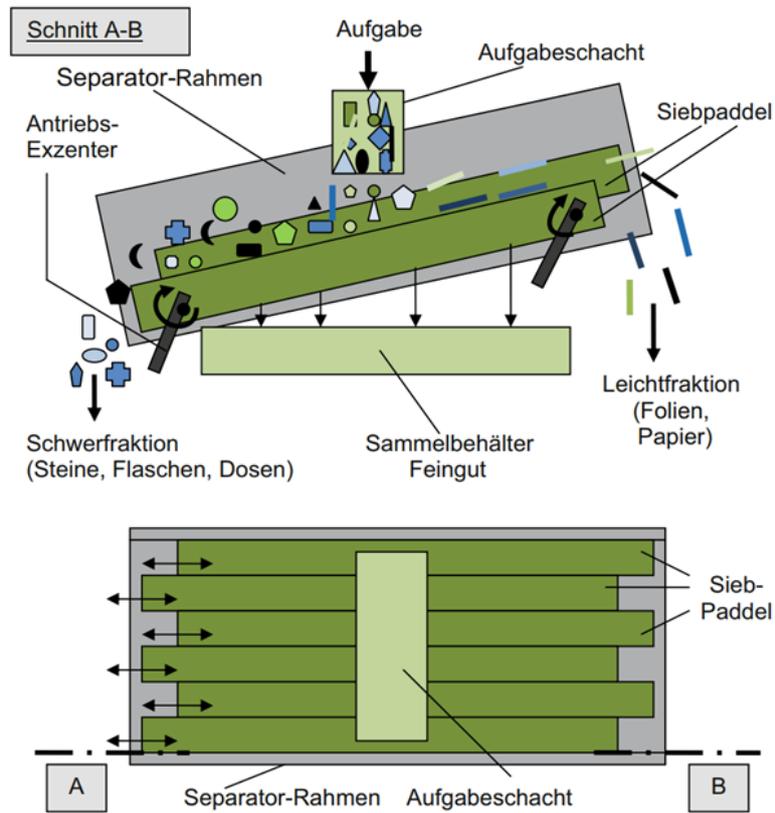


Abbildung 8: Funktionsaufbau eines Ballistischen Separators [17]



Abbildung 9: Ballistischer Separator der Firma BRT HARTNER GmbH [18]

### 2.2.8 Sensorgestützte Sortierung

Die Sensorgestützte Sortierung ist eine Einzelkorn Sortierung [9] welche anhand berührungsloser, messbarer Trennmerkmale eine Sortierung vornimmt. Es gibt verschiedene Möglichkeiten, welche auf unterschiedliche Arten von Sensorik zurückgreifen können. Möglichkeiten wären z.B. Farbsortierer, Nahinfrarotsortierer, Röntgensortierer, Formsorierer etc. Eine weitere Notwendigkeit [17] für diese Art der Sortierung ist eine präzise Ortsbestimmung der einzelnen Partikel sowie geeignete und schnelle Verarbeitung der Messsignale. Sobald die Teilchen von der Sensorik erfasst worden sind, werden diese mittels mechanischer Vorrichtungen oder mit Blasdüsen aus dem Abfallstrom entfernt. In Abbildung 10 ist beispielhaft die Sortierung auf Basis eines Nahinfrarot (NIR) -Sensors dargestellt. Die Funktionsweise eines NIR-Sensors wurde bereits im Kapitel „Analysemethoden“ erläutert und wird hier nicht weiter ausgeführt.

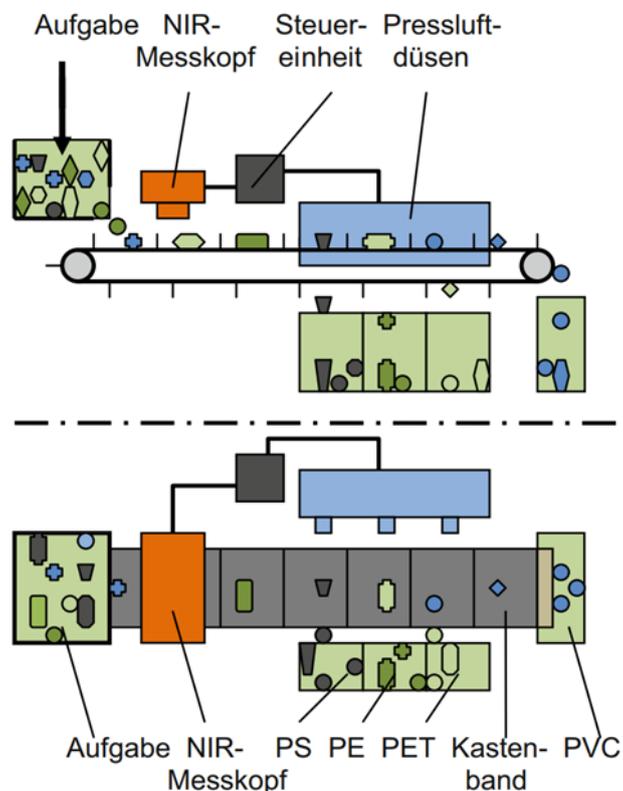


Abbildung 10: Beispiel einer Sensorgestützten Sortierung mittels NIR-Sensors [17]

### 2.2.9 Manuelle Sortierung

Manuelles Sortieren wird grundsätzlich noch angewandt aber wird immer mehr von automatischen Sortiersystemen ersetzt. Es wird vordergründig dort verwendet, wo Sensorgestützte Systeme an ihre Grenzen stoßen bzw. wo die anfallende Abfallmenge zu gering für einen wirtschaftlichen Betrieb dieser wäre, z.B. Sortierung von Gerätebatterien [17]. Sie sei hier nur vollständigkeithalber erwähnt da es doch vorkommen kann, dass diese Verwendung findet, aber die Zukunft liegt in automatischen Systemen.

### 2.2.10 Beispielhafter Aufbau einer Sortieranlage

An dieser Stelle wird beispielhaft der Aufbau und die Verwendung der vorher genannten Aggregate einer Sortieranlage aufgezeigt. Diese Anlage arbeitet mit nicht gefährlichen gemischten Siedlungs- und Gewerbeabfällen sowie mit nicht gefährlichem gemischtem Sperrmüll. Die primäre Aufgabe dieses Prozesses ist die Gewinnung von Ersatzbrennstoffen aus den vorher genannten Abfallströmen. Die angegebene Auflistung zeigt die wichtigsten Prozessschritte. Die Nebenschritte sind Abbildung 11 zu entnehmen, welches das detaillierte Verfahrensbild dieser Anlage zeigt.

- Vorzerkleinerung (250-300 mm)
- Eisenmetall Abtrennung
- Windsichtung
- Eisen- und Nichteisenmetall Trennung
- NIR-Sortierung
- Zerkleinerung (50 mm)
- Schwer- und Inertstoff Abscheider

Diese Abfallströme wurde nicht durch den Abfallerzeuger vorsortiert und können deshalb auch viele verschiedene Stoffe enthalten die, die Qualität des Ersatzbrennstoffes mindern. Beispiele für solche Stoffe sind z.B. Glas, Steine, Asche, Biogener Anteil etc. Durch diese genannten Störstoffe ergibt sich die größere und längere Verfahrensweise dieser Anlage.

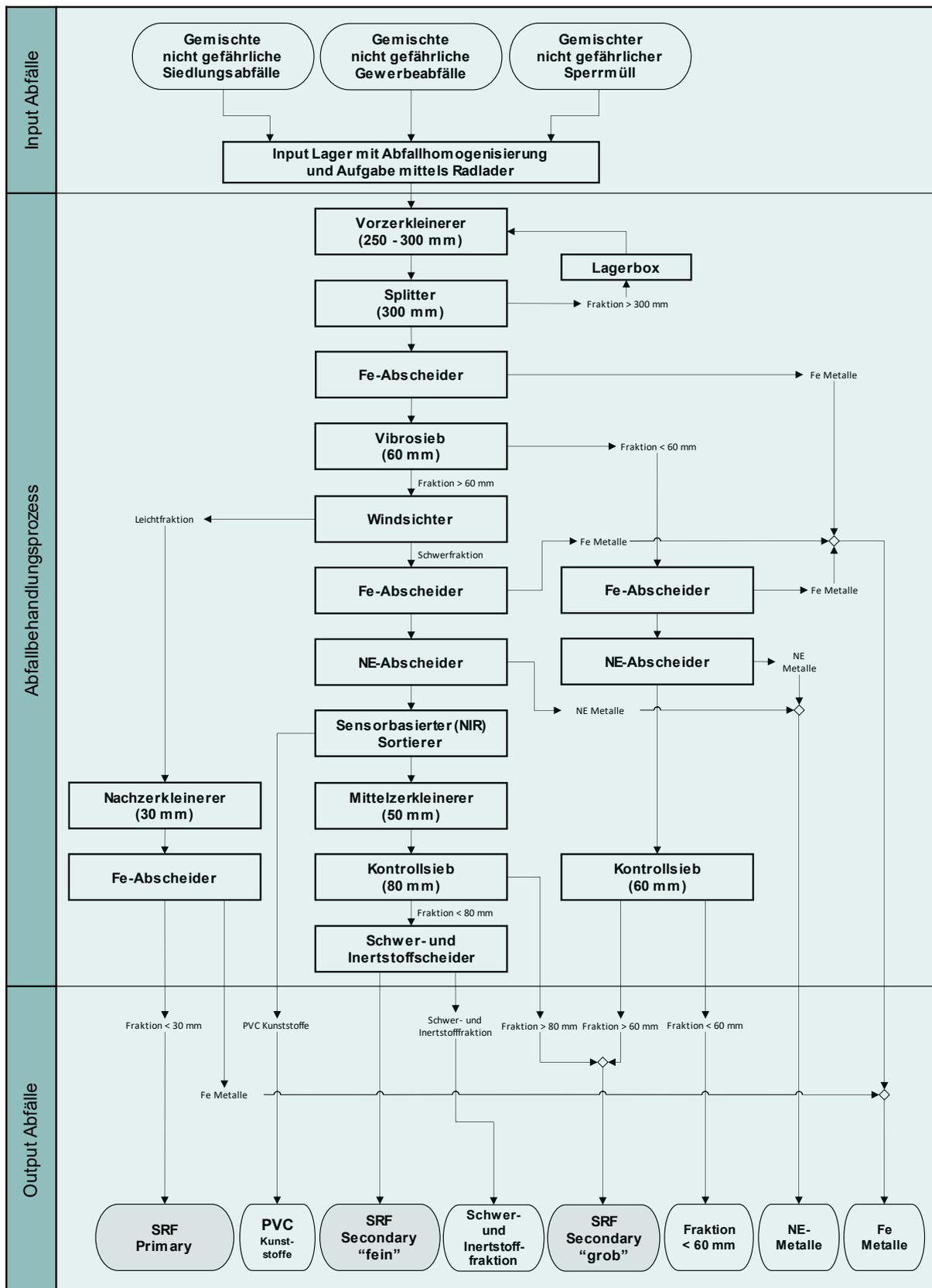


Abbildung 11: Verfahrensfliessbild einer österreichischen Abfallsplitting- und EBS-Produktionsanlage [19]

## 2.3 Kunststoffe Allgemein

Um ein besseres Verständnis für die Eigenschaften und Möglichkeiten der Kunststoffe und insbesondere der Polyolefine zu bekommen werden in diesem und dem nächsten Kapitel 2.5 die Grundlagen der Kunststoffe im Hinblick auf die genannten Polymere erarbeitet.

Aufgrund ihres Aufbaus werden Kunststoffe in die folgenden drei Gruppen eingeteilt [20]:

- Thermoplaste
- Elastomere
- Duroplaste

Da es sich bei denen in dieser Arbeit behandelten Kunststoffen (PE, PP und PS) um Thermoplaste handelt, wird auf eine genauere Beschreibung der Elastomere und Duroplaste verzichtet und sollen deswegen hier nur Vollständigkeitshalber erwähnt werden.

### 2.3.1 Thermoplaste

Thermoplastische Kunststoffe können aufgrund ihrer unvernetzten langen Molekülketten von anderen Kunststoffen unterschieden werden. Sie besitzen weitreichende und vielfältige Eigenschaften wobei im Folgenden die Wichtigsten genannt werden sollen [20] :

- Beliebig oft erweichbar
- Schweißbar
- Löslich
- Quellbar
- Bei Raumtemperatur spröde oder zähelastisch

Es wird eine weitere Unterteilung innerhalb der Thermoplaste aufgrund der Struktur getroffen. Dabei wird in Amorphe und Teilkristalline Thermoplaste eingeteilt [20]. Abbildung 12 soll den Unterschied zwischen den beiden Strukturen verdeutlichen.

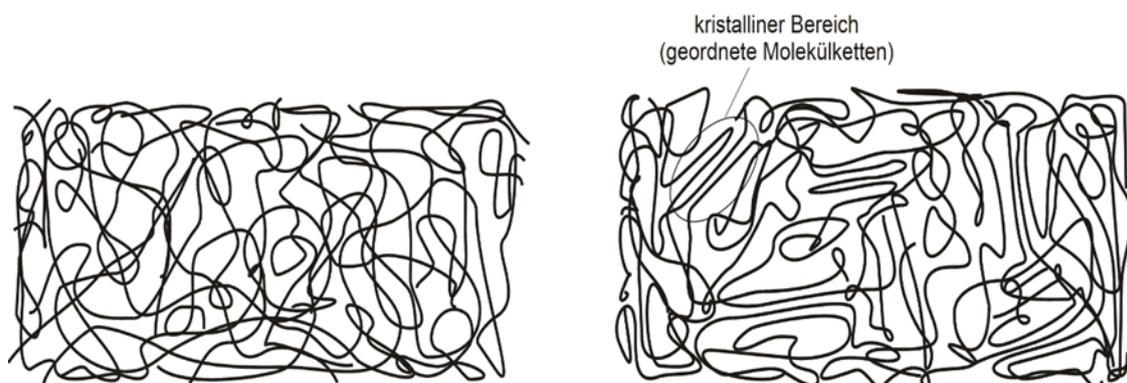


Abbildung 12: Struktur Amorpher (links) und Teilkristalliner (rechts) Thermoplaste [1]

Kristalline Bereiche innerhalb der Struktur der Polymere verleihen ein opakes bis durchsichtiges Aussehen während Amorphe Bereiche häufig durchsichtig sind [20].

Beispiele für Amorphe Typen sind zum Beispiel Polystyrol (PS) und für Teilkristalline Typen Polyethylen (PE) und Polypropylen (PP).

## 2.4 Eigenschaften PE, PP und PS

Folgendes Kapitel soll näher auf die Allgemeinen Eigenschaften, den Aufbau, die Herstellung und die Besonderheiten dieser Herstellungsverfahren der betrachteten Kunststoffe (PE, PP, PS) eingehen.

### 2.4.1 Polyethylen (PE)

Polyethylen macht etwa 30 % aller Kunststoffe aus [21] und ist der weltweit am häufigsten verwendete Kunststoff. Es ist ein teilkristalliner, unpolarer Thermoplast und wird hauptsächlich für Verpackungen und Folien verwendet. Abbildung 13 zeigt den Chemischen Aufbau von Polyethylen.

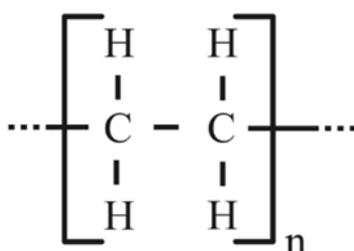


Abbildung 13: Chemischer Aufbau von Polyethylen [22]

Die verschiedenen PE und ihre Eigenschaften können teilweise stark untereinander variieren. Im Allgemeinen jedoch tauchen vier grundlegende Haupttypen auf, wobei deren Hauptunterscheidungsmerkmal [21] die Dichte ist.

Diese werden eingeteilt in:

- HDPE oder PE-HD (Polyethylen hoher Dichte)
- MDPE oder PE-MD (Polyethylen mittlerer Dichte)
- LDPE oder PE-LD (Polyethylen niedriger Dichte)
- LLDPE oder PE-LLD (Lineares Polyethylen niedriger Dichte)

Verantwortlich für die unterschiedlichen Dichtetypen ist der Verzweigungsgrad [21] der Molekülketten. Wenn dieser sehr hoch ist, dann bedeutet dies, dass die Dichte niedrig ist. Für LLDPE kommt, neben einer hohen Verzweigung, zusätzlich noch hinzu, dass die Molekülketten kurz sind.

Es gibt noch weitere spezialisiertere Typen [21] (z.B. hochmolekulares PE oder vernetztes PE) welche aber in dieser Arbeit nicht relevant sind und deshalb nur der Vollständigkeit halber erwähnt werden.

Tabelle 1 gibt einen Überblick über die unterschiedlichen Dichten die einzelnen PE-Typen.

Tabelle 1: Dichten der PE-Typen

PE-Typ	Dichte [g/cm <sup>3</sup> ]
LLDPE	0,905 - 0,941 [23]
LDPE	0,914 - 0,928 [22]
MDPE	0,926 - 0,940 [24]
HDPE	0,94 - 0,96 [22]

Für die Herstellung von Polyethylen gibt es unterschiedliche Verfahren [25], welche jeweils für verschiedene PE-Typen Verwendung finden. Das Ausgangsmaterial für die Herstellung von Polyethylen ist Ethylen-Gas. Die zugrunde liegende Chemische Reaktion wird als Polymerisation-Reaktion bezeichnet.

Diese Verfahren werden unterteilt in [25]

- Hochdruckverfahren (LDPE und LLDPE)
- Mitteldruckverfahren (HDPE)
- Niederdruckverfahren (HDPE)

MDPE kann durch Mischen von HDPE und LDPE hergestellt werden [25] und benötigt kein eigenes Verfahren.

Bei den Hochdruckverfahren wird mit Drücken zwischen 1000 und 3000 bar sowie mit Temperaturen von 80 bis 300 °C gearbeitet [25]. Hierbei dienen Sauerstoff und Peroxid als Katalysatoren bzw. Radikale. Unter diesen Verfahrensbedingungen entstehen verzweigte Polyethylen Moleküle mit unterschiedlichen Längen. Dabei können Dichten von 0,915 - 0,935 g/cm<sup>3</sup> erreicht werden.

Die Verfahren im Mittel- und Niederdruckbereich werden vorwiegend für die Herstellung von HDPE verwendet. Dabei wird im Mitteldruckbereich die Phillips-Methode und im Niederdruckbereich die Ziegler-Methode angewandt [25]. Die Unterscheidung der beiden Methoden wird über das Katalysatorsystem getätigt, wobei bei der Phillips-Methode Chromoxidkatalysatoren und bei der Ziegler-Methode Anorganische und Organische Titan- und Aluminiumverbindungen verwendet werden. Die Druckbereiche sind im Vergleich zu den Hochdruckverfahren sehr gering und befinden sich bei der Phillips-Methode zwischen 30 und 40 bar bei Temperaturen von 85 bis 180 °C und bei der Ziegler-Methode zwischen 1 bis 50 bar mit Temperaturen von 20 bis 150 °C.

### 2.4.2 Polypropylen (PP)

Polypropylen ist nach Polyethylen der am zweit häufigsten (24 % [26]) verwendete Standardkunststoff der Welt [25]. Die Hauptanwendungsgebiete sind die Verpackungsindustrie und die Textilindustrie. Er ist ein teilkristalliner und unpolarer Kunststoff. Abbildung 14 zeigt den Chemischen Aufbau von Polypropylen.

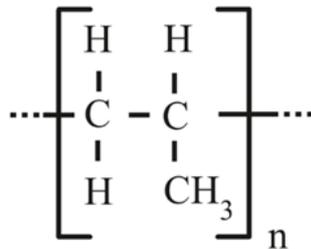


Abbildung 14: Chemischer Aufbau von Polypropylen [22]

Die Dichte von PP mit 0,90 - 0,91 g/cm<sup>3</sup> [22] fällt im Vergleich zu PE etwas geringes aus.

Die Ausgangsbasis für die Polypropylen Herstellung liefert das Propylen Gas, welches durch Kettenpolymerisation und mithilfe von Metallocen- oder Ziegler-Natta-Katalysatoren, zu langkettigen Molekülketten mit Methyl-Seitengruppen umgewandelt wird [26].

Aufgrund der Ausrichtung der Methyl-Seitengruppe wird in folgende Propylen-Arten unterschieden [26]

- ataktisches Polypropylen (zufällige Ausrichtung der Methylgruppe, PP-at)
- syndiotaktisches Polypropylen (alternierende (abwechselnde) Ausrichtung der Methylgruppe, PP-st)
- isotaktisches Polypropylen (gleichmäßige Ausrichtung der Methylgruppe, PP-it).

Die physikalischen Eigenschaften des Propylens hängen somit stark von der Regelmäßigkeit und der Verteilung der Methylgruppen ab. Der Großteil des kommerziell zur Verfügung stehenden Polypropylens hat eine Isotaktische Ausrichtung [26].

### 2.4.3 Polystyrol (PS)

Polystyrol ist mit einem Anteil von ca. 10 % an der gesamten Kunststoffproduktion der am viert meisten produzierte Kunststoff weltweit. Es ist ein glasklarer Kunststoff, den eine hohe Oberflächengüte und gute Lichtdurchlässigkeit auszeichnet. Polystyrol wird in geschäumter Form (XPS) in Dämm- und Verpackungsmaterial verwendet [27]. Abbildung 15 zeigt den Chemischen Aufbau von Polystyrol.

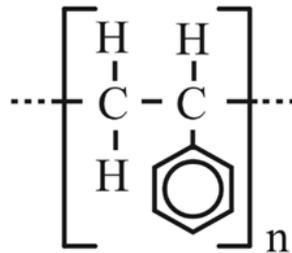


Abbildung 15: Chemischer Aufbau von Polystyrol [22]

Polystyrol kann nicht direkt aus einer aus Erdöl gewonnenen Primärchemikalie erzeugt werden [25], sondern es muss zuerst Ethylbenzol aus Benzol und Ethylen mittels  $\text{AlCl}_3$ -Katalysators synthetisiert werden bevor aus Ethylbenzol bei einer Temperatur von  $600\text{ }^\circ\text{C}$  Styrol und Wasserstoff erzeugt kann. Abbildung 16 zeigt die Reaktionsgleichung für zuvor beschriebenen Syntheseweg.

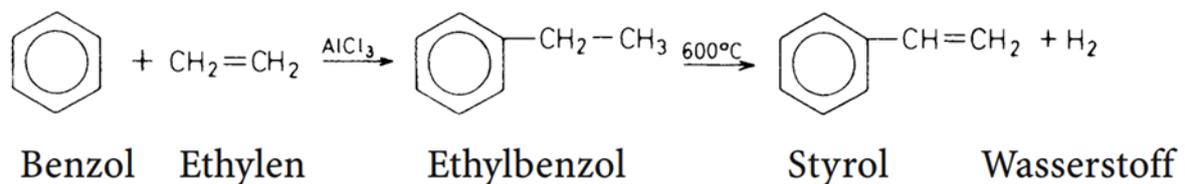


Abbildung 16: Syntheseweg für die Herstellung von Styrol [25]

Mit Styrol als Ausgangsbasis kann nun Polystyrol mittels Polymerisationsreaktion hergestellt werden. Dabei können wieder wie bei Polypropylen folgende drei Typen [25; 27] von Polystyrol synthetisiert werden.

- ataktisches Polystyrol (zufällige Ausrichtung der Phenylsubstituenten)
- syndiotaktisches Polystyrol (alternierende bzw. abwechselnde Ausrichtung der Phenylsubstituenten)
- isotaktisches Polystyrol (gleichmäßige Ausrichtung der Phenylsubstituenten).

Die entstehenden Makromoleküle besitzen einen sperrigen Aufbau [25], welcher durch die im Baustein enthaltenen Benzolringe hervorgerufen wird.

Polystyrolpolymere besitzen eine Dichte von  $1,05\text{ g/cm}^3$  [25].

## 2.5 Recyclingverfahren

In diesem Kapitel werden das Mechanische und Chemische Recycling von aus Abfällen gewonnenen Kunststoffen näher beschrieben. Dabei liegt der Fokus auf der Allgemeinen Beschreibung des jeweiligen Verfahrens, die dafür Notwendigen Eigenschaften der Eingangsstoffe, die Art und Qualität der Ausgangsstoffe sowie verschiedene Besonderheiten der einzelnen Verfahren.

### 2.5.1 Mechanisches Recycling

Beim mechanischen Recycling werden die Kunststoffabfälle zu Sekundärrohstoffen oder auch Produkten verarbeitet, wobei hierbei die chemische Verbindung der Kunststoffe nicht aufgespalten wird. Man spricht auch vom sogenannten „Wertstofflichen Recycling“.

Folgende allgemeine Verfahrensschritte beinhaltet das Mechanische Recycling:

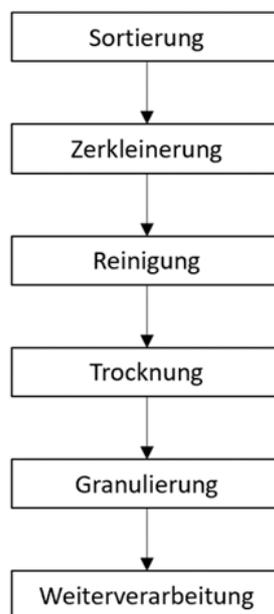


Abbildung 17:Verfahrensablauf Mechanisches Recycling [Eigene Darstellung]

Die einzelnen Schritte sind notwendig um die Qualität der am Ende erzeugten Produkte so hoch wie möglich zu halten und die Aggregate in den einzelnen Prozessschritten (vor allem der beiden letzteren) nicht zu beschädigen.

In weiterer Folge werden die einzelnen Schritte kurz beschrieben:

**Sortierung:** Die jeweiligen gewünschten Kunststoffe müssten bei der Weiterverwendung Sortenrein vorliegen, um die Qualität der Rezyklate nicht zu verringern und den Eintrag von unerwünschten Stoffen so gering wie möglich zu halten.

**Zerkleinerung:** Die zuvor sortierten Kunststoffe werden nun in einem zweiten Schritt auf eine bestimmte Korngröße für die spätere Weiterverarbeitung (z.B. in einer

Extrusionsmaschine) gebracht. Dies ist auch ein Notwendigerer Schritt, um das Volumen des zu verarbeitenden Materials zu verkleinern und um es auch (falls benötigt) besser Zwischenlagern zu können. Das dabei entstandene Zerkleinerungsgut wird auch als Kunststoff-Flakes bezeichnet.

**Reinigung:** Die im vorhergehenden Schritt erzeugten Flakes können durch verschiedene Ursachen (z.B. Essenrückstände oder Staub) verunreinigt sein. Diese Verunreinigungen können bei der Granulierung oder bei der Weiterverarbeitung Schwierigkeiten bereiten und müssen deshalb gereinigt werden. Dies geschieht meistens durch eine Nass-Wäsche mit Wasser. In gewissen Fällen kann auch eine Heiß-Wäsche benötigt werden, um den notwendigen Reinheitsgrad zu erreichen.

**Trocknung:** Damit es bei der Extrusion/Granulierung zu keiner Blasenbildung oder einem Wassereinschluss innerhalb der Kunststoffkugeln kommt bzw. die Innenflächen der Extrusionsmaschine nicht zu Rosten beginnen müssen die gewaschenen Flakes vor der Granulierung getrocknet werden.

**Granulierung:** Da es selten direkt möglich ist die getrockneten Kunststoff-Flakes direkt in der Weiterverarbeitung (z.B. Spritzgussmaschinen) einzusetzen, müssen diese vorher granuliert werden. Es gibt jedoch gewisse Anlagen bzw. Maschinen die Kunststoff-Flakes direkt verwenden können. Dafür bedarf es grundsätzlich spezieller Maschinen [28] welche jedoch nicht Teil dieser Arbeit sind.

Da in dieser Arbeit ausschließlich PE, PP und PS behandelt werden, werden hier kurz die bestimmenden Unterschiede in den einzelnen Verfahrensschritten, der verschiedenen Kunststoffarten, gegenübergestellt:

In Abbildung 18 wird der Ablauf der PE/PP-Granulat Erzeugung dargestellt. Zu erkennen ist, dass hier die Trennung der PE/PP-Fraktion, von diversen Störstoffen und unerwünschten Fraktionen, über eine Gravimetrische [29] Schwimm-Sink-Trennung erfolgt. Hierbei spielt die Dichte der beiden Kunststoffe eine wichtige Rolle. Da das Material bereits eine Vorsortierung durchlaufen hat und somit keine nicht Kunststoffe mehr vorhanden sein sollten bezieht sich diese Art der Trennung nur auf Kunststoffe oder Störstoffe, welche zuvor nur unzureichend abgeschieden werden konnten.

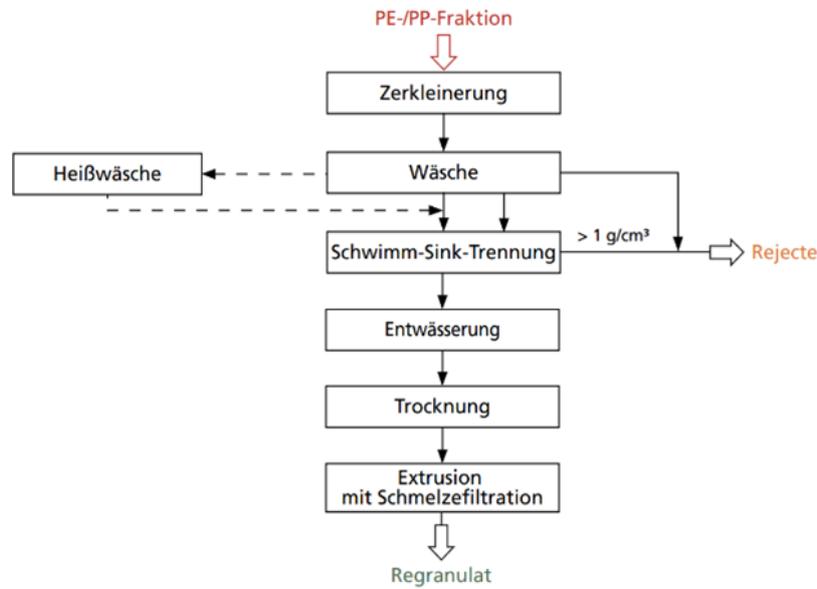


Abbildung 18: Verfahrensablauf für die Erzeugung von PE/PP Granulat aus PE/PP-Abfällen [29]

Für PS-Granulat ergibt sich ein ähnlicher Verfahrensablauf (siehe Abbildung 19) wie für PE/PP, wobei hier aufgrund der höheren Dichte von PS ( $>1 \text{ g/cm}^3$ ) die vor Abbildung 18 beschriebene Schwimm-Sink-Trennung um eine zweite Stufe [29] ergänzt werden muss, um wirklich nur PS abzuscheiden. In der ersten Stufe der Trennung werden mittels Wasser Kunststoffe wie PE oder PP abgeschieden während in der zweiten Stufe mittels einer wässrigen Salz-Wasser-Lösung [29] Partikel wie PVC, PET, PLA oder Aluminium abgetrennt werden.

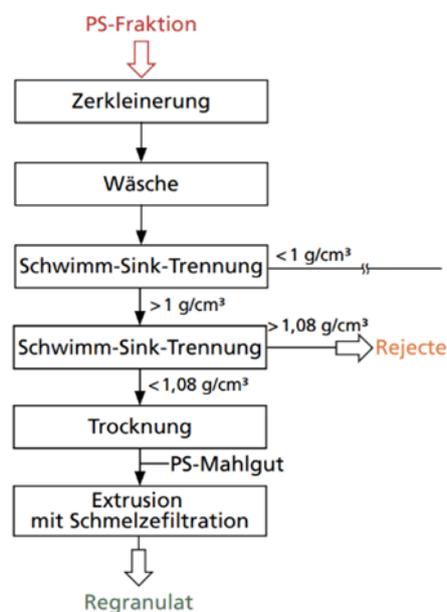


Abbildung 19: Verfahrensablauf für die Erzeugung von PS-Granulat aus PS-Abfällen [10]

## 2.5.2 Chemisches Recycling

Im Vergleich zum mechanischen Recycling wird beim chemischen Recycling die Makromolekulare Struktur des Kunststoffes zerstört und wieder in einen Grundstoff für die Synthese neuer Kunststoffe umgewandelt [29]. Dies wird neben der besseren Möglichkeit, Schadstoffe abzutrennen, als Vorteil gegenüber dem Mechanischen Recycling betrachtet. Es ergibt sich jedoch aufgrund des Verfahrenstechnischen mehr Aufwandes, ein Finanzieller Nachteil.

Im Zuge des Chemischen Recyclings werden folgende Arten unterschieden. Diese ergeben sich durch die Art und Weise wie die Molekülketten gespalten werden [30].

- Verflüssigung
- Pyrolyse
- Vergasung

Anschließend werden die einzelnen Möglichkeiten des Chemischen Recyclings kurz erklärt und gewisse Eigenschaften oder Besonderheiten hervorgehoben.

**Verflüssigung:** Die Verflüssigung, welche auch als Hydrierung bezeichnet werden kann, findet in Inerter Atmosphäre statt. Dabei wird das Eingangsmaterial bei 400 °C depolymerisiert [17]. Dies ist jedoch nur der erste Verfahrensschritt und im Anschluss erfolgt in der zweiten Verfahrensstufe bei einem Druck von 200 bis 250 bar und einer Temperatur von 450 °C mit Wasserstoff die eigentliche Hydrierung. Bei der Hydrierung selbst werden die Molekülketten gespalten und anschließend Wasserstoffatome an diese angelagert. Dadurch entstehen Öle welche direkt und ohne Probleme in Öltraffinerien eingesetzt werden können. Die Ausbeute beim eigentlichen Hydrierungsprozess beträgt in etwa 90 % [17].



Abbildung 20: Spaltung von Polyolefinketten während des Verflüssigungsprozesses [17]

Ein Vorteil dieser Methode ist, dass in Kunststoffabfällen enthaltenes PVC nicht vorher aussortiert werden muss, da das Chlor nach der Depolymerisation als HCL aus dem Abgas entfernt werden kann [17].

**Pyrolyse:** Bei der Pyrolyse werden die Kunststoffabfälle, unter Ausschluss von Sauerstoff, auf Temperaturen zwischen 500 und 800 °C erhitzt [17]. Durch den Ausschluss von Sauerstoff werden die langkettigen oder vernetzten Kohlenwasserstoffe der Kunststoffe vollständig zersetzt. Dabei entstehen drei unterschiedliche Komponenten [17]:

- Pyrolysegas
- Pyrolyseöl

- Pyrolysekoks

Dabei sind das Gas und das Öl reich an Wasserstoff wohingegen das Koks Wasserstoff arm ist. Der Einsatzkunststoff bestimmt die Mengenverhältnisse der Endprodukte. Man kann aber mit einer Verteilung [17] von ca. 30-55 % Gas und 40-50 % Öl rechnen. Hohe Koksanteile entstehen dann, wenn Kunststoffe wie Gummi, PC oder PF verwendet werden. In Abbildung 21 wird der Schematische Aufbau einer Pyrolyseanlage mit Drehrohrrofen gezeigt.

Das dabei entstehende Öl kann als Ausgangsbasis in der Petrochemischen Industrie verwendet werden. Weiters können Öl und Koks auch als Grundstoffe für die Vergasung eingesetzt werden. Dies bringt Vorteile gegenüber anderen Einsatzstoffen, da diese bereits gereinigt und frei von Störstoffen sind. Das Pyrolysegas kann als Erdgasersatz verwendet werden.

Ein weiterer Vorteil dieser Methode ist, dass aufgrund der hohen Temperaturen und der raschen Abkühlung des Gases nach der Erzeugung, die Bildung von Dioxinen und Furanen verhindert wird [17].

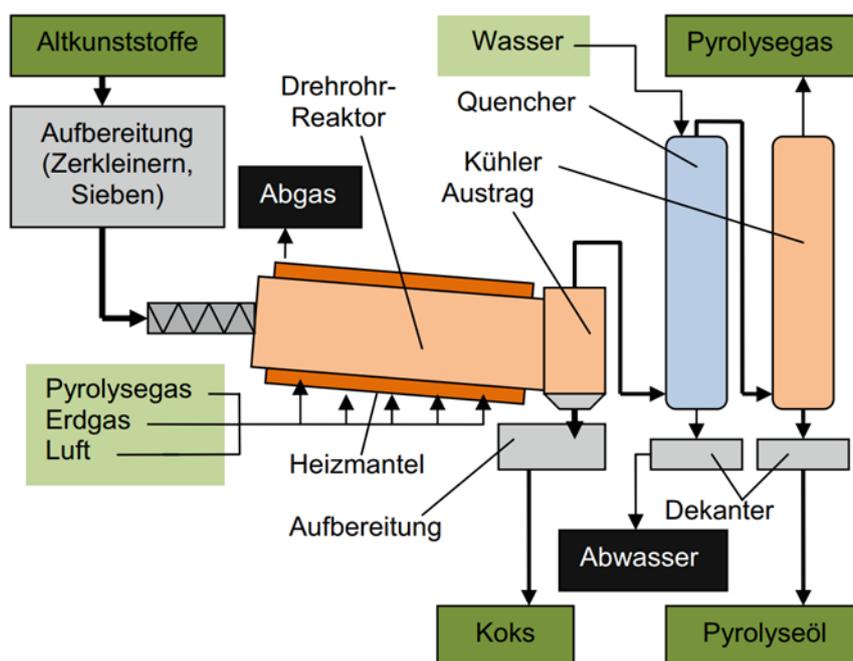


Abbildung 21: Schematische Darstellung einer Drehrohrpyrolyseanlage [17]

**Vergasung:** Bei der Vergasung werden Kunststoffabfälle mit sogenannten Vergasungsmitteln (Sauerstoff, Wasserdampf oder Kohlendioxid) [17] und Temperaturen zwischen 800 und 1600 °C zu Gasmischungen aus CO<sub>2</sub>, H<sub>2</sub> und CH<sub>4</sub> umgewandelt. Hierbei kann auch das aus der Pyrolyse stammende Koks oder Öl verwendet werden.

Dass entstehende Gasmisch kann nach der Abkühlung und Reinigung als Brenngas in unterschiedlichen Anwendungen (z.B. Wärmeerzeugung, Gasmotor, Stromerzeugung) Verwendung finden [17].

Über die Jahre hinweg hat sich die Festbettvergasung als bewährte Technik durchgesetzt [17]. Wie in Abbildung 22 ersichtlich, wird das Einsatzmittel oben aufgegeben und wandert dann die verschiedenen Temperaturzonen nach unten durch. Dabei strömt das Vergasungsmittel von unten nach oben durch den Reaktor hindurch und tritt oben als Vergasungsrohgas und Pyrolysegas wieder aus.

Bei der Vergasung ist zu beachten, dass Verunreinigungsgrenzen mit max. 10 % Störstoffen und max. 10 % PVC-Anteil eingesetzt werden dürfen [17].

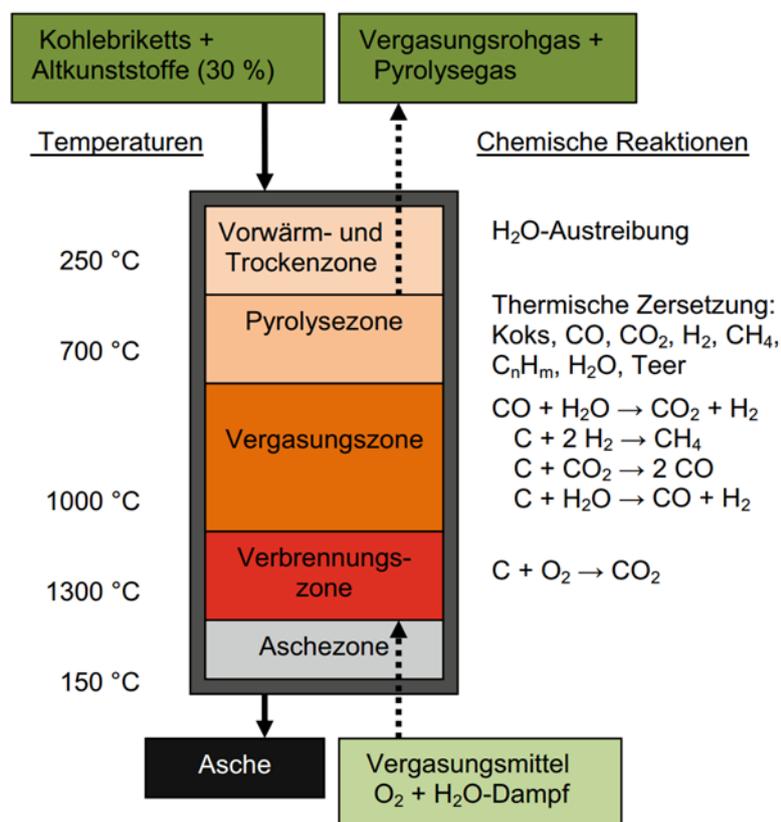


Abbildung 22: Schematischer Aufbau eines Festbettvergasers mit ablaufenden Reaktionsgleichungen [17]

## 2.6 Probleme beim Recycling

Wie bereits in Kapitel 2 erwähnt, ist in den genannten Abfallströmen, ein nicht unerheblicher Anteil von Störstoffen, welcher durch z.B. Fehlwürfe oder aufgrund des Materialverbundes eingetragen werden, enthalten. In diesem Kapitel werden drei Möglichkeiten beschrieben, die bei den in Kapitel 2.2 beschriebenen Recyclingverfahren Probleme verursachen können.

### 2.6.1 Fehlwürfe

Fehlwürfe sind ein nicht zu unterschätzender Teil des gemischten Siedlungsabfalles. Dabei handelt es sich um Fraktionen wie z.B. Glas oder Papier welche eigentlich einer getrennten Sammlung zugeführt werden sollten, aber dann doch aus verschiedenen Gründen in der falschen Abfallfraktion landen. Diese Fehlwürfe müssen dann durch erheblichen finanziellen und apparativen Aufwand daraus entfernt werden und dem eigentlich richtigen Abfallstrom zugeführt werden. Erst danach kann das volle Recyclingpotential, welches in Abfallströmen liegt, zu großen Teilen ausgeschöpft werden.

Fehlwürfe können dahingehend problematisch für das Recycling werden, da diese Anlagen beschädigen (z.B. Brandgefahr durch Batterien in Sortieranlagen oder Metalle und Glas in weiterführenden Verarbeitungsanlagen) oder die Qualität der erzeugten Materialien verringern können. Jährlich werden etwa 100 Tonnen Batterien im Restmüll [31] entsorgt und bilden damit ein riesiges Gefahrenpotential.

### 2.6.2 Verschmutzung

Ein weiterer Punkt, der nicht unerheblich für das Recycling ist, ist die Verschmutzung der Kunststoffabfälle. Diese kann entweder bereits vor der Entsorgung entstanden sein (z.B. Lebensmittelverpackungen) oder durch Zugabe und Vermischung von anderen Abfällen und Fehlwürfen (z.B. Straßenkehricht oder falsch entsorgter Biogener Abfall).

Die Verschmutzung erschwert die Sortierung der einzelnen Fraktionen teilweise doch erheblich, da die Möglichkeit besteht, dass das Kunststoffpartikel von den Spektrometrischen Analysen nicht erkannt wird und dadurch die zu recycelbare Menge reduziert wird, wodurch dieser eigentliche Ausschuss einer weniger wertvollen Verwertung zugeführt wird.

### 2.6.3 Schadstoffe

Kunststoffe enthalten nicht nur das in Kapitel 3 beschriebene Polymer sondern auch bestimmte Zusatzstoffe, Füllstoffe, Verstärkungsmittel [17; 25] etc. Diese Begleitstoffe müssen für das Recycling unbedingt beachtet werden da diese doch Einfluss auf die Qualität der Rezyklate bzw. der neu erzeugten Produkte. Zusatzstoffe werden in der Kunststoffherzeugung eingesetzt, um die Verbesserung bei der Verarbeitung zu erzielen und um die Anwendungstechnischen Eigenschaften der Produkte zu verbessern. Im Folgenden werden die einzelnen Arten der Zusatzstoffe näher erläutert.

**Gleitmittel:** Diese Mittel werden zu Verbesserung der Verarbeitbarkeit eingesetzt. Sie verbessern die innere und äußere Gleitfähigkeit bei der Formgebung. Sie können auch [25] die Entformbarkeit, das Blockverhalten und den Oberflächenglanz günstig beeinflussen. Es werden dabei [17] Fettsäureester, Metallseifen, Fettsäureamide u. a. verwendet.

**Antiblockmittel:** Sie werden verwendet um das Zusammenbacken von Folien auf der Rolle oder Stapeln zu verhindern. Dafür eignen sich [17] Kreide, Kieselerde oder synthetische Kieselsäure.

**Trennmittel:** Diese werden in Flüssiger oder Pulver Form [25] auf Press- oder Spritzgusswerkzeuge aufgetragen, um das Lösen des Bauteils zu erleichtern. Es werden dazu Wachse, Polyethylenglycole oder auch Silicone verwendet. Diese können während des Bearbeitungsprozesses in den Bauteil übergehen.

**Stabilisatoren:** Unter Einwirkung von Wärme, UV-Strahlung und mechanischer Verformung können sich freie Radikale bilden [17]. Diese rufen einen Abbau des Polymers hervor und setzen dadurch gewisse Eigenschaften der Kunststoffe herab. Zum Einsatz kommen dabei unter anderem Benzophone, organische Phosphite sowie auch organische Verbindungen von Blei, Cadmium, Barium, Zinn und Zink.

**Antistatika:** Um die elektrischen Ladungen [25] auf den Oberflächen der Kunststoffe zu verteilen bzw. zu vermeiden oder abzuleiten und dadurch das Gefahrenpotential zu senken werden Antistatika verwendet. Dazu werden u. a. [17] Fettsäureester, Amine, Sulfonate oder auch Spezialruß, Karbonfasern Metallfasern sowie Aluminiumbedampfungen oder Leitlacke verwendet.

**Flammschutzmittel:** Wenn Kunststoffe in Brandschutzausrüstungen [25] verwendet werden müssen diese mit Flammschutzmittel versehen sein um das Risiko für die Zersetzung, Brenngeschwindigkeit, Flammenausbreitung und Rauchentwicklung zu verringern. Dafür werden Organische Mittel auf Basis von Chlor- oder Bromverbindungen sowie Anorganische Verbindungen wie Hydroxide, Borate oder Phosphate verwendet [17]. Neuere Verbindungen wären Aluminiumhydroxid, Magnesiumhydroxid und Zinkborat.

**Farbmittel:** Diese dienen zur Einfärbung der Kunststoffe [25]. Dabei können lösliche und unlösliche Farbstoffe verwendet werden. Das Bekannteste wäre dabei das Weißpigment Titandioxid.

**Weichmacher:** Sie werden verwendet, um die Härte und die Sprödigkeit [25] von Polymeren zu verringern. Dies wird durch die Vergrößerung der Abstände zwischen den Molekülketten erreicht. In erster Linie werden Phtalsäureester [17] wie z.B. Dioctylphtalat verwendet.

**Haftvermittler:** Durch diese Substanzen werden enge physikalische oder chemische Bindungen zwischen zwei Substraten hergestellt. Diese Eigenschaft ist insbesondere beim Recycling von großer Bedeutung [25].

**Treibmittel:** Für die Herstellung von Schaumstoffen oder geschäumten Kunststoffen können neben einfachen Verfahren mit Luft auch sogenannte Chemische Treibmittel verwendet werden. Dabei ist das bekannteste Treibmittel [25] für Thermoplaste Azodicarbonamid (ADC).

**Füllstoffe und Verstärkungsmittel:** Füllstoffe erhöhen die Dichte, E-Modul, Druck- und Biegefestigkeit, Härte u. a. Eigenschaften, welche für die verschiedenen Einsatzgebiete gewünscht werden. Dazu werden z.B. Kreide, Talk, Cellulose etc. verwendet [25].

Verstärkungsmittel wie zum Beispiel Vliese, Glasfasern oder Kohlestofffasern erhöhen die Festigkeit erheblich [25].

Laut Deutschen Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und nukleare Sicherheit (BMU) [32] handelt es sich bei den relevantesten Halogenierten Organischen Stoffen in Polyolefinen um folgende Stoffe

- HBCDD (1,2,5,6,9,10-Hexabromcyclododecan)
- TBBPA (Tetrabrombisphenol A)
- SCCP (short-chained chlorinated paraffins, Kurzkettige Chlorierte Paraffine)
- POP-BDE (Persistent Organic Polutants - Bromdiphenylether, Persistente Organische Schadstoffe)
- DP+ (Dechloran Plus)
- TCS (Trichlorsilan)

Bei diesen Stoffen handelt es sich um Stoffe welche als problematisch beim Recycling, vor allem beim Chemischen Recycling, anzusehen sind. Es sollte auch hiermit die Dringlichkeit einer korrekten Entsorgung erwähnt werden, da diese Stoffe auch schwere gesundheits- und umweltschädliche Auswirkungen haben.

### 3 Material und Methoden

Dieses Kapitel beschreibt die Methodik dieser Arbeit, sowie die Probenahme der beschriebenen Abfallströme und welche Analysemethoden zur Bestimmung der einzelnen Fraktionen der Probe verwendet wurden. Weiters werden hier auch die Versuchsaufbauten bzw. Anordnungen der verwendeten Aggregate beschrieben.

#### 3.1 Methodik

Die Herangehensweise für die Entwicklung des Konzeptes zu PO-Gewinnung wurde mit einer Recherche der Literatur und einer Theoretischen Untersuchung der Eigenschaften von Polyolefinen begonnen. Weiters wurden die Anforderungen der Recycler an die PO-Konzentrate durch ExpertInnengespräche erhoben. Anhand dieser Anforderungen wurden theoretische Konzepte zur Gewinnung geeigneter Fraktionen erarbeitet und anhand von Großversuchen erste Tests zur Eignung der Konzepte und einzelner Aggregate bzw. Technologien durchgeführt. Dabei wurden auch Proben aus einer bestehenden Anlage entnommen und untersucht.

#### 3.2 Probenahme an bestehender Aufbereitungsanlage

Diese Probenahme erfolgte bei einem österreichischen Aufbereitungsbetrieb. Diese erzeugt aus gemischten Kunststoffballen Ersatzbrennstoffmaterial. Es wurden dabei jeweils Proben der erzeugten 2D und 3D-Fraktion genommen. Für die Probenahme wurden die entstandenen Haufen der einzelnen Fraktionen an geeigneten Stellen, und auch unter der Oberfläche beprobt. Bei der Beprobung der 2D-Fraktion wurde darauf hingewiesen, dass es aufgrund einer Fehlfunktion in der Sortieranlage zu einem Eintrag von Material der Größe <10 mm gekommen ist.



Abbildung 23: Probenahme (links) des 2D-Materials (rechts) [Foto: Sandra Viczek]



Abbildung 24: Probenahme (links) des 3D-Materials (rechts) [Foto: Sandra Viczek]

### 3.3 Analysemethoden

Für die Analyse der Proben aus der Probennahme werden zwei unterschiedliche Analyseverfahren gewählt. Für die 2D-Fraktion wurde die FTIR-Spektroskopie gewählt und für die 3D-Fraktion die Analyse mittels NIR-Sortierer.

#### 3.3.1 Fourier Transformation Infrarot Spektroskopie (FTIR)

Da es sich hierbei um eine spektrometrische Methode handelt, wird wie bei jeder anderen Art dieser Analyseform, ein bestimmter Abschnitt des elektromagnetischen Spektrums bei der Analyse verwendet. In diesem Fall [33] handelt es sich um den Infraroten (IR) Anteil (Wellenlängen zwischen 780 nm und 1 mm) des Spektrums.

Die Analytik beruht auf der Wellenlängenabhängigen Wechselwirkung [33] zwischen IR-Strahlung und dem Probenmaterial. Es werden dabei Strahlen aus dem IR-Spektrum vom Probenmaterial absorbiert. Dadurch kann die Lage oder die Bindungslänge zwischen den Atomen in den Molekülen verändert werden. Diese Veränderung verläuft schwingungsartig wodurch anzunehmen ist, dass ein Teil der Strahlung in Bewegungsenergie umgewandelt wird.

Grundsätzlich unterscheiden sich FTIR-Geräte nicht von anderen UV/VIS- und IR-Spektrometern. Es handelt sich in der Regel um sogenannte Einstrahlgeräte. Dies bedeutet, dass vor der eigentlichen Messung der Background [33] (sprich eine Messung ohne Probe im Messgerät) gemessen werden muss. Danach wird die Probe gemessen und im Anschluss erfolgt die Subtraktion der Backgroundmessung von der Probemessung, was das eigentliche Spektrum der Probensubstanz dargestellt.

In Abbildung 25 wird der Aufbau eines FTIR-Spektrometers mit Signalauswertung gezeigt.

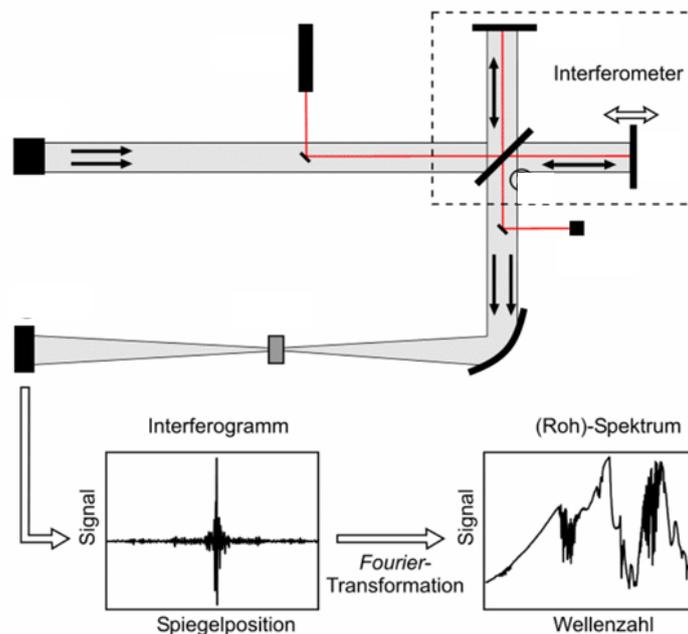


Abbildung 25: Aufbau eines FTIR Spektrometers mit Signalauswertung, erweitert nach [34]

Ein weiteres Prinzip, welches für FTIR-Messungen besonders wichtig ist, ist das Prinzip der abgeschwächten Totalreflexion [33] (im Englischen auch ATR „Attenuated Total Reflection“ genannt). Dabei wird die zu untersuchende Probe in Kontakt mit einem Kristall gebracht, der einen höheren Brechungsindex als die Probe aufweist. Der einfallend IR-Strahl dringt trotz Totalreflexion einige Mikrometer in das Probenmaterial ein. Durch das Eindringen in die Probe wird der einfallende IR-Strahl um einen gewissen Anteil geschwächt, da dieser Anteil vom Probenmaterial absorbiert wird. In Abbildung 26 wird dieser Vorgang Grafisch dargestellt.

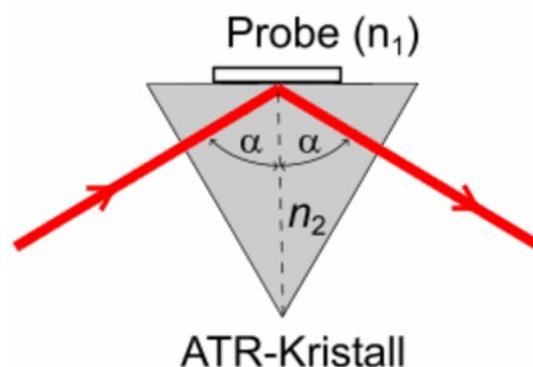


Abbildung 26: Vorgang der abgeschwächten Totalreflexion [33]

In einem Standard-Universal-ATR ist ein Zinkselenid oder Diamantkristall verbaut [33]. Für die Aufnahme eines Spektrums wird die Probe auf der glatten Oberfläche des Kristalls platziert und mit einer Anpressschraube angepresst, um einen guten Kontakt zwischen Probe und Kristall zu ermöglichen. Die Identifikation der Probe wird mithilfe einer Spektrenbibliothek ermöglicht.

### 3.3.1.1 Untersuchung der 2D-Fraktion der Kunststoffproben

Bevor mit der Analyse der 2D-Fraktion gestartet werden konnte, wurde die gesamte Probenmenge homogenisiert, um eine möglichst gleichmäßige Verteilung der Inhaltstoffe zu gewährleisten. Dazu wurden alle Probenbehälter auf einer Laborbank entleert und danach mit einer Schaufel bestmöglich durchmischt. Anschließend wurde das Material Dreiecksförmig aufgeschichtet und wieder in die Probenbehältnisse aufgeteilt.

Anschließend wurde einer dieser Behälter zufällig ausgewählt und für die Analyse herangezogen. Bevor die Untersuchung mittels FTIR starten konnte, wurde noch eine Siebung mit einem Rundsieb mit einer Maschenweite von 10 mm durchgeführt, um den Anteil <10 mm aus der Probe zu entfernen. Dies war aufgrund der im Kapitel der Probennahme beschrieben Situation notwendig.

Danach konnte der Anteil der >10 mm an der Probenmenge untersucht werden. Dazu wurden die einzelnen Stücke in das FTIR eingespannt und das Spektrum ausgewertet.

### 3.3.2 Sortier-Analyse mit Technikum Sortierer

Im Technikum des Lehrstuhls für Abfallwirtschaft und Abfalltechnik befindet sich ein Labor-Sortierer mit dem Sortieranalysen und Versuche im kleinen Maßstab umgesetzt werden können.

Die dem Sortierer zugrundeliegende Analysemethode basiert auf der Analyse des Nah-Infrarot (NIR) Spektrums. Dabei wird, wie in Abbildung 27 dargestellt, die Probe mit NIR-Strahlung beleuchtet und dann das reflektierte Spektrum der Probe mit einem Detektor aufgenommen. Dieses Spektrum kann dann über eine Software ausgewertet werden und dann wie in Abbildung 27 (rechts) angezeigt werden.

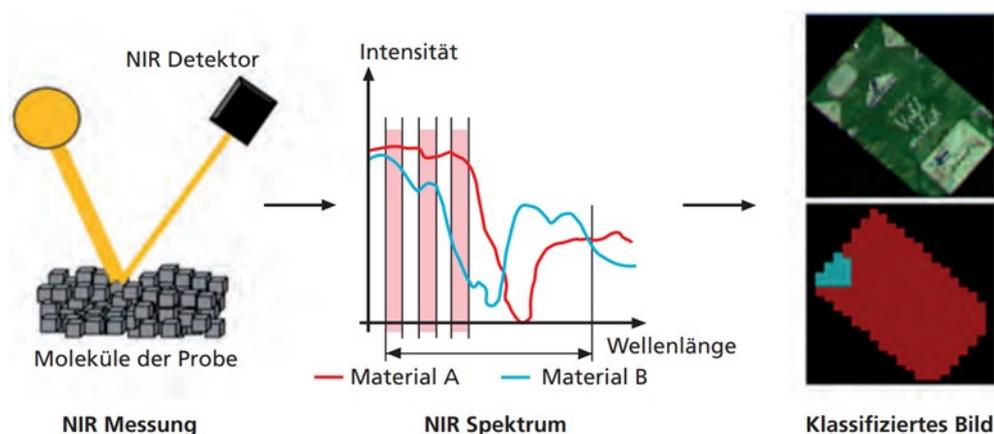


Abbildung 27: Funktion einer NIR-Erkennung [35]

Dieses Spektrum kann dann mit Referenzwerten verglichen werden und so die Zusammensetzung des Probenmaterials ermittelt werden. Das Spektrum der

Nahinfrarotstrahlung liegt in einem Frequenzbereich von 780 bis 3000 nm. Für die Kunststofferkennung sind jedoch nur der Bereich zwischen 1200 und 2000 nm relevant [35].

In Abbildung 28 ist der Aufbau des Labor-Sortierers abgebildet. Wie zu erkennen ist besteht dieser aus einer Rüttelplatte (1) für die Materialaufgabe (2), dem NIR-Analysegerät (3), der Systemsteuerung (4), den Auffangbehältern (5), einer Abrutschplatte (6) und den Luftdüsen (7).

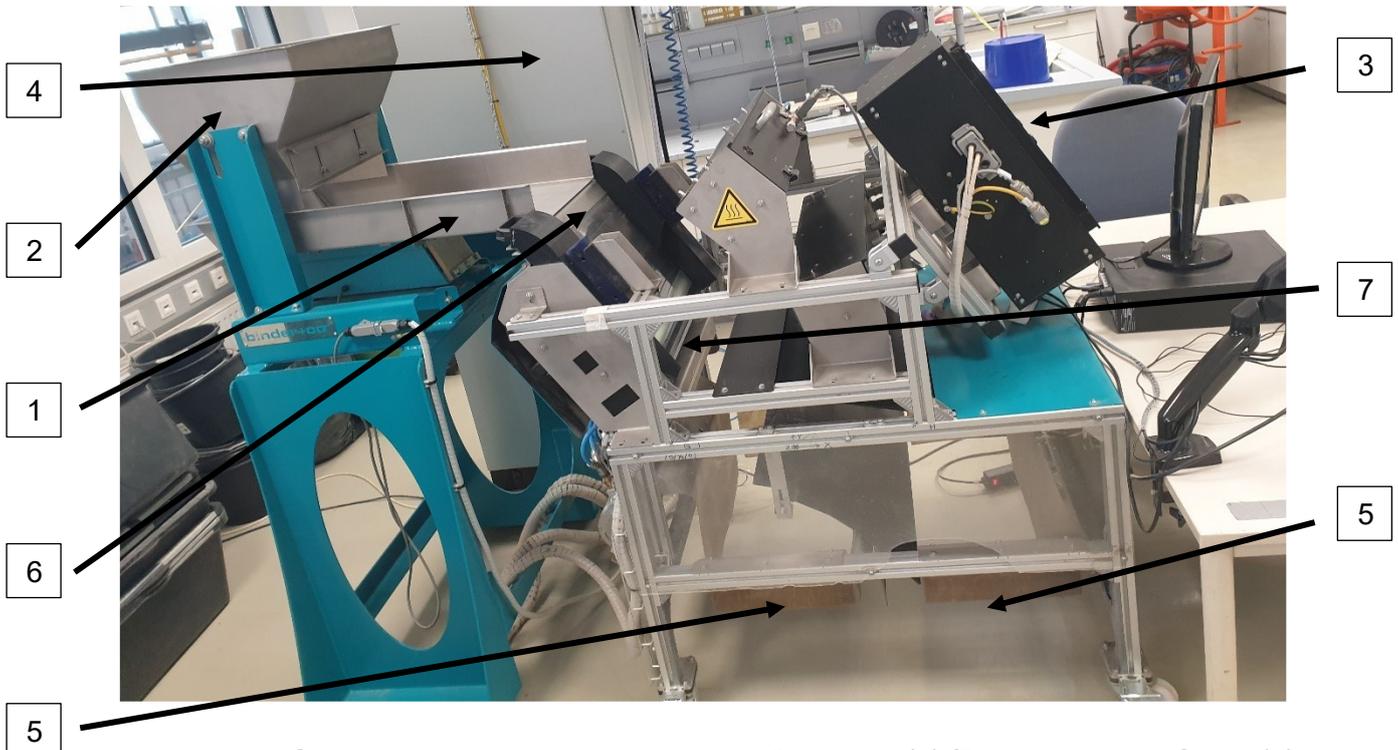


Abbildung 28: Sortierer im AVAW-Technikum mit Rüttelplatte (1) für die Materialaufgabe (2), dem NIR-Analysegerät (3), der Systemsteuerung (4), den Auffangbehältern (5), einer Abrutschplatte (6) und den Luftdüsen (7)

Die Luftdüsen werden für die Ausschleusung der einzelnen Kunststoffpartikeln benötigt. Es werden die zuvor, in der Mitte der Abrutschplatte, erkannten Partikeln mit einem vordefinierten Luftdruck von 3 bar aus dem Abfallstrom ausgeblasen. Je nach Größe der Partikel werden eine oder mehrere Düsen aktiviert.

### 3.3.2.1 Untersuchung der 3D-Fraktion der Kunststoffproben

Auch hier wurde wieder bevor die eigentliche Analyse der 3D-Fraktion begonnen wurde, die gesamte Probenmenge homogenisiert, um eine möglichst gleichmäßige Verteilung zu erhalten. Es wurde, wie bereits in Kapitel 3.2.1.1. erläutert, vorgegangen.

Anschließend wurde wieder einer dieser Behälter zufällig ausgewählt und für die Analyse herangezogen. Es wurde zu Beginn der gesamte Inhalt des Probenbehälters auf der Rüttelplatte entleert und dann langsam der NIR-Erkennung zugeführt. Dabei wurde der Sortierer so eingestellt, dass dieser nur die gewünschten Kunststofffraktionen (PE, PP, PS) aussortierte. Dieser Prozess wurde mehrere male mit Ausschuss und dem aussortierten

Material wiederholt, um die Reinheit der aussortierten Kunststoffe zu erhöhen. Nach einigen Durchläufen (mindestens 3) wurde damit begonnen den Ausschuss zu entfernen und nur mehr die Aussortierten Kunststoffe aufzureinigen. Die Aufreinigung erfolgte durch mehrmalige Wiederholung der Durchläufe für Ausschuss und aussortiertem Material (wieder jeweils 3). Am Ende der wurde noch nach den einzelnen Kunststoffarten (PE, PP, PS) sortiert. Dabei wurden wieder jeweils 3 Durchläufe durchgeführt.

### 3.4 Versuchsequipment

Hier werden die bei den Versuchen verwendeten Aggregate und Maschinen sowie die Versuchsanordnung dieser näher beschrieben und auf gewisse Besonderheiten eingegangen. Folgende Aggregate/Maschinen wurden bei den Versuchen verwendet:

- Mobiler Zerkleinerer und „Komptech Terminator“
- Volumenstrommesser „Komptech Multi Measure“
- Nicht-Eisen-Scheider „Komptech Metalflex“
- Windsichter „Komptech Hurricane“
- NIR-Sortierer der Firma Redwave

#### 3.4.1 Zerkleinerer

Zuallererst wurden, um sich ein Bild der tatsächlichen Korngröße der verwendeten Zerkleinerer zu machen, Versuche mit Maschinen von zwei verschiedenen Anbietern verglichen.

##### 3.4.1.1 Mobiler 1-Wellen-Zerkleinerer

Hierbei handelt es sich um einen mobilen 1-Wellen-Zerkleinerer. Dieser hatte ein Sechseckiges-Lochsieb mit einer Größe von 50 mm verbaut und kann aufgrund der schneidenden Zerkleinerung für eine Korngröße von 45 bis 130 mm verwendet werden.

In weiterer Folge werden in Abbildung 29 das oben genannten Schneidewerkzeug sowie das spezielle Lochsieb dargestellt. Zu erwähnen ist, dass das Lochsieb aus vier Elementen besteht und jeweils eines dieser Elemente laut Angaben der Monteure von Komptech ein Gewicht von ca. 300 Kg aufweisen.



Abbildung 29: Lochsieb (links) und Schneidewerkzeug (rechts) im Detail

### 3.4.1.2 Terminator 5000S-mobil

Der Terminator der Komptech GmbH [36] ist ein mobiler langsam laufender 1-Wellen Zerkleinerer, welcher speziell für alle Arten von Abfall entwickelt wurde. Er besitzt eine stufenlose Schnittpaltverstellung. Abbildung 30 zeigt exemplarisch einen Terminator 6000S. Die Nummer am Ende der Bezeichnung gibt nur die unterschiedlichen erhältlichen Größen wieder und besitzt keine Relevanz für diese Arbeit.



Abbildung 30: Terminator der Firma Komptech GmbH [36]

Der Terminator besitzt im Vergleich zum mobilen 1-Wellen-Zerkleinerer eine andere Schneidegeometrie welche in Abbildung 31 dargestellt ist.



Abbildung 31: Innenansicht eines Terminators der Firma Komptech GmbH [36]

### 3.4.2 Trommelsieb

Ein Trommelsieb ist deswegen notwendig um die Teilchen welche zu klein ( $<10$  mm) sind oder nicht die notwendigen Korngröße für eine erfolgreiche Abtrennung aufweisen aus dem Abfallstrom zu entfernen. Dabei wird auf ein Trommelsieb der Firma Komptech GmbH zurückgegriffen, welche ein Trommelsieb genug großer Siebfläche und Durchsatz zur Verfügung stellte. In Abbildung 32 ist ein Trommelsieb im aufgeklappten Zustand abgebildet.



Abbildung 32: Trommelsieb der Firma Komptech GmbH [37]

### 3.4.3 Volumenstrommesser

Die Firma Komptech GmbH hat auf eigene Initiative einen Volumenstrommesser für Versuchszwecke entwickelt und kann dadurch für verschiedenste Anwendungen den Durchsatz bestimmen. Da es sich hierbei um eine eigene Entwicklung handelt kann nicht näher auf Technik dahinter eingegangen werden. Die Bezeichnung für diesen ist in dieser Arbeit und auch außerhalb also „Multi Measure“ definiert. Die Volumenstrommessung ist notwendig, um den Durchsatz durch die Anlage exakt bestimmen zu können.

### 3.4.4 Metalfex

Bei einem Metalfex [38] handelt es sich um einen Nicht-Eisen-Metallscheider der Firma Komptech GmbH. Dieser beruht, wie bereits in Kapitel 2 beschrieben auf dem Prinzip eines Wirbelstromscheiders. Abbildung 33 zeigt die mobile Version eine Komptech Metalfex.



Abbildung 33: Metalfex Wirbelstromscheider der Firma Komptech GmbH [38]

### 3.4.5 Hurrikan S Windsichter

Der Hurrikan S [39] Windsichter der Firma Komptech GmbH ist ein mobiler Windsichter für die Abtrennung von Folien aus einem Abfallstrom. Die Abtrennung erfolgt durch ein eigens entwickeltes Druck-Saugverfahren wobei der aufgegebene Abfallstrom zuerst von Luft durchströmt wird und dann die Folien durch einen Absaugmechanismus abgesaugt werden. Dadurch ergibt sich eine Durchsatzleistung von ca. 60 m<sup>3</sup>/h. Abbildung 34 zeigt den verwendeten Hurrikan S.



Abbildung 34: Windsichter Hurrikan S der Firma Komptech GmbH [39]

### 3.4.6 NIR-Sortierer der Firma Redwave

In der Anlage des Österreichischen Aufbereitungsunternehmens ist ein Modell eines Redwave [40] NIR-Sortierers verbaut, welcher durch Voreinstellung auf Polyolefine, diese Fraktion aus dem aufgegebenen Abfallstrom entfernt. Die Funktionsweise der NIR-Sortierung wurde bereits in Kapitel 3.4.2 ausführlich erläutert und wird deshalb hier nicht mehr näher beschrieben.

## 3.5 Manuelle Sortierung

Die durch den Redwave ausgeschiedene Polyolefin-Fraktion wurde im Anschluss an die Versuche, aufgrund der Menge und des Zustandes, noch grob manuell sortiert und in eine 2D-, 3D- und Restfraktion eingeteilt. Dies wurde durchgeführt, um einen groben Überblick über die enthaltene Menge zu bekommen.

## 4 Ergebnisse und Diskussion

Dieses Kapitel ist in zwei Teile unterteilt, einerseits wird in Unterkapitel 4.1 näher die Erarbeitung von Konzepten und die Analyse von bestehenden Anlagen behandelt und die dabei erhaltenen Ergebnisse diskutiert, andererseits werden in Unterkapitel 4.2 die Ergebnisse der verschiedenen Versuche und Tests detailliert beschrieben und auf Basis dieser Aussagen zu den Entwickelten Konzepten getroffen.

### 4.1 Erarbeitung von Konzepten

Der Konzepterstellung zugrundeliegend, sind die Reinheitsvorgaben für die jeweiligen Recyclingverfahren, welche beim mechanischen Recycling einen Polyolefingehalt von min. 80 m% und beim chemischen Recycling eine Molekulare Reinheit von min. 88 %, fordern. Eine weitere Vorgabe aus den Recyclingverfahren ist die Trennung von 2D- und 3D-Material. Dabei wird das 2D-Material dem chemischen und das 3D-Material dem mechanischen Recycling zugeführt. Der Rest, welcher aus dieser Trennung übrigbleibt, soll einer Verwertung als EBS beigemischt werden. Weiters wird aufgrund der Verfahrensbedingungen der dem mechanischen Recycling vorgeschalteten Sortieranlage eine Eingangsstoffkorngröße >30 mm gefordert. Beim chemischen Recycling hingegen wurde keine Mindestkorngröße definiert, es ist jedoch darauf zu achten, dass jegliche Art von Metall aus dem Material entfernt wird, da dieses für das chemische Recycling als Störstoff wirkt.

#### 4.1.1 Entwickelte Gewinnungslinie für Polyolefine

Um Material zu gewinnen, welches den durch die Recycler definierten Anforderungen entspricht, sollte ein maschineller Aufbau folgende essenzielle Schritte beinhalten:

- Zerkleinerung, um die Anfangskorngröße des oft sehr grobstückigen Gewerbeabfalls zu verringern, idealerweise mittels Siebkorb die Korngröße nach oben hin zu beschränken und weitere Behandlungsschritte zu ermöglichen,
- Metallabtrennung, um Eisen- und Nichteisenmetalle, die vor allem beim chemischen Recycling unerwünscht sind, aus dem Abfallstrom zu entfernen,
- Korngrößenhandling, um die Korngröße auch nach unten zu beschränken,
- NIR-Sortierung, um Polyethylen und Polypropylen aus dem Abfallstrom auszuschleusen, und
- 2D und 3D-Trennung, um eine Fraktion für das chemische und eine Fraktion für das mechanische Recycling zu schaffen.

Diese essenziellen Schritte werden in der experimentellen Gewinnungslinie, welche in 3 Abschnitte geteilt ist, um zusätzliche Schritte erweitert. Jeder einzelne Abschnitt kann als eigene Linie betrachtet werden, da die gesamte Probenmenge jeden Abschnitt vollständig durchlaufen muss, um mit dem nächsten Abschnitt beginnen zu können. Jeder Abschnitt verlangt einen Umbau, es müssen Apparate entfernt oder hinzugefügt werden, wodurch sich ein gewisser Zeitaufwand für diese Versuche ergibt.

**Abschnitt 1:** Nach der Anlieferung und der Visuellen Vorsichtung des Materials besteht der erste Schritt des ersten Abschnittes darin das angelieferte Material einer Grobzerkleinerung zuzuführen. Dies erfolgt durch einen Zerkleinerer der Firma Komptech. Danach wird mittels „Multi Measure“ der Firma Komptech (welches einem selbst entwickelten Volumenstrommessers entspricht) der Volumenstrom des aufgegebenen Materials ermittelt. Am Austragsband des Shredders befinden sich Überbandmagneten zur Entfernung von Fe-Metallen. Anschließend werden mittels NIR-Sortierung Polyolefine aus dem Abfallstrom ausgeschleust, es ergibt sich somit als erstes Output-Material dieser Linie eine Mischung aus 2D und 3D Polyolefinen.

**Abschnitt 2:** Das aus Abschnitt 1 gewonnene Material (Polyolefine 2D & 3D) wird zu Beginn in einen Zerkleinerer (mit 100 mm Siebkorb) mit einer Obergrenze von 100 mm aufgegeben, um das Material für die Windsichtung nach oben zu begrenzen, damit die Absaugschläuche des Windsichters nicht durch zu große Teile verstopft werden. Auch am Austragsband des Zerkleinerers befindet sich ein Magnetabscheider. Im Anschluss an die Zerkleinerung wird eine Siebung bei 30 mm durchgeführt um die Teilchen <30 mm aus dem Abfallstrom zu entfernen. Als nächster Schritt erfolgt eine Entfernung der Nicht-Eisenmetalle mittels Metalfex der Firma Komptech. Im letzten Schritt wird das Material durch einen Windsichter der Firma Komptech (Hurrikan S) in eine 2D- und 3D-Fraktion getrennt. In weiterer Folge wird die 2D-Fraktion in Abschnitt 3 noch einmal aufbereitet.

**Abschnitt 3:** Aus der 2D-Fraktion werden durch einen NIR-Sortierer die potenziell noch enthaltenen Störstoffe (Papier etc.) ausgeschleust. Nach dem NIR-Sortierer erfolgt eine weitere Zerkleinerung, Entfernung der Eisen- und Nicht Eisenmetalle und abschließend eine weitere Aufreinigung der 2D Fraktion durch zur 2D und 3D-Trennung anhand der Flugtrajektorie mittels Fliehkraftscheidung.

Nach Durchlaufen dieser 3 Abschnitte erhält man aus den gemischten Siedlungs- und Gewerbeabfällen folgende Fraktionen:

- Eisen- und Nicht Eisenmetalle
- Polyolefine gereinigt (2D-Fraktion)
- Polyolefine (3D-Fraktion >30mm)
- Störstoffe

Es gilt zu beachten, dass es sich bei den in Abbildung 35 gezeigten einzelnen Schritte um Black Boxes handelt und daher ein Vorhersagen der Funktionsfähigkeit dieser, schwierig wird. Aus diesem Grund sind unterschiedliche Tests der einzelnen Aggregate notwendig. Diese Tests werden in Kapitel 4.2 näher beschrieben.

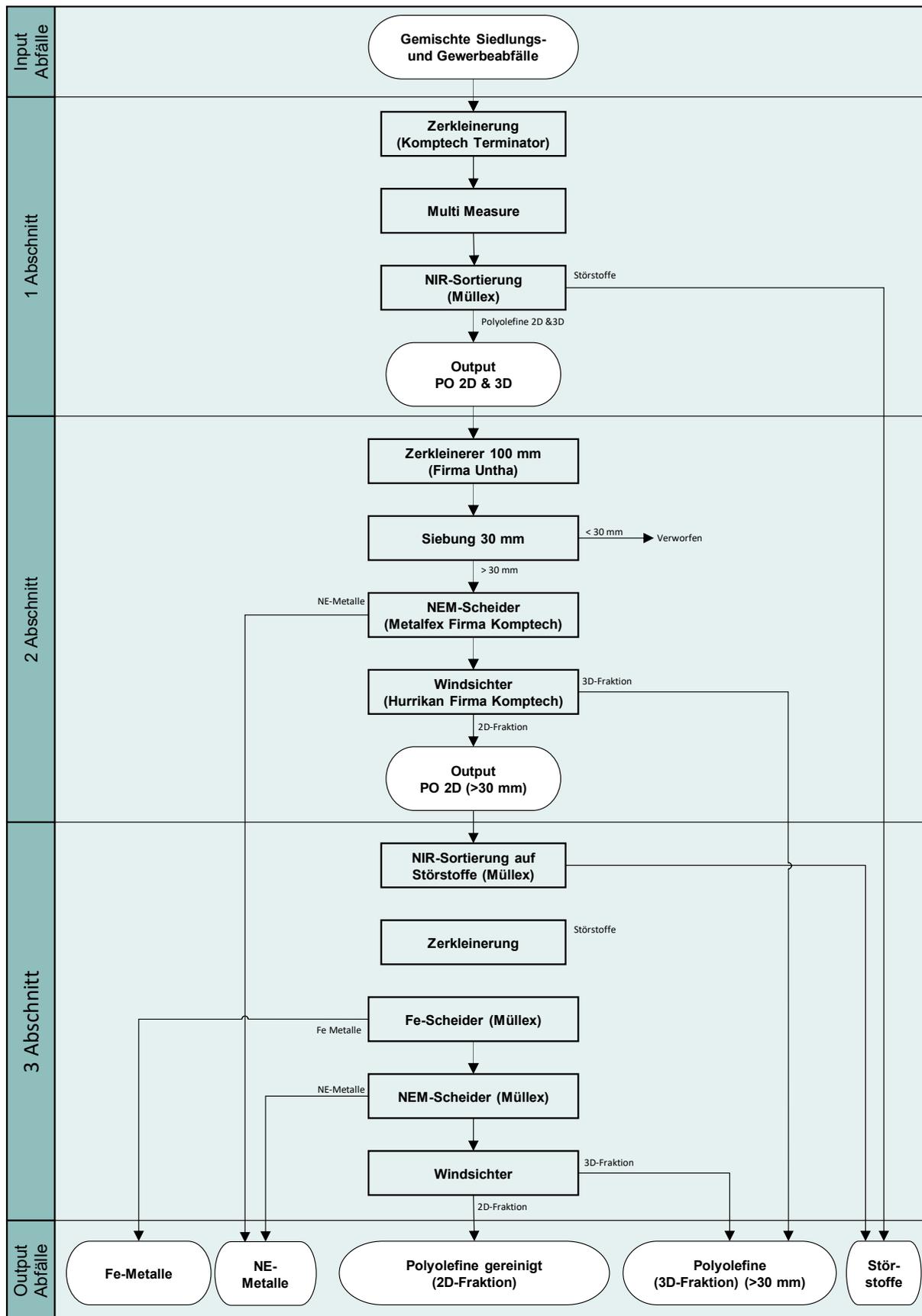


Abbildung 35: Verfahrensfliessbild zu Gewinnung von Polyolefinen (eigene Darstellung)

### 4.1.2 Eignung einer potenziellen Anlage eines österreichischen Aufbereitungsunternehmens für die Gewinnung von Polyolefinen

Diese Anlage ist eine Aufbereitungsanlage von Misch-Kunststoffabfällen zu EBS-Material. Die angelieferten Mischkunststoffballen werden dabei durch wenige Verfahrensschritte, wie nachstehend aufgelistet, zu einer 2D-EBS-Fraktion aufbereitet. Abbildung 36 zeigt ein detailliertes Verfahrensfliessbild der genannten Anlage.

- Manuelle Vorsichtung
- Zerkleinerung
- NIR-Sortierung
- Eisen- und Nichteisenmetall Entfernung
- Weitere Zerkleinerung (<25mm) und
- Fliehkraftscheidung

Diese Mischkunststoffballen enthalten neben den Massenkunststoffen PE und PP auch noch weitere Stoffe wie Papier und Kartonagen. Es sind auch andere Kunststoffe wie z.B. PVC und PS enthalten. Der ausgehende Abfallstrom für diese Anlage ist die gelbe Tonne bzw. der gelbe Sack. Es hat also bereits bei der Entsorgung in den Haushalten, eine mehr oder weniger genaue Sortierung durch den Abfallerzeuger stattgefunden. Diese Tatsache bedeutet aber auch, dass die bestehende Anlage, in der vorliegenden Konfiguration, nicht für einen Betrieb mit gemischten Siedlungs- und Gewerbeabfällen geeignet ist.

Um eine Eignung für die Verwendung der gewünschten Abfallströme zu erreichen, bedarf es einiger mehr oder weniger aufwändiger Modifikationen welche nachfolgende näher erläutert werden.

Bei den weniger Aufwendigen würde es sich um die Umstellung der Zerkleinerungsapparate auf eine Korngröße von 30 bis max. 80 mm, diese wird laut Borealis AG für die Verwendung als Eingangsmaterial für das mechanische Recycling benötigt. Dies bedeutet auch, dass eine Trennung mittels Flugtrajektorie in dieser Anlage nicht möglich wäre, da dafür eine kleinere Korngröße notwendig ist. Weiters zählt auch die Umstellung der NIR-Sortiergeräte auf die gewünschten Kunststoffe PE, PP und PS als geringfügige Änderung. Diese Umstellung erfolgt per Software und bedarf keinem apparativen Umbau. Diese Umstellung wäre notwendig, um das Material (PO-haltig) welches aktuell in den Reststrom geht, der weiteren Anlage zuzuführen.

Die Aufwendigeren Änderungen betreffen hauptsächlich die Aufbereitung des angelieferten Materials. Die Entfernung von Eisen- und Nicht-Eisenmetallen bereitet kein Problem und kann mit den gegebenen Apparaten durchgeführt werden. Das große Problem liegt in der Trennung der nicht gewünschten Fraktion von den gewünschten Kunststoffen. Dafür würden mobile Trommelsiebe und auch ein mobiler Ballistischer Separator benötigt werden.

Die genannten Änderungen und dadurch entstehenden Herausforderungen machen eine Verwendung dieser Anlage in ihrem jetzigen Zustand nicht möglich. Es wurde daher im Rahmen dieser Arbeit zuerst einmal der Fokus auf die 2D/3D-Trennung gelegt, um abschätzen zu können, ob diese die gewünschten Ergebnisse liefert.

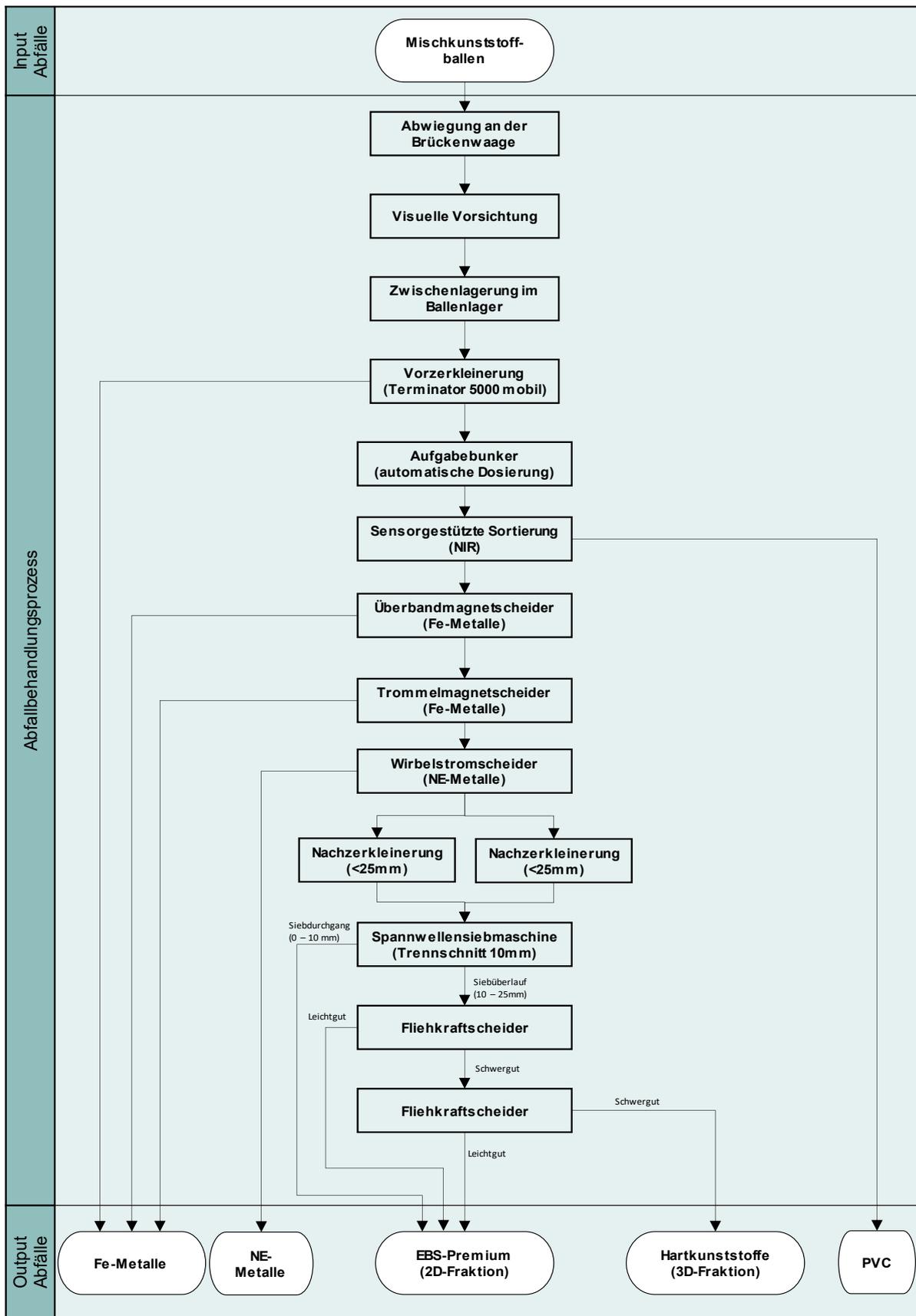


Abbildung 36: Verfahrensfließbild eines österreichischen Aufbereitungsunternehmens (erstellt anhand von Daten dieses Unternehmens)

## 4.2 Praktische Tests

Hier werden die Ergebnisse der einzelnen Versuche näher dargestellt und erläutert. Allen voran wird hier auf die Analyse der Proben aus der 2D und 3D Trennung in der in Kapitel 3.2 erwähnten Anlage, die Ergebnisse der Zerkleinerungsversuche mittels mobilem 1-Wellen-Zerkleinerer und Terminator, die Mobile Versuchslinie, die Polyolefin Ausschleusung mittels Redwave sowie die Manuelle Sortierung des ausgeschleusten Materials eingegangen.

### 4.2.1 Ergebnisse der Proben aus der Anlage des österreichischen Aufbereitungsunternehmens

#### 4.2.1.1 2D-Material

In Abbildung 37 ist das Ergebnis der Untersuchung des 2D-Materials mittels FTIR-Analyse dargestellt. Die Gesamte zu untersuchende Menge betrug 430 g, wobei dies nur der Fraktion >10 mm entspricht. Der gesamte Mengeninhalte des untersuchten Kübels betrug 1050 g. Durch die Analyse haben sich folgende Mengenanteile, welche in Tabelle 2 aufgelistet sind, ergeben.

Tabelle 2: Anteile der Kunststoffe in der Untersuchten 2D-Probe

Kunststoff	Menge [g]	Anteil [%]
PS	3,9	0,92
PP	23,3	5,41
PE	65,0	15,11

Wie zu erkennen ist, ist der nicht zu identifizierende Anteil sowie der Anteil der nicht Kunststofffraktion, zusammengefasst mit 78,56 % ein großer Faktor innerhalb der 2D-Fraktion dieser Anlage. Aufgrund der Zeitintensiven Analyse und auch wegen des Mangels an Relevanz für diese Arbeit wurde auf eine nähere Untersuchung des nicht gesuchten Anteils verzichtet. Wie zu erkennen ist, ist der Anteil an PE der größte gefolgt von PP. Der Anteil an PS ist sehr gering, was daran liegt das PS eher weniger in Folien Form Verwendung findet. Bei dem gefundenen PS handelt es sich, bis auf eine Ausnahme, um eine geschäumte Form von PS. Der hohe Anteil an PE wurde erwartet, da es, wie in Kapitel 2 erläutert, vorrangig in Verpackungen oder Folien verwendet wird. Es gilt zu erwähnen, dass womöglich ein nicht unerheblicher PE-Gehalt auch im nicht identifizierbaren Anteil vorahnden ist, welcher aber aufgrund von Verunreinigungen oder aber auch aufgrund der Form nicht durch das FTIR erkennbar ist. Die sich ergebende Qualität ist aufgrund der händischen Sortierung sehr hoch und würde einem Optimalen Einsatzmaterial für das weitere Recycling entsprechen.



Abbildung 37: Menge der Kunststofffraktionen PE, PP, PS im 2D-Material dieser Anlage

#### 4.2.1.2 3D-Material

In Abbildung 38 ist das Ergebnis der Untersuchung des 3D-Materials mittels Technikums-Sortierers dargestellt. Die gesamte zu Untersuchende Menge betrug 3035 g. Wie bereits erwähnt, wurde in diesem Fall vorher keine Siebung durchgeführt. Die sich ergebenden Mengenanteile sind in Tabelle 3 aufgelistet.

Tabelle 3: Anteile der Kunststoffe in der Untersuchten 3D-Probe

Kunststoff	Menge [g]	Anteil [%]
PS	75,6	2,49
PE	150,8	4,97
PP	173,0	5,70

Hier ist zu erkennen, dass der Anteil an nicht erkennbaren und nicht gewünschten Material, mit 97,53 % um einiges höher ist als im vorhergehenden 2D-Material (78,56 %). Grundsätzlich ist die absolute Menge, aufgrund der Art und Dicke der Teilchen, größer als die im 2D-Materials, aber dies war zu erwarten. Der Anteil von PS ist höher, wohingegen die Anteile von PP (schwach) und PE (stark) abgenommen haben. Es ist auch hier wieder zu erwarten, dass sich ein nicht unerheblicher Anteil von PE, PP und PS in der ausgeschleusten Fraktion befindet. Die unerwünschte Ausschleusung ist auf Teilchenverbunde, Verschmutzung und nicht korrekte Identifizierung durch den NIR-Sensor zurückzuführen. Es besteht auch die Möglichkeit das bei der Ausstoßung mittels Luft, ein sich in der Nähe befindliches erwünschtes oder unerwünschtes Teilchen (anhängig davon ob auf Positive oder Negative Teilchen gezielt wird) mitausgeschleust wird. Diese unerwünschten Teilchen sollen durch mehrmaliges

Durchlaufen (mindestens 3x) des Sortierers, auf ein Minimum reduziert worden sein. Die Verwendung des Sortierers funktionierte grundsätzlich gut für das verwendete Material, wobei die größten Probleme durch die erwähnten Teilchenverbunde entstanden sind. Laut digitaler Anzeige der Sortierersteuerung bzw. des NIR-Sensors, ist ein hoher Anteil (ca. 30-40 %) PVC in der ausgeschleusten Fraktion enthalten.



Abbildung 38: Menge der Kunststofffraktionen PE, PP, PS im 3D-Material dieser Anlage

Hier wäre am Rande noch zu erwähnen, dass in dem ausgewählten Probekübel, welcher für den Sortierer verwendet wurde, insgesamt 3-4 Venenkanülen gefunden wurden. Würde man dies auf alle 10 Kübeln für die gesamte genommene Probe hochrechnen, wären dies zwischen 30 und 40 Stück, was theoretisch als medizinischer Abfall deklariert und auch dementsprechend entsorgt werden müsste.

## 4.2.2 Ergebnis der Zerkleinerer Versuche

Hier werden die Ergebnisse und Probleme der Versuche mit den unterschiedlichen Zerkleinerer Aggregaten dargestellt und etwaige aufgetretene Probleme analysiert.

### 4.2.2.1 Mobiler 1-Wellen-Zerkleinerer

Das Ergebnis des Zerkleinerer-Versuchs mittels 1-Wellen-Zerkleinerer zeigt in Abbildung 39, dass dieser das aufgegebene Material, für unsere Zwecke, zu sehr zerkleinert. Wie zu erkennen ist, entspricht die Korngröße der Abfallteilchen nicht dem Richtwert von 30-80 mm, welche für die Aufgabe in den NIR-Sortierer notwendig ist. Es ist anzunehmen, dass hier der Wert von  $d_{95}$  sogar noch unterhalb von 50 mm liegt.



Abbildung 39: Ergebnis der Zerkleinerung durch den mobilen 1-Wellen-Zerkleinerer

Dies könnte sich dadurch erklären, dass das Lochsieb mit 50 mm im Zusammenspiel mit der Schneidgeometrie zu klein ist, und dadurch die Teilchen welche eigentlich von der Größe passen würden durch das Schneidwerkzeug wieder mitgerissen werden. Durch den weiteren Durchlauf durch den Zerkleinerer wird dann das Teilchen weiter zerkleinert und kann dann, durch die viel zu kleine Größe natürlich ungehindert durch das Sieb fallen und den Zerkleinerer verlassen.

Eigentlich wären Versuche mit einem Lochsieb mit 100 mm angedacht gewesen, um zu sehen ob durch die größere Lochung eine Verbesserung auftreten würde. Diese konnten aber aufgrund von Passungenauigkeit des Lochsiebs nicht in den Zerkleinerer eingebaut

werden. Ein Warten auf die Anpassung der Bauteile war aus zeitlichen Gründen nicht möglich. Es ist jedoch zu erwarten, dass das 100 mm Lochsieb aufgrund der annähernd Schneidenden Zerkleinerung immer noch eine sehr gute Zerkleinerung aufweisen wird und dadurch für diese Anwendung als ungeeignet einzustufen ist.

#### 4.2.2.2 Terminator Zerkleinerer

Im Vergleich zum mobilen 1-Wellen-Zerkleinerer hat der Terminator kein Lochsieb für die Einstellung der Korngröße, sondern diese wird über die Spaltbreite von Welle und Gegenschneidwerkzeug definiert. In diesem Fall wurde die technisch kleinstmögliche Spaltbreite gewählt (entspricht nur weniger mm). Hierbei handelt es sich um eine reißende Zerkleinerung. Nach der Aufgabe einer gewissen Menge an Material, welche durch die Zeit definiert wurde (es wurden 45 Minuten zerkleinert, um eine adquate Menge zu gewährleisten) wurde folgende, in Abbildung 40, dargestellte Korngröße erreicht.



Abbildung 40: Ergebnis der Zerkleinerung mittels Komptech Terminator [Foto: Sandra Viczek]

Wie in Abbildung 40 erkennbar ist, ist die Korngröße des erhaltenen Materials in gewissen Teilen noch zu groß für eine Aufgabe in der Sortieranlage bzw. für den Redwave Sortierer. Dies kann einerseits an der Geometrie der Schneidwerkzeuge liegen, wobei diese im Bereich der Abfallaufbereitung eine eher untergeordnete Rolle spielen. Andererseits kann es am Fehlen eines Lochsiebes liegen, da bei einem Spalt die Möglichkeit besteht, dass das Aufgabematerial bei richtiger Lage unberührt durch den Spalt fallen kann und dadurch nicht zerkleinert. Eine weitere Annahme ist, dass der Spalt im geschlossenen Zustand einfach zu groß für dieses Material ist.

Um eine weitere Verringerung der Korngröße zu erreichen, wurde das Material, welches aus dem Terminator gewonnen wurde, ein weiteres Mal vollständig in den Terminator aufgegeben. Das Ergebnis dieses weiteren Aufgebens ist in Abbildung 41 ersichtlich.



Abbildung 41: Ergebnis des zweiten Durchlaufs durch den Terminator [Foto: Sandra Viczek]

Der Vergleich von Abbildung 41 mit Abbildung 40 zeigt, dass das nun gewonnene Material deutlich kleiner ist und dadurch ein Testen auf der Anlage mittels Redwave und mit den anderen Maschinen theoretisch möglich sein sollte.

Das Erreichen der kleineren Korngröße kann vielleicht dadurch erklärt werden, dass durch die kleinere Korngröße nach dem ersten Durchlauf im Vergleich zum Ausgangsmaterial, die Abfallteilchen im Zerkleinerer selbst besser von den Schneidwerkzeugen erfasst werden können, weil diese durch die dichtere Packung gut aneinanderhaften können.

### 4.2.3 Mobile Versuchslinie

In einem weiteren Schritt wurde getestet, ob das Material, welches durch die Zerkleinerungsversuche erhalten wurde, durch Windsichtung in eine 2D und 3D Fraktion aufgeteilt werden kann. Dabei wird insbesondere darauf geachtet, ob es durch die Grobstückigkeit des Abfalls zu Verstopfungen in den Absaugrohren des verwendeten Windsichters kommt.

Für diese Versuchsanlage (Abbildung 42) wurden folgende Maschinen der Firma Komptech GmbH verwendet:

- Trommelsieb

- Metalfex
- Hurrikan



Abbildung 42: Versuchsanlage 2D/3D-Trennung mittels Komtechmaschinen

Die Aufgabe des zerkleinerten Materials erfolgte mittels Radladers in das Trommelsieb, wo Partikel <30 mm abgeschieden wurden. Danach folgte die Nicht-Eisen-Metallabtrennung durch den Metalfex und im Anschluss daran die 2D/3D Trennung durch den Windsichter Hurrikan. Nachfolgend sind die erhaltene 2D- und 3D-Fraktion in Abbildung 43 und Abbildung 44 abgebildet.



Abbildung 43: 2D-Material aus dem Hurrikan



Abbildung 44: 3D-Material aus dem Hurrikan

Wie zu erkennen ist, erfolgt augenscheinlich eine Trennung von 2D und 3D Material mit der aufgegebenen Korngröße im Windsichter. Es zeigt sich auch, dass keine wesentlichen 3D-Teilchen in die 2D-Fraktion gelangt sind. In der 3D-Fraktion sind jedoch noch immer signifikante Mengen an Folien etc. enthalten, welche eigentlich in die 2D-Fraktion gehören. Dieser Falschanteil lässt sich durch etwaige Teilchenverbunde erklären, welche durch die gesamte Prozesskette nach dem Zerkleinerer nicht aufgeschlossen werden konnten. In der 2D Fraktion finden sich beispielsweise auch Papier und Textilien, die mit abgesaugt wurden. Würde anstatt gemischten Gewerbeabfalls ein bereits aussortiertes PO-Konzentrat aufgegeben werden, sollten sich nur geringe Mengen Papier und Textilien im Abfall befinden und die Trennung in eine 2D-Folienfraktion und eine 3D Fraktion mittels Hurrikan gute Ergebnisse liefern.

Die Einstellungen der der einzelnen Maschinen wurden so gewählt das der Hurrikan mit 100 % (Gebläsedrehzahl 1500 rpm, Drehzahl Stufe 10/10 bei den beiden Absaugeeinheiten, Motordrehzahl 14 %) betrieben wurde, um eine möglichst gute Trennleistung zu erhalten. Im Vergleich dazu wurde das Trommelsieb auf eine Motordrehzahl von 1400 rpm, einen Materialvorschub von 30 % und eine Trommelgeschwindigkeit von 40 % eingestellt, um die Aufgabe in den Metalfex und in Folge in den Hurrikan zu begrenzen und dadurch eine Verschlechterung der Trennung zu verhindern.

#### 4.2.4 PO-Ausschleusung mittels NIR

Das übrige Material aus der 2-Stufigen Terminator Zerkleinerung wurde dazu verwendet, um einen Testlauf am NIR des Redwave-Sortierers durchzuführen. Diese Tests wurden nicht allein mit der gewonnenen 2D Fraktion durchgeführt, da erstens die gewonnenen Mengen recht gering waren und zweitens die Sortierung einer 2D Fraktion vor allem an einem älteren NIR-Sortierer oft problematisch ist. Der zweifach zerkleinerte Gewerbeabfall wurde mittels Radlader in den Aufgabebunker der Anlage aufgegeben und dann über ein Förderband dem Redwave NIR-Sortierer zugeführt. Dabei fand aufgrund der Unterschiedlichen Laufgeschwindigkeiten der beiden Förderbänder (Aufgabeband und Beschleunigungsband des NIR-Sortierers) eine Vereinzelnung der Abfallteilchen statt. Der Aufbau der Anlage ist in Abbildung 45 und Abbildung 46 zu sehen.

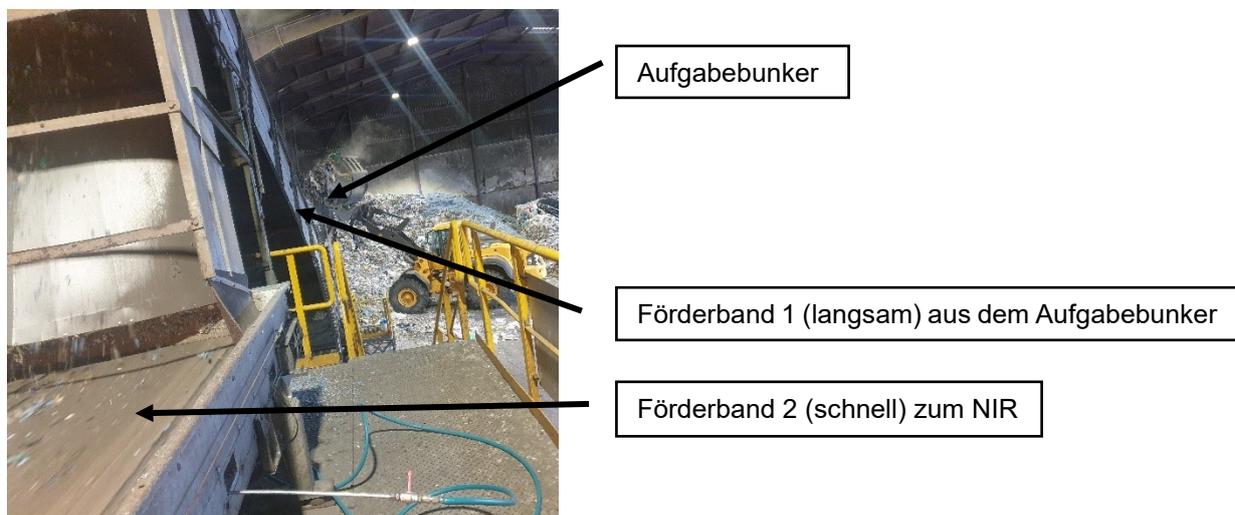


Abbildung 45: Aufgabe des Materials in den Aufgabebunker mittels Radlader

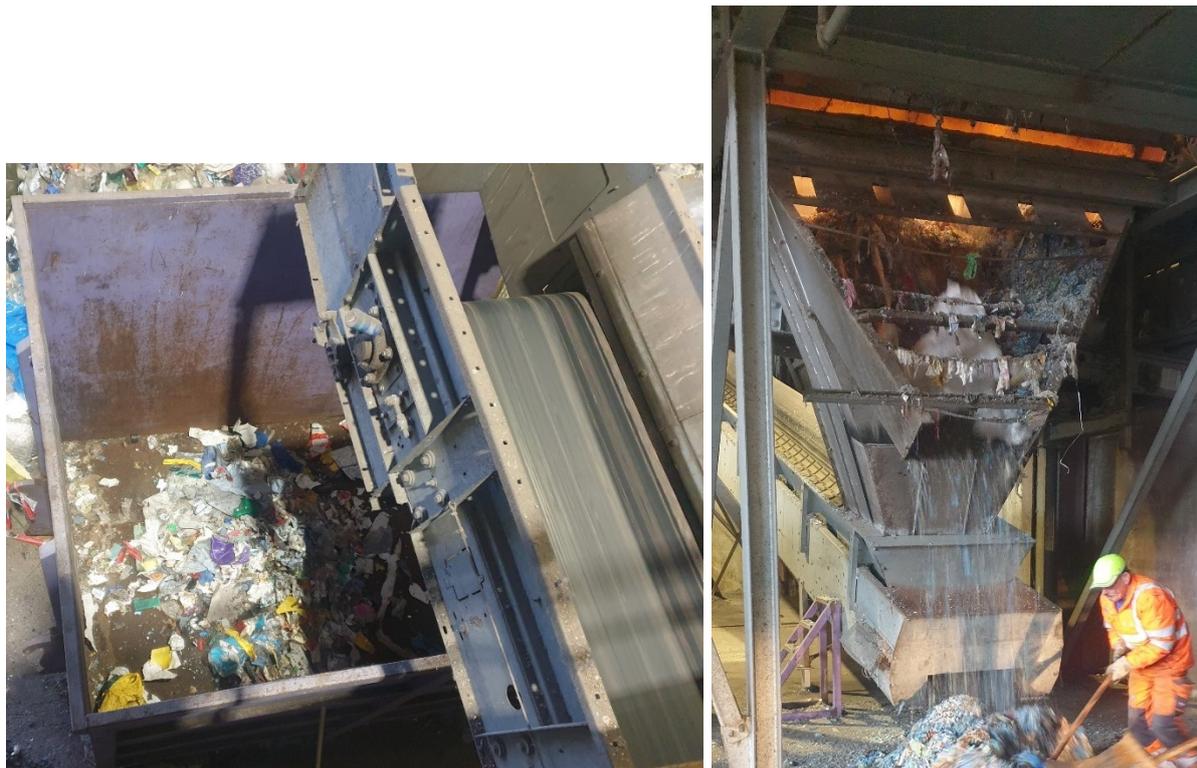


Abbildung 46: Auffangcontainer (links) für ausgeschleuste Fraktion und Entleerungsschacht (rechts) für Restmaterial

Die Zerkleinerungsversuche und die Versuche in der Anlage fanden nicht am selben Tag statt und daher musste das Material mit einer Plane abgedeckt werden, um von den Witterungseinflüssen geschützt zu werden. Ein 100 % Schutz konnte dabei nicht gewährleistet werden. Man konnte erkennen, dass das Material eine gewisse Feuchte aufgenommen hatte. Dies sollte aber keinen Unterschied in der Behandlung machen da dieser Abfall bereits vor den Versuchen der Witterung ausgesetzt war und im industriellen Maßstab auch kein Unterschied bei der Behandlung gemacht wird.

Nach Versuchsbeginn konnte man rasch feststellen, dass sich noch Reste des zuvor im laufenden Produktionsbetrieb in die Anlage aufgegebenen Materials, in der Anlage befanden und daher mit einem gewissen Anteil an Falschmaterial in der PO-Fraktion zu rechnen war. Weiters stellte sich die Vereinzelung der Materialteilchen als nicht so effektiv heraus, wie angenommen und man konnte beobachten, dass Verbundteilchen dem NIR zugeführt aber der Luftstrahl dieses nicht auswerfen konnte. Es konnte auch beobachtet werden, dass der NIR-Sortierer Probleme bei der Erkennung und Ausschleusung von Folien hatte, da der Befehl dazu auch bei offensichtlichen sauberen Folien nicht gegeben wurde. Weiters stellte die Verschmutzung der Folien auch ein Problem dar. Allgemein kann gesagt werden, dass die Ausschleusung von Folien mittels NIR sich schwieriger gestaltet als anfänglich angenommen.

Ein weiteres Problem ergab sich aus der Geometrie der Materialabführung nach dem Sortierer. Während das ausgeschleuste PO ungehindert in einen Container geleitet wurde, konnte der Reststrom über die konisch zusammenlaufenden Rutsche unter dem Sortierer nicht dauerhaft

abgeführt werden. Nach einer gewissen Zeit staute sich der Materialstrom bis nach oben unter die NIR-Sensoren auf, was die Anlage blockierte und dazu führte, dass diese dann in regelmäßigen Abständen von Hand gesäubert werden musste. Dadurch konnte kein konstanter Durchfluss erreicht werden. Es wurde daher aufgrund der zeitlich begrenzten Nutzbarkeit der Anlage entschieden nach ca. 3700 kg den Versuch abubrechen.

Abbildung 47 zeigt die vollständige aus dem Abfallstrom entfernte Menge an PO (2D und 3D Material). Dieser Haufen entspricht einer Gesamtmenge von 19,541 kg oder ca. 0,53 % der gesamt aufgegebenen Menge. Aufgrund dieses Ergebnisses wurde auf die Durchführung des dritten Abschnittes verzichtet.



Abbildung 47: Ergebnis der PO-Sortierung mittels Redwave NIR

#### 4.2.5 Manuelle Sortierung der gewonnenen PO-Fraktion

Damit ein grober Überblick über die Anteile an 2D und 3D in der ausgeschleusten Fraktion ersichtlich ist, wurde die angefallene Menge manuell in 2D, 3D und Restfraktion sortiert. Dabei ergaben sich folgende Mengen, welche in Tabelle 4 dargestellt sind.

Tabelle 4: Mengenanteile der Polyolefin Fraktion

Fraktion	Menge [kg]	Anteil [%]
2D	4,167	21,3
3D	9,646	49,4
Rest	5,728	29,3

Wie in Tabelle 4 zu erkennen ist die 3D-Fraktion die anteilmäßig größte Fraktion der ausgeschleusten Polyolefine. Der Anteil des Restes erscheint hier sehr hoch, ist jedoch auch darauf zurückzuführen dass dieser aus einer großen Menge an Schutzteilchen und aus Material aus dem vorhergehenden Betrieb besteht. Die Ergebnisse der manuellen Sortierung sind in Abbildung 48 dargestellt.



Abbildung 48: Ergebnis der manuellen Sortierung, a.) 3D-Material, b.) Rest, c.) 2D-Material

Beachtet man die Ergebnisse aus Tabelle 4 kann man erkennen, dass die beiden Fraktionen in einem Verhältnis von 1:2 (2D:3D) stehen. Dies würde grundsätzlich darauf hinweisen, dass anhand der gemachten Beobachtungen und aufgrund des sich ergebenden Verhältnisses ein großer Anteil an Folien nicht aussortiert wird. Als Verbesserung würde sich hier z.B. ein Sortierer mit Luftflussunterstützung anbieten, welcher eine bessere Foliensortierung ermöglicht.

Aus der Arbeit von Selina Möllnitz [5] ist bekannt, dass in gemischten Siedlungs- und Gewerbeabfällen etwa 21 % Kunststoffe enthalten sind. Wird diese Zahl mit den erreichten 0,53 % (auch wenn es sich hierbei nur um PO handelt, Anteil von PO in Folien beträgt knapp 90 m%) verglichen zeigt sich ein massiver Verlust von Recyclingpotential.

## 5 Zusammenfassung und Ausblick

Das Recycling von Kunststoffen ist eine große technische Herausforderung und stellt dabei hohe Anforderungen an die jeweiligen Prozesse und kann daher nicht durch Vernachlässigung dieser Thematik aus der Welt geschafft werden. Es bedarf kontinuierlicher Weiterentwicklung der bisher zur Verfügung stehenden Prozesse und es darf sich dabei nicht auf den bisherigen Erfolgen ausruhen werden, sondern es muss im Sinne der Nachhaltigkeit eine bestmögliche Ausschöpfung des in Abfall steckenden Potentials stattfinden.

Das Mechanische und Chemische Recycling sind beides Verfahren, welche in unterschiedlichen Bereichen ihre Stärken besitzen, aber eine generelle Lösung ergibt sich durch keine dieser beiden Ansätze. Eines haben jedoch beide gemeinsam und dies ist die Sortenreine Gewinnung von Polyolefinen aus gemischten Siedlungs- und Gewerbeabfällen, welche für die Einhaltung der Ziele des Circular Economy Package relevant sind. Dadurch besteht die Notwendigkeit für immer neue Ideen und Entwicklungen im Bereich der Abfallsortierung.

In dieser Arbeit wurden unterschiedliche Ansätze für die Gewinnung von Polyolefinen verfolgt, wobei der Fokus hier auf den bereits zur Verfügung stehenden Anlagen und mobilen Maschinen diverser Hersteller lag und ihre Eignung für die genannte Problematik.

Als die vielversprechendste Technologie in der Sortierung von Abfall hat sich die Sortierung mittels Nah-Infrarot in den letzten Jahren herauskristallisiert. Für eine effiziente und optimale Nutzung dieser Technologie wird ein Material benötigt, welches eine recht homogene Korngröße innerhalb eines definierten Korngrößenbandes aufweist. Aus diesem Grund wurde im Zuge der Konzeptentwicklung und der anschließenden Versuche ein Augenmerk auf die unterschiedlichen Zerkleinerer Varianten gelegt. Dabei hat sich ergeben, dass der mobile 1-Wellen-Zerkleinerer mit dem getesteten 50 mm Siebkorb das aufgegebene Material zu stark verkleinerte und dieses dann nicht mehr für einen Einsatz in der NIR-Sortierung geeignet ist. Die Korngröße, welche sich durch ein zweimaliges Durchlaufen des Komptech Terminators ergeben hat, könnte den Anforderungen an die Korngröße genügen, wobei auf die Vermeidung von Teilchenverbunden geachtet werden muss.

Um die Reinheit von PO aus dem Abfallstrom zu erhöhen, bietet sich der mehrmalige (mindestens 2x) Durchlauf des eines NIR-Sortierers an, da dadurch beim zweiten Durchlauf die Reinheit der Polyolefine weiter erhöht werden kann und Störstoffe besser entfernt werden können. Zu beachten ist jedoch, dass mit jedem Durchlauf durch den NIR-Sortierer ein gewisser Materialverlust einhergeht und dies mitunter die am Ende zu erwartende Menge massiv schmälert.

Ein weiterer wichtiger Faktor besteht in der Trennung der 2D von der 3D-Fraktion der Polyolefine, welche essenziell für die beiden Recyclingverfahren sind, wenn die 2D-Fraktion in das chemische und die 3D-Fraktion in das mechanische Recycling gehen soll. Hier hat sich durch die Versuche mittels Windsichter der Firma Komptech gezeigt, dass die durch den Terminator erreichte Korngröße eine Trennung möglich macht.

Abschließend ist zu erwähnen, dass der NIR-Sortierer der Anlage des österreichischen Aufbereitungsunternehmens grundsätzlich für diese Aufgabe geeignet ist. Der Sortiererfolg jedoch von der Vereinzelung des aufgegebenen Materials abhängig ist und darauf geachtet werden muss, dass dieser nicht durch das Material verstopft wird. Das sich ergebende Verhältnis von 2D:3D mit 1:2 würde grundsätzlich einem mehr Ausschleusung von 3D-Material entsprechen, und bedeutet einen erheblichen Verlust von PO, da in der 2D-Fraktion ein höherer Anteil an PO enthalten ist. Dies kann im Hinblick auf die Recyclingziele nicht akzeptiert werden und es bedarf weiterer Anpassungen der Sortierung.

Durch diese Erkenntnisse konnte das in Abbildung 35 aufgezeigte Konzept einer Gewinnungslinie nicht zur Gänze bestätigt werden. Durch weitere Tests von unterschiedlichen Maschinen und Anlagen sowie von Abschnitt 3 sollte es möglich sein, ein vollständiges Konzept, mit funktionierender PO-Abtrennung zu entwickeln. Diese Arbeit liefert somit einen ersten tieferen Blick in die Thematik der Sortierung von gemischten Siedlungs- und Gewerbeabfall und zeigt verschiedene Problemstellungen und mögliche Ansatzpunkte für die weitere Forschung auf.

## 6 Verzeichnisse

### 6.1 Literaturverzeichnis

- [1] Reichelt Chemietechnik Magazin. 2022. Über die Geschichte der Kunststoffe [online]. *Reichelt Chemietechnik Magazin* [abgerufen am 7. Oktober 2022]. Verfügbar unter <https://www.rct-online.de/magazin/geschichte-der-kunststoffe/>.
- [2] Bund für Umwelt und Naturschutz Deutschland e.V. 2019. *Plastikatlas. Daten und Fakten über eine Welt voller Kunststoff*. 3. Auflage. Berlin: Heinrich-Böll-Stiftung.
- [3] European Commission. 2020. *Circular economy action plan* [online]. Verfügbar unter [https://environment.ec.europa.eu/strategy/circular-economy-action-plan\\_en](https://environment.ec.europa.eu/strategy/circular-economy-action-plan_en) [abgerufen am 7. Oktober 2022].
- [4] Bundesministerium für Klimaschutz, Umwelt, Energie, Mobilität, Innovation und Technologie. 2022. *Bundesgesetz über eine nachhaltige Abfallwirtschaft - Abfallwirtschaftsgesetz 2002* [online]. Verfügbar unter <https://www.ris.bka.gv.at/GeltendeFassung.wxe?Abfrage=Bundesnormen&Gesetzesnummer=20002086> [abgerufen am 5. Oktober 2022].
- [5] Selina Möllnitz. 2017. *Vergleich der Verwertungssysteme werkstoffliches und rohstoffliches Polyolefinrecycling anhand von ausgewählten Abfallströmen*. Masterarbeit.
- [6] Umweltbundesamt. 2022. *EDM Portal für Abfallverzeichnis gemäß Österreichischer Abfallverzeichnisverordnung* [online]. Verfügbar unter [https://secure.umweltbundesamt.at/edm\\_portal/redaList.do?event=defaultOrder&trigger=true&seqCode=c2ck5gyutbw7qf&entireLsq=true](https://secure.umweltbundesamt.at/edm_portal/redaList.do?event=defaultOrder&trigger=true&seqCode=c2ck5gyutbw7qf&entireLsq=true) [abgerufen am 5. Oktober 2022].
- [7] Bundesministerium für Nachhaltigkeit und Tourismus. 2019. *Die Bestandsaufnahme der Abfallwirtschaft in Österreich - Statusbericht 2019* [online]. Verfügbar unter [https://www.arge.at/wp-content/uploads/2019/06/Die\\_Bestandsaufnahme\\_der\\_Abfallwirtschaft\\_in\\_%c3%96sterreich\\_web.pdf](https://www.arge.at/wp-content/uploads/2019/06/Die_Bestandsaufnahme_der_Abfallwirtschaft_in_%c3%96sterreich_web.pdf) [abgerufen am 5. Oktober 2022].
- [8] Bundesministerium für Klimaschutz, Umwelt, Energie, Mobilität, Innovation und Technologie. 2022. *Bundesabfallwirtschaftsplan 2022* [online]. Verfügbar unter [https://www.bmk.gv.at/themen/klima\\_umwelt/abfall/aws/bundes\\_awp/bawp2022.html](https://www.bmk.gv.at/themen/klima_umwelt/abfall/aws/bundes_awp/bawp2022.html) [abgerufen am 5. Oktober 2022].
- [9] Univ. Prof. DI Dr. mont. Roland Pomberger, 2020. *Skriptum Entsorgungslogistik*. Leoben, 2020.
- [10] COWI A/S, Ingenieurgesellschaft Innovative Umwelttechnik GmbH, Montanuniversität Leoben. 2019. Study about Plastic Sorting and Recycling.
- [11] BRT HARTNER GmbH. 2022. *Sacköffner BRT HARTNER BO | Eggersmann GmbH* [online]. Verfügbar unter <https://www.eggersmann-recyclingtechnology.com/recyclingmaschinen/brt-hartner-oeffnungs-dosier-und-sortiersysteme/produkte/sackoeffner-brt-hartner-bo/> [abgerufen am 12. Oktober 2022].

- [12] WEIMA Maschinenbau GmbH. 2022. *Zweiwellen Vorzerkleinerer Pre-Shredder von WEIMA [online]*. Verfügbar unter <https://weima.com/de/zerkleinerer/m8-28/> [abgerufen am 11. Oktober 2022].
- [13] Neuenhauser Maschinenbau GmbH. 2022. *Trommelsieb Anhänger von Neuenhauser Umwelttechnik [online]*. Verfügbar unter <https://neuenhauser-ut.de/produkte/mobile-loesungen/trommelsiebe/nh-6020-e-anhaenger/> [abgerufen am 11. Oktober 2022].
- [14] Steinert GmbH. 2022. *Überbandmagnet [online]*. Verfügbar unter <https://steinertglobal.com/de/magnete-sensorsortierer/magnetseparation/ueberbandmagnete/steinert-ump/> [abgerufen am 11. Oktober 2022].
- [15] Thiel, S. et al. [Hrsg.] 2019. *Recycling und Rohstoffe*. Neuruppin: TK Thomé-Kozmiensky Verlag.
- [16] Schubert, H. [Hrsg.] 2012. *Handbuch der Mechanischen Verfahrenstechnik. Partikeleigenschaften, Mikroprozesse, Makroprozesse, Schüttgut*. Weinheim: Wiley-VCH.
- [17] Martens, H. 2016. *Recyclingtechnik. Fachbuch für Lehre und Praxis*. 2. Aufl. 2016. Wiesbaden: Springer Vieweg.
- [18] BRT HARTNER GmbH. 2022. *Ballistik Separator BRT HARTNER BS | Eggersmann GmbH [online]*. Verfügbar unter <https://www.eggersmann-recyclingtechnology.com/recyclingmaschinen/brt-hartner-oeffnungs-dosier-und-sortiersysteme/produkte/ballistik-separator-brt-hartner-bs/> [abgerufen am 12. Oktober 2022].
- [19] Sarc, R. Verfahrensbild einer österreichischen Abfallsplitting- und EBS-Produktionsanlage.
- [20] Roos, E. 2015. *Werkstoffkunde für Ingenieure. Grundlagen, Anwendung, Prüfung*. 5. Aufl. 2015. Berlin, Heidelberg: Springer Vieweg.
- [21] [www.kunststoffe.de](http://www.kunststoffe.de). 2022. *Polyethylen (PE) | Alles über den am häufigsten verwendeten Kunststoff [online]*. Verfügbar unter <https://www.kunststoffe.de/a/grundlagenartikel/polyethylen-pe-254120> [abgerufen am 26. September 2022].
- [22] Ehrenstein, G. 2011. *Polymer-Werkstoffe. Struktur - Eigenschaften - Anwendung*. 3. Auflage. München: Hanser.
- [23] Chemieuro | Polymer selling, trading and distribution. 2018. *Lineares Octen-Polyethylen niedriger Dichte. LLDPE - C8 [online]*. Verfügbar unter <https://www.chemieuro.com/de/polymerkatalog/polyolefine/lineares-octen-polyethylen-niedriger-dichte-llpe-c8/> [abgerufen am 29. September 2022].
- [24] Chemieuro | Polymer selling, trading and distribution. 2018. *Polyethylen mittlerer Dichte. MDPE [online]*. Verfügbar unter <https://www.chemieuro.com/de/polymerkatalog/polyolefine/polyethylen-mittlerer-dichte-mdpe/> [abgerufen am 29. September 2022].

- [25] Domininghaus, H. 2005. *Die Kunststoffe und ihre Eigenschaften*. 6., neu bearbeitete und erweiterte Auflage. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg.
- [26] Kunststoffe: Nachrichten, Stellenmarkt, Produkte für die Kunststoffindustrie | Kunststoffe.de. 2022. *Polypropylen | Grundwissen | Eigenschaften, Anwendung & Mehr [online]*. Verfügbar unter <https://www.kunststoffe.de/a/grundlagenartikel/polypropylen-pp-264406> [abgerufen am 29. September 2022].
- [27] Kunststoffe: Nachrichten, Stellenmarkt, Produkte für die Kunststoffindustrie | Kunststoffe.de. 2022. *Polystyrol (PS) | Grundwissen | Basics Kunststoffe [online]*. Verfügbar unter <https://www.kunststoffe.de/a/grundlagenartikel/polystyrol-ps-264382> [abgerufen am 29. September 2022].
- [28] Engel Austria GmbH. 2021. Kunststoff-Flakes direkt verarbeiten [online]. *ENGEL AUSTRIA GmbH* [abgerufen am 30. September 2022]. Verfügbar unter <https://www.engelglobal.com/de/at/news-presse/news-pressemitteilungen/detail/news/detail/News/kunststoff-flakes-direkt-verarbeiten.html>.
- [29] Thiel, S. et al. [Hrsg.] 2020. *Energie aus Abfall, Band 17. Was können die mechanische Aufbereitung von Kunststoffen und das werkstoffliche Recycling leisten? Chemisches Recycling von Kunststoffabfällen – eine Alternative zur werkstofflichen Verwertung?* Neuruppin: Thomé-Kozmiensky Verlag GmbH.
- [30] Lechleitner, A. et al. 2020. Chemisches Recycling von gemischten Kunststoffabfällen als ergänzender Recyclingpfad zur Erhöhung der Recyclingquote [online]. *Österreichische Wasser- und Abfallwirtschaft*. doi: 10.1007/s00506-019-00628-w.
- [31] Simone Weitzer. 2020. *Fehlwürfe im Restmüll belasten die Müllgebühr [online]*. Verfügbar unter <http://www.muerzverband.at/fehlwuerfe-im-restmuell-belasten-die-muellgebuehr/> [abgerufen am 6. Oktober 2022].
- [32] Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und nukleare Sicherheit und [www.bmu.de](http://www.bmu.de). Sachstand über die Schadstoffe in Kunststoffen und ihre Auswirkungen auf die Entsorgung.
- [33] Dipl. Ing. Dr. mont. Alexia Aldrian, 2018. *Angewandte Umweltanalytik*. Skriptum zu Vorlesung, 2018.
- [34] Universität Regensburg. IR-Spektroskopie im Praktikum.
- [35] Thomé-Kozmiensky, K. und Goldmann, D. [Hrsg.] 2013. *Recycling und Rohstoffe*. Neuruppin: TK-Verl.
- [36] Komptech GmbH. 2022. *Terminator mobil - Komptech Zerkleinerungsmaschine [online]*. Verfügbar unter <https://www.komptech.com/produkte/terminator-mobil/#/> [abgerufen am 3. Dezember 2022].
- [37] Komptech GmbH. 2022. *Maxx/Maxx E - Trommelsieb [online]*. Verfügbar unter <https://www.komptech.com/produkte/maxx-maxx-e/#/> [abgerufen am 4. Dezember 2022].

- [38] Komptech GmbH. 2022. *Metalfex - Nicht-Eisenmetall-Scheider [online]*. Verfügbar unter <https://www.komptech.com/produkte/metalfex/#/> [abgerufen am 3. Dezember 2022].
- [39] Komptech GmbH. 2022. *Hurrikan S - Windsichter [online]*. Verfügbar unter [https://www.komptech.com/produkte/hurrikan\\_s/#/](https://www.komptech.com/produkte/hurrikan_s/#/) [abgerufen am 3. Dezember 2022].
- [40] REDWAVE a division of BT-Wolfgang Binder GmbH. 2022. *REDWAVE Produkte und die neue Generation der intelligenten Sortiertechnik [online]*. Verfügbar unter <https://redwave.com/produkte> [abgerufen am 3. Dezember 2022].

## 6.2 Abkürzungsverzeichnis

PE	Polyethylen
PP	Polypropylen
PS	Polystyrol
EBS	Ersatzbrennstoff
PO	Polyolefine
Fe	Eisen
NEM	Nicht Eisen Metall
NIR	Nahinfrarot
PVC	Polyvinylchlorid
PET	Polyethylenterephthalat
PC	Polycarbonate
PF	Phenoplast
UV-VIS	Ultraviolet - Visible
FTIR	Fourier Transformation Infrarotspektrometer
IR	Infrarot
ATR	Attenuated total reflection

## 6.3 Tabellen

Tabelle 1: Dichten der PE-Typen.....	18
Tabelle 2: Anteile der Kunststoffe in der Untersuchten 2D-Probe .....	46
Tabelle 3: Anteile der Kunststoffe in der Untersuchten 3D-Probe .....	47
Tabelle 4: Mengenanteile der Polyolefin Fraktion .....	56

## 6.4 Abbildungen

Abbildung 1: Globale Kunststoffproduktion seit 1950 [2].....	4
Abbildung 2: Sacköffner der Firma BRT HARTNER GmbH [11] .....	7
Abbildung 3: Mehr-Wellen-Zerkleinerer der Firma WEIMA Maschinenbau GmbH [12] .....	8
Abbildung 4: Trommelsieb der Firma Neuenhauser Maschinenbau GmbH [13].....	9
Abbildung 5: Überbandmagnetscheider der Firma Steinert GmbH [14] .....	9
Abbildung 6: Funktionsprinzip eines Wirbelstromscheiders [15] .....	10
Abbildung 7: Funktionsprinzip eines Zik-Zak-Windsichters [16] .....	11
Abbildung 8: Funktionsaufbau eines Ballistischen Separators [17] .....	12
Abbildung 9: Ballistischer Separator der Firma BRT HARTNER GmbH [18].....	12
Abbildung 10: Beispiel einer Sensorgestützten Sortierung mittels NIR-Sensors [17] .....	13

Abbildung 11: Verfahrensfliessbild einer österreichischen Abfallsplitting- und EBS-Produktionsanlage [19].....	15
Abbildung 12: Struktur Amorpher (links) und Teilkristalliner (rechts) Thermoplaste [1] .....	16
Abbildung 13: Chemischer Aufbau von Polyethylen [22].....	17
Abbildung 14: Chemischer Aufbau von Polypropylen [22] .....	19
Abbildung 15: Chemischer Aufbau von Polystyrol [22] .....	20
Abbildung 16: Syntheseweg für die Herstellung von Styrol [25].....	20
Abbildung 17:Verfahrensablauf Mechanisches Recycling [Eigene Darstellung] .....	21
Abbildung 18: Verfahrensablauf für die Erzeugung von PE/PP Granulat aus PE/PP-Abfällen [29].....	23
Abbildung 19: Verfahrensablauf für die Erzeugung von PS-Granulat aus PS-Abfällen [10] ..	23
Abbildung 20: Spaltung von Polyolefinketten während des Verflüssigungsprozesses [17]....	24
Abbildung 21: Schematische Darstellung einer Drehrohrpyrolyseanlage [17].....	25
Abbildung 22: Schematischer Aufbau eines Festbettvergasers mit Ablaufenden Reaktionsgleichungen [17] .....	26
Abbildung 23: Probenahme (links) des 2D-Materials (rechts) [Foto: Sandra Viczek] .....	30
Abbildung 24: Probenahme (links) des 3D-Materials (rechts) [Foto: Sandra Viczek] .....	31
Abbildung 25: Aufbau eines FTIR Spektrometers mit Signalauswertung, erweitert nach [34] .....	32
Abbildung 26: Vorgang der abgeschwächten Totalreflexion [33] .....	32
Abbildung 27: Funktion einer NIR-Erkennung [35].....	33
Abbildung 28: Sortierer im AVAW-Technikum mit Rüttelplatte (1) für die Materialaufgabe (2), dem NIR-Analysegerät (3), der Systemsteuerung (4), den Auffangbehältern (5), einer Abrutschplatte (6) und den Luftdüsen (7) .....	34
Abbildung 29: Lochsieb (links) und Schneidewerkzeug (rechts) im Detail .....	36
Abbildung 30: Terminator der Firma Komptech GmbH [36] .....	36
Abbildung 31: Innenansicht eines Terminators der Firma Komptech GmbH [36] .....	37
Abbildung 32: Trommelsieb der Firma Komptech GmbH [37].....	37
Abbildung 33: Metalfex Wirbelstromscheider der Firma Komptech GmbH [38].....	38
Abbildung 34: Windsichter Hurrikan S der Firma Komptech GmbH [39] .....	39
Abbildung 35: Verfahrensfliessbild zu Gewinnung von Polyolefinen (eigene Darstellung).....	42
Abbildung 36: Verfahrensfliessbild eines österreichischen Aufbereitungsunternehmens (erstellt anhand von Daten dieses Unternehmens).....	45

Abbildung 37: Menge der Kunststofffraktionen PE, PP, PS im 2D-Material dieser Anlage ....	47
Abbildung 38: Menge der Kunststofffraktionen PE, PP, PS im 3D-Material dieser Anlage ....	48
Abbildung 39: Ergebnis der Zerkleinerung durch den mobilen 1-Wellen-Zerkleinerer .....	49
Abbildung 40: Ergebnis der Zerkleinerung mittels Komptech Terminator [Foto: Sandra Viczek] .....	50
Abbildung 41: Ergebnis des zweiten Durchlaufs durch den Terminator [Foto: Sandra Viczek] .....	51
Abbildung 42: Versuchsanlage 2D/3D-Trennung mittels Komptechmaschinen .....	52
Abbildung 43: 2D-Material aus dem Hurrikan .....	52
Abbildung 44: 3D-Material aus dem Hurrikan .....	53
Abbildung 45: Aufgabe des Materials in den Aufgabebunker mittels Radlader .....	54
Abbildung 46: Auffangcontainer (links) für ausgeschleuste Fraktion und Entleerungsschacht (rechts) für Restmaterial .....	55
Abbildung 47: Ergebnis der PO-Sortierung mittels Redwave NIR .....	56
Abbildung 48: Ergebnis der manuellen Sortierung, a.) 3D-Material, b.) Rest, c.) 2D-Material .....	57

