



| Lehrstuhl für Abfallverwertungstechnik und Abfallwirtschaft |

Masterarbeit

| Kunststoffe aus Rest- und Gewerbemüll

in Österreich –

Anlagentests zur Schaffung einer
gemischten Kunststofffraktion für
rohstoffliches Recycling |

| Thomas Warchol, BSc |

| August 2020 |



EIDESSTATTLICHE 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 die gedruckte Version der eingereichten wissenschaftlichen Abschlussarbeit formal und inhaltlich identisch sind.

Datum 20.08.2020

Unterschrift Verfasser/in
Thomas, Warchol
Matrikelnummer: 00935026

Danksagung

Besonderer Dank gilt dem Leiter des Lehrstuhls für Abfallverwertungstechnik und Abfallwirtschaft, sowie den Betreuern dieser Arbeit:

Univ.-Prof. Dipl.-Ing. Dr.mont. Roland Pomberger

Dipl.-Ing. Selina Möllnitz

Dipl.-Ing. Alex Curtis

Dipl.-Ing. Dr.mont. Renato Sarc

Die Arbeit wurde im Rahmen des Projektes ReWaste4.0 verfasst.

Das Kompetenzzentrum Recycling and Recovery of Waste 4.0 - ReWaste4.0 - (860 884) wird im Rahmen von COMET – Competence Centers for Excellent Technologies durch BMVIT, BMWFW und Land Steiermark gefördert. Das Programm COMET wird durch die FFG abgewickelt.

Kurzfassung

Kunststoffe aus Rest- und Gewerbemüll in Österreich Anlagentests zur Schaffung einer gemischten Altkunststofffraktion für rohstoffliches Recycling

Die europäische Union hat im Zuge des Kreislaufwirtschaftspaketes Recyclingquoten für Siedlungsabfall und Kunststoffverpackungen gesetzlich verankert. Österreich ist auf einem guten Weg, die Quoten für Siedlungsabfall für 2020 zu erfüllen. Die Ziele für Kunststoffverpackungen können gegenwärtig nicht erreicht werden. Gründe hierfür sind unter anderem der Anteil an Altkunststoff, der im Restmüll und Gewerbemüll landet und somit nicht mehr für die Recyclingindustrie verfügbar ist, da Restmüll und Gewerbemüll derzeit hauptsächlich der Ersatzbrennstoffproduktion zugeführt werden, sowie die hohen Anforderungen an stoffliche Reinheit für ein werkstoffliches Recycling. Im Zuge eines Forschungsprojekts der Montanuniversität Leoben und abfallwirtschaftlichen Partnerunternehmen wurden zwei Anlagenvarianten getestet, um eine kunststoffreiche Mischfraktion aus Restmüll und Gewerbemüll zu herzustellen. Die Anlagen bereiteten die Inputmaterialien so auf, dass drei beziehungsweise vier unterschiedliche Outputfraktionen (3D-, 2D-, zwei verschiedene Feingutfraktionen) produziert werden. Die 3D-Fraktion wurde anschließend mittels sensorgestützter Sortierung (nahinfrarot) in eine Mischkunststofffraktion und Restfraktion sortiert. Diese Mischkunststofffraktionen sollen ohne eine weiterführende Behandlung die Anforderungen für ein rohstoffliches Recycling erfüllen. Die 2D-Fraktionen wurden mittels händischer Sortieranalysen auf potenzielle Wertstoffgehalte und Zusammensetzung hin untersucht. Die Korngrößenverteilungen der Feingutfraktionen – ergänzt mit vorherigen Untersuchungen von Möllnitz et al. (2020) zu Feingütern aus Rest- und Gewerbemüll – sollten Aufschluss auf Kunststoffgehalte in den Feingutfraktionen geben. Die Ergebnisse der Versuche haben gezeigt, dass beide Anlagen im Stande sind eine Mischkunststofffraktion zu erzeugen, welche die Anforderungen für ein rohstoffliches Recycling erfüllt. Es zeigte sich allerdings auch, dass sich der Großteil der Kunststoffe in den 2D- und Feingutfraktionen sammelt, weshalb zukünftige Untersuchungen zur Aufbereitung dieser Fraktionen aus den Anlagen wichtig wären. Im Anlagenvergleich hat sich herausgestellt, dass die Anlagenvariante mit Vorsiebung (Anlage 2) bessere Ergebnisse erzielt. Durch Vorsiebung steigt der Reinheitsgrad der Mischkunststofffraktion, erhöht sich der Anteil an Kunststoffen in der 2D-Fraktion und steigt der Anteil an feinen Kunststoffpartikeln im abgeseibten Feingut.

Abstract

Plastics from mixed residual and commercial waste in Austria

Plant tests to create a mixed plastic waste fraction for feedstock recycling

As part of the circular economy package, the European Union has legally anchored recycling quotas for solid, mixed municipal waste and plastic packaging as part of the circular economy package. Austria is well on the way to reaching the quota for municipal waste for 2020. The targets for plastic packaging cannot currently be achieved. In the course of a research project of the Montanuniversitaet Leoben and waste management partner companies, two plant variants were tested in order to produce a mixed fraction from waste plastics from mixed municipal waste and commercial waste. The plants processed the input materials in such a way that three or four different output fractions were produced (3D-, 2D- and two different fine material fractions). The 3D-fraction was then sorted into a mixed plastic fraction and a residual fraction using sensor-based sorting (near-infrared). These mixed plastic fractions should meet the requirements for feedstock recycling. The 2D-fractions were generally analyzed by manual sorting analyses for possible potential of recyclable material and composition. The particle size distributions of the fine material fractions - supplemented by previous studies on fine fractions from municipal and commercial waste - were intended to provide information on possible proportions of waste plastics in the fine fractions. The results have shown that both plants are able to produce a mixed plastic fraction that meets the requirements for feedstock recycling. It was also shown that the majority of the plastics were collected in the 2D- and fine material fractions, which is why future studies should target the processing of these fractions. A comparison of the plants showed that the plant variant with pre-screening achieved better results. Pre-screening increases the degree of purity of the mixed plastic fraction, increases the proportion of plastics in the 2D-fraction and increases the proportion of fine plastic particles in the fine material.

Inhaltsverzeichnis

	Seite
1 EINLEITUNG	4
1.1 Problemstellung	6
1.2 Zielsetzung	7
2 THEORIETEIL	9
2.1 Inputmaterial	9
2.1.1 Einteilung	9
2.1.2 Aufkommen	9
2.1.3 Zusammensetzung	10
2.1.3.1 Restmüll	10
2.1.3.2 Gewerbemüll	11
2.1.4 Altkunststoffe in Restmüll und Gewerbemüll	11
2.1.5 Aufbereitung von Restmüll und Gewerbemüll in Österreich	12
2.2 Stoffliche Verwertung von Altkunststoffen	13
2.2.1 Herausforderungen der stofflichen Verwertung von Kunststoffen	13
2.2.2 Werkstoffliches Recycling von Mischkunststoffen undefinierter Zusammensetzung	15
2.2.3 Rohstoffliches Recycling von Mischkunststoffen undefinierter Zusammensetzung	16
2.2.3.1 Ersatzreduktionsmittel im Hochofen	17
2.3 Aufbereitungstechnik der Versuchsanlage	20
2.3.1 Zerkleinerung	20
2.3.2 Siebung	20
2.3.3 Ballistische Separation	20
2.3.4 Sensorgestützte Sortierung (Nahinfrarot Technologie)	20
3 METHODIK UND ABLAUF	23
3.1 Anlagenversuche	25
3.1.1 Vorversuchswoche, Massenstrommessung	25
3.1.2 Versuchsmaterial	26
3.1.3 Probenahme	26
3.1.4 Versuchswoche	29
3.2 Output-Analyse	30
3.2.1 Siebanalyse der Feingutfraktion und Siebwirkungsgrad	30
3.2.2 Handsortierung der 2D-Fraktion	30

3.2.3	NIR-Sortierung der 3D-Fraktion	32
4	ERGEBNISSE UND DISKUSSION.....	35
4.1	Anlagenbilanzierung	35
4.1.1	Anlage 1 – Gewerbemüll.....	35
4.1.2	Anlage 2 – Gewerbemüll.....	37
4.1.3	Anlage 1 – Restmüll.....	39
4.1.4	Anlage 2 – Restmüll.....	40
4.1.5	Siebwirkung	42
4.2	Korngrößenverteilungen der FG-Fraktionen	44
4.2.1	Gewerbemüll.....	44
4.2.2	Restmüll.....	46
4.3	Sortieranalyse der 2D-Fraktionen	48
4.3.1	Gewerbemüll.....	48
4.3.2	Restmüll.....	52
4.4	Sensorgestützte Sortierung der 3D-Fraktionen.....	56
4.4.1	Reinheit der Wertstofffraktionen (3D-Kunststoffe).....	56
4.4.2	Ausbringen der Wertstofffraktion (Kunststoffe und Rest-Fehlaustrag) aus der 3D-Fraktion.....	57
4.4.3	Wertstoffausbringen (Kunststoffe aus der 3D-Fraktion).....	58
4.4.4	Fehlaustrag (Kunststoff in Reststofffraktion).....	59
5	ERWEITERTE DISKUSSION	61
5.1	Wertstoffpotentiale in den FG-Fraktionen	61
5.2	Verwertungswege für Kunststoffe aus den FG- und 2D-Fraktionen.....	63
5.2.1	Mechanische Aufbereitung.....	63
5.2.2	Erzeugung von heizwertreichen Fraktionen	65
5.2.3	Manuelle Sortierung.....	65
5.3	Theoretischer Einsatz der Anlagen in Österreich.....	65
6	ZUSAMMENFASSUNG	67
7	VERZEICHNISSE	69
7.1	Literatur.....	69
7.2	Abkürzungsverzeichnis	72
7.3	Tabellen.....	73
7.4	Abbildungen	74
ANHANG I – TECHNISCHE DATEN DER AGGREGATE.....	I	
Shredder	I	

Trommelsieb	III
Bandwaage	IV
Ballistikseparator	IV
ANHANG II – FOTODOKUMENTATION	VII
Anlagenaufbau und Vorversuchswoche	VII
Gewerbemüllversuche – Anlage 1	VIII
Gewerbemüllversuche – Anlage 2	IX
Restmüllversuche – Anlage 1	XI
Restmüllversuche – Anlage 2	XIII
FG-Analyse	XV
Sortieranalyse des 2D-Output	XVI
2D-Fractionen Gewerbemüll – Anlage 1	XVII
2D-Fractionen Gewerbemüll – Anlage 2	XVIII
2D-Fractionen Restmüll – Anlage 1	XIX
2D-Fractionen Restmüll – Anlage 2	XX
Sensorgestützte Sortierung	XXI

1 Einleitung

Im neuen „Aktionsplan für die Kreislaufwirtschaft – Für ein sauberes und wettbewerbsfähiges Europa“ (EU, 2020:1) der europäischen Union werden unter anderem Absichten und Ziele formuliert, wie die zukünftige Abfallwirtschaft in Europa auszusehen hat. Dabei erwähnt der Aktionsplan, dass der Durchschnittseuropäer rund eine halbe Tonne pro Jahr (t/a) an Siedlungsabfall erzeugt (EU, 2020:14). Eine Tatsache, die unter Weiterführung der derzeitigen linearen Wirtschaft Gefahr läuft, weiter anzusteigen (EU, 2020:15-16).

Bisher bedeutete Wirtschaftswachstum einen proportionalen Anstieg an Abfallmengen. Für ein stetiges Wirtschaftswachstum muss auch immer konstant mehr konsumiert werden. Daraus steigt jährlich der Ressourcenverbrauch und damit auch das Abfallaufkommen. Um das Abfallaufkommen vom Wirtschaftswachstum zu entkoppeln, braucht es Maßnahmen in mehreren Aktionsfeldern wie Produktionseffizienz, Verwendungsarten von Produkten, Abbau der Obsoleszenz und auch Maßnahmen für eine nachhaltigere Abfallwirtschaft. Eine dieser Maßnahmen ist die Steigerung der stofflichen Verwertung von Altstoffen wie Metallen, PPK (Papier, Pappe, Kartonagen) und Kunststoffen. Mit der Erhöhung der stofflichen Verwertung von Altkunststoffen und der gleichzeitigen Reduktion von nicht recyceltem Siedlungsabfall und ähnlichen Gewerbeabfällen befasst sich diese Arbeit. Um Fortschritte der einzelnen Mitgliedsstaaten zu bewerten, sieht die EU bis 2030 vor, die Menge an nicht recycelten Siedlungsabfall zu halbieren, obwohl auch im Aktionsplan schon festgestellt wurde, dass mehr als die Hälfte aller Mitgliedsstaaten das Ziel für 2020 (Recycling von 50 % aller Siedlungsabfälle) verfehlen werden. (EU, 2020:9-17)

Im Jahr 2018 betrug das Abfallaufkommen von Siedlungsabfällen aus Haushalten und ähnlichen Einrichtungen in der österreichischen Bundesrepublik 5.119.000 t (Eurostat, 2020). 5.041.000 t (Eurostat, 2020) Siedlungsabfall wurden in Österreich behandelt. Das bedeutet einen Export von 78.000 t Siedlungsabfall zur Verwertung oder Beseitigung. Von den im Inland behandelten 5.041.000 t wurden 1.977.000 t (Eurostat, 2020) thermisch, nach R1-Verwertungsverfahren verwertet (RL 2008/98/EG, 2008). 113.000 t wurden nach Beseitigungsverfahren D1-D7 oder D12 (RL 2008/98/EG, 2008) verwertet. Der Rest, 2.951.000 t, wurden entweder recycelt oder kompostiert. Damit erreichte die Bundesrepublik eine Recyclingquote von gerundeten 58 % (Eurostat, 2020). Mit 58 % hat Österreich das Quotenziel von 2025, eine Vorbereitung zur Wiederverwendung und Recycling von mindestens 55 % des angefallenen Siedlungsabfall, schon im Jahr 2018 erreicht (RL 2018/851, 2018). Dieses Ziel soll 2030 auf 60 % und bis 2035 auf 65 % gesteigert werden (RL 2018/851, 2018). Diese Ziele scheinen leicht erreichbar, doch zeigt der Trend der Recyclingrate von Siedlungsabfällen in Österreich (vgl. Abbildung 1), dass die Maßnahmen intensiviert werden müssen, um sie tatsächlich zu erreichen.

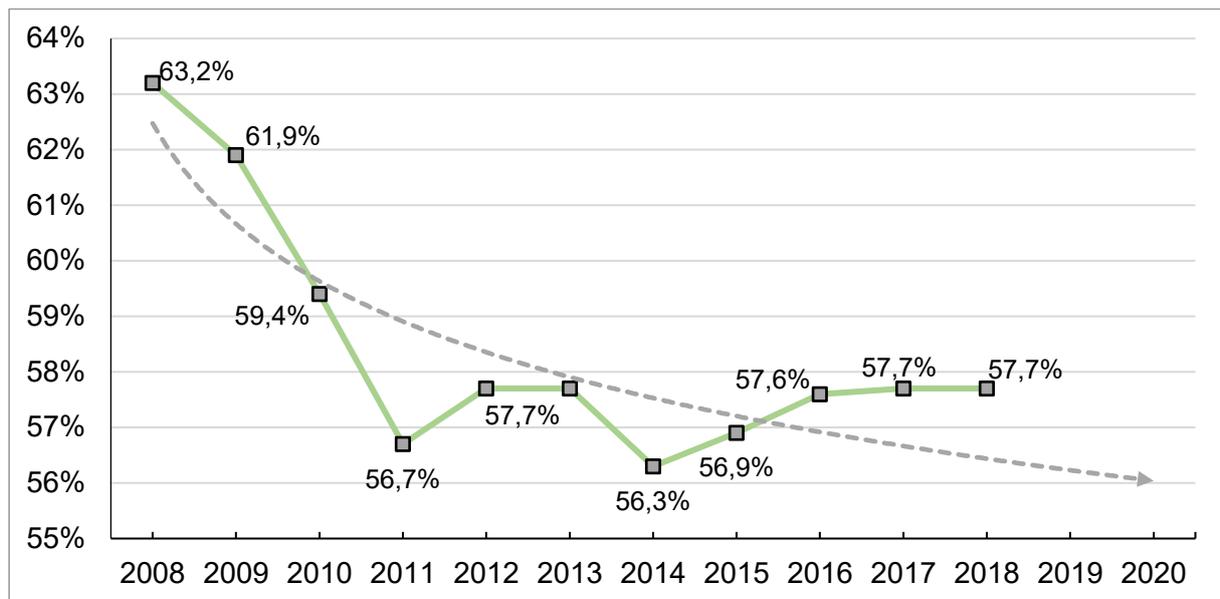


Abbildung 1: Recyclingraten von Siedlungsabfällen 2008 bis 2018 in Österreich (Eurostat, 2020).

Weitere Kreislaufwirtschaftsziele der europäischen Union betreffen die Recyclingraten von Verpackungsabfällen aus Kunststoff. Für Kunststoffverpackungen ist eine Recyclingquote von 50 % bis 2025 und 55 % bis 2030 vorgesehen (EU, 2018). Das ist eine große Veränderung zu der bislang geltenden Recyclingrate von 22,5 % (BGBl. II Nr.184/14, 2020). 2017 lag die Recyclingrate von Kunststoffverpackungen in Österreich bei 33,4 %. Im selben Jahr lag die Recyclingrate der EU-28 bei 41,9 % (Eurostat, 2020). Die erzielten Recyclingraten für Kunststoffverpackungen in Österreich (vgl. Abbildung 2) zeigen, dass zum Erreichen der Ziele für 2025 und 2030 die Leistung der Abfallwirtschaft und Recyclingindustrie für diese Abfallart im kommenden Jahrzehnt gesteigert werden muss.

Um sicher zu stellen, dass die Recyclingziele für Siedlungsabfälle und Kunststoffverpackungen erreicht werden, sind in Österreich mehrere Maßnahmen auf abfallwirtschaftlicher und unterstützender öffentlicher Ebene (Informationsarbeit) geplant. Zu den abfallwirtschaftlichen Maßnahmen gehören unter anderem eine zusätzliche Sortierung von gemischtem Siedlungsabfall (Restmüll) und ähnlichem Gewerbeabfall. Diese Maßnahme wird unter anderem von der Altstoff Recycling Austria AG (ARA) unterstützt. Die ARA führt die Notwendigkeit dieser Maßnahme auf Erkenntnisse soziologischer Lebenssituationen von österreichischen Einwohnern zurück. Gewisse Gesellschaftsgruppen sind unzugänglich für Umweltschutz- oder Abfallthemen. Prekäre soziale Verhältnisse, in der sich diese Menschen befinden, schaffen Prioritäten abseits einer ökologischen Lebensweise. Das Resultat ist unachtsames Entsorgen von Altstoffen (insbesondere Wertstoffe) in Restmüll (ARA, 2019:62). Damit wird mit der zusätzlichen Sortierung von gemischtem Siedlungsabfall nicht nur die Sortiertiefe für Siedlungsabfall allgemein erhöht, sondern auch Fehlwürfe der Abfallerzeuger/Endverbraucher können wieder in einen Recyclingkreislauf zurückgeleitet werden. Eine weitere Maßnahme sieht die Ergänzung der werkstofflichen Verwertung um eine Erweiterung durch das rohstoffliche Recycling von Altkunststoffen vor (ARA, 2019:62).

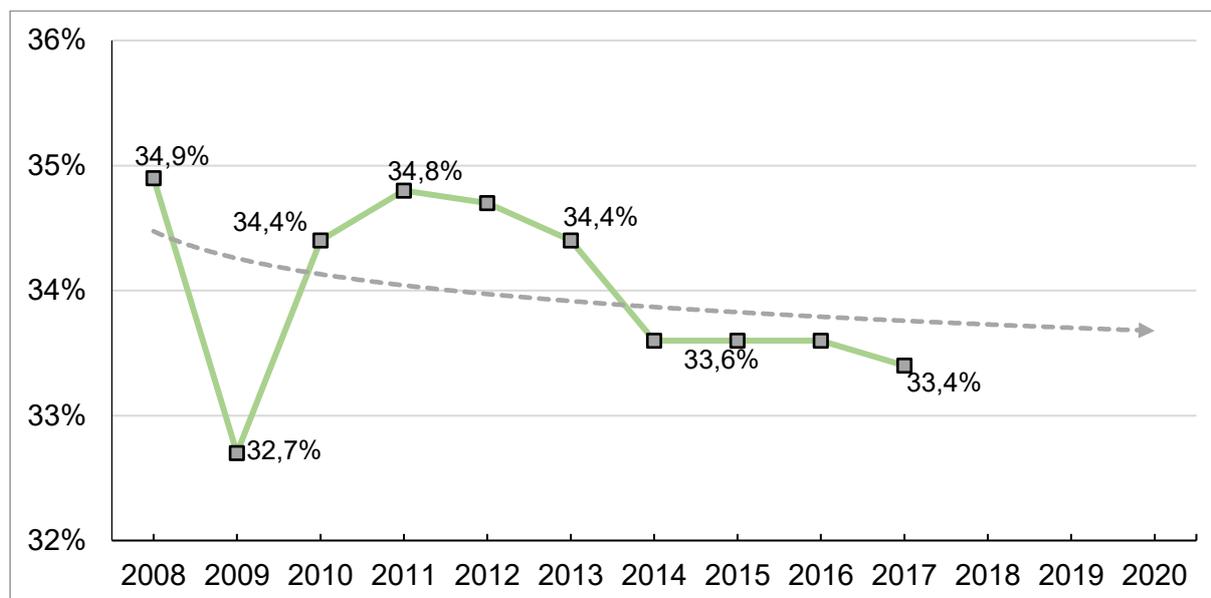


Abbildung 2: Recyclingraten von Kunststoffverpackungen 2008 bis 2017 in Österreich (Eurostat, 2020).

Weder das Sortieren von gemischtem Siedlungsabfall und ähnlichen Gewerbeabfällen noch ein großer Einsatz von rohstofflichem Recycling sind zurzeit in Österreich gegenwärtig. Dies ist ein Umstand, der sich in den kommenden Jahren ändern muss, um den Sprung vom thermischen hin zum stofflichen Verwertungsland zu schaffen.

1.1 Problemstellung

Im Zuge des Projekts „ReWaste 4.0“ des Lehrstuhls für Abfallverwertungstechnik und Abfallwirtschaft (AVAW) der Montanuniversität Leoben und den beteiligten Projektpartnern aus Industrie und Forschung wurden im letzten Quartal des Jahres 2019 mehrere wissenschaftliche Versuche zu verschiedensten Themengebieten der Abfallwirtschaft durchgeführt. Einer dieser Versuche beschäftigte sich mit der Aufbereitung von gemischtem Rest- und Gewerbeabfall zur Schaffung einer Wertstofffraktion, welche primär aus gemischten Altkunststoffen besteht. Diese Mischkunststofffraktion soll den Anforderungen für ein rohstoffliches Recycling entsprechen.

In Verbindung der Anlagentests und der Beweggründe für eine Sortierung von Restmüll und Gewerbemüll soll diese Arbeit folgende Fragestellungen beantworten:

- Wie ist der derzeitige Stand der österreichischen Abfallwirtschaft bezüglich dieses Themas? Welche Anlagen sortieren bereits Altkunststoffe aus Rest- und Gewerbemüll?
- Für welche Verfahren des rohstofflichen Recyclings eignen sich die erzeugten 3D-Mischkunststofffraktionen?
- Welche Abnahmekapazitäten für Mischkunststoffe bestehen in Österreich?

- Wie eignen sich die Anlagen für die Erzeugung einer 3D-Mischkunststofffraktion aus Rest- und Gewerbemüll? Können die Anforderungen für ein rohstoffliches Recycling erfüllt werden? Wie beeinflusst die Vorsiebung die Ergebnisse?
- Wie hoch ist der Altkunststoffanteil für die restlichen Outputströme (2D und FG)? Wie können diese aussortiert oder verwertet werden?
- Welche Untersuchungen sollten, ausgehend von den Ergebnissen dieser Arbeit, zukünftig durchgeführt werden?

1.2 Zielsetzung

Ziel dieser Arbeit ist es, die aufgeworfenen Fragen aus der Problemstellung zu beantworten und die Ergebnisse der Anlagenversuche des Projekts zu präsentieren und deren Aussagen zu interpretieren.

Der Abschnitt „Theorieteil“ soll über das Inputmaterial Rest- und Gewerbemüll informieren: die abfallwirtschaftliche, sowie juristische Einteilung dieser Abfallströme, das Mengenaufkommen, sowie die problematischen Gegebenheiten dieser Abfälle in Bezug auf Zusammensetzung und die damit einhergehende schwierige Einschätzung des Wertstoffgehalts an Altkunststoffen.

Aufbauend auf erlangten Kenntnissen über Altkunststoffe im jeweiligen Inputmaterial soll folglich ein grundlegender Überblick über Kunststoffrecycling mit Schwerpunkt auf rohstoffliches Recycling von Altkunststoffen gegeben werden. Dazu gehört auch eine Auskunft über Eigenschaften der Kunststoffe, die eine stoffliche Verwertung (auch werkstoffliches Recycling) dieser erschweren können. Des Weiteren beschreibt diese Arbeit die gängigsten technischen Anlagen des rohstofflichen Recyclings von Altkunststoffen und die qualitativen Anforderungen für Mischkunststofffraktion als Input für diese Anlagen.

Das Wissen über Anforderungen an Mischkunststofffraktionen ist wichtig, um die Strategie über den Aufbereitungsablauf der untersuchten Anlage besser zu verstehen. Der theoretische Abschluss beinhaltet eine Schilderung von Funktion und Ziel der verwendeten Aufbereitungsaggregate der untersuchten Anlagen.

2 Theorieteil

2.1 Inputmaterial

Um das Ziel der Anlagenversuche zu verstehen und die Ergebnisse bewerten zu können, ist Grundwissen über die aufzubereitenden Abfallströme notwendig.

2.1.1 Einteilung

Beide untersuchten Inputmaterialien gehören der Abfallgruppe „Siedlungsabfälle und ähnliche Gewerbeabfälle“ mit der Schlüsselnummer (SN) 91101 an. Unter Siedlungsabfällen versteht das österreichische Abfallwirtschaftsgesetz:

„§ 2. Abs. 4. Im Sinne dieses Bundesgesetzes sind [...] 2. „Siedlungsabfälle“ Abfälle aus privaten Haushalten und andere Abfälle, die auf Grund ihrer Beschaffenheit oder Zusammensetzung den Abfällen aus privaten Haushalten ähnlich sind“ (BGBl. I Nr. 192/2002, 2020:7).

Zur Beschreibung der Abfallarten wird auf die Beschreibungen von Kranert (2017) verwiesen. Demnach ist Restmüll (1) und Gewerbemüll (2) folgendermaßen definiert:

1. Restmüll: *„Verbleibender Hausmüll nach der getrennten Erfassung der momentan verwertbaren Stoffströme. Abfall zur Beseitigung“* (Kranert, 2017:68),
2. Gewerbemüll: *„Gewerbeabfall sind die in Gewerbebetrieben anfallenden Abfälle, die getrennt vom Hausmüll gesammelt und gemeinsam mit dem Hausmüll der sonstigen Entsorgung zugeführt werden“* (Kranert, 2017:69)

Die angeführten Begriffsbezeichnungen werden in der gesamten Arbeit wie vorgestellt verwendet.

2.1.2 Aufkommen

Die Gesamtmengen an Rest- und Gewerbemüll können aus den Aufzeichnungen des Bundesabfallwirtschaftsplans 2020 (BAWP) entnommen werden. Im Jahr 2018 lag das Gesamtaufkommen bei 1.722.000 t (BMNT, 2020:25) an Rest- und Gewerbemüll. Das Aufkommen lag 2015 bei 1.431.600 t (BMNT, 2017:44). Ein jährlicher Anstieg des Aufkommens in der Größenordnung der Veränderung von 2015 auf 2017 ist konstant in den 10 Jahren vor 2017 zu verzeichnen. Eine Abschätzung des zukünftigen Aufkommens kann nicht gemacht werden, jedoch zeigt sich, dass das Aufkommen nicht proportional mit der Bevölkerungsentwicklung der Bundesrepublik gewachsen ist (BMNT, 2019:27-29).

Die Bundesabfallwirtschaftspläne können keine Auskunft darüber geben, wie die Anteile an Rest-, Geschäfts- und Gewerbemüll an der angefallenen Menge verteilt sind. Darüber hinaus ist auch wenig bekannt, zu welchen Teilen der Geschäftsmüll an der Gesamtmenge in der kommunalen Abfuhr der gemischten Siedlungsabfälle beiträgt (Brunner & Laner, 2008:6-7).

2.1.3 Zusammensetzung

Nach den angeführten Problemen bei der Bestimmung der genauen Anteile am Aufkommen der einzelnen Abfallströme zeigt sich auch bei Recherchen bezüglich ihrer Zusammensetzung, dass die Daten nicht vergleichbar sind. Je nach Ort (Stadt oder Land), Demografie und Jahreszeit variiert die Zusammensetzung der Abfälle (Kranert, 2017). Weitere Schwierigkeiten zur Bestimmung entstanden bei der Recherche durch eine nicht einheitliche Kategorisierung von Fraktionen bei Sortieranalysen. Je nach Quelle (vgl. Kapitel 2.1.3.1 und Kapitel 2.1.3.2) wurden unterschiedliche Fraktionen beispielsweise zu einer Sammelfraktion zusammengefasst oder nur die Altstofffraktionen sortiert.

2.1.3.1 Restmüll

In Tabelle 1 sind die Ergebnisse von drei verschiedenen Sortieranalysen gegenübergestellt. Die Anteile einer steiermärkischen Restmüllanalyse entstammt dem Bundesabfallwirtschaftsplan (Stand 2014) (BMNT, 2019), die Werte der Restmüllanalyse aus Oberösterreich entstammen der Restabfallanalyse OÖ 2018/2019 (Stand 2019) (Hietler, 2019) und der Restmüll aus Salzburg wurde aus Hietler & Pladerer (2019) (Stand 2019) entnommen. Die Fraktionen sind, bis auf Organik, dieselben, nach denen bei der Handsortierung (vgl. Kapitel 3.2.2) dieser Arbeit getrennt wurde.

Tabelle 1: M-% ausgewählter Fraktionen im Restmüll und Geschäftsmüll (BMNT 2019, Hietler 2019, Hietler & Pladerer 2019).

Fraktionen:	Restmüll Steiermark (2014)	Restmüll Oberösterreich (2019)	Restmüll Salzburg (2019)	MW	STABW
Organik	18%	32%	32%	27%	7%
PPK	14%	7%	7%	9%	3%
Kunststoffe	18%	10%	6%	11%	5%
Verbund	10%	5%	2%	6%	3%
Metalle	5%	3%	3%	4%	1%
Inert	11%	11%	13%	11%	1%
Rest (nicht identifizierbar)	9%	7%	7%	8%	1%
Holz	2%	1%	0%	1%	1%
Textilien	10%	5%	4%	6%	3%

Die unterschiedlichen Werte der Fraktionen, sowie die Standardabweichung verdeutlichen, wie schwer eine allgemeine Bestimmung an Wertstoffen für Restmüll ist. Um Ergebnisse der Untersuchungen zu bewerten, wurde sich auf die Mittelwerte (MW) und Standardabweichungen (STABW) der Fraktionen aus dieser Tabelle bezogen.

2.1.3.2 Gewerbemüll

Für eine Abschätzung der Zusammensetzung von Gewerbemüll ist die Datenlage noch geringer als für Restmüll. Die Zusammensetzungen variieren stark zwischen den unterschiedlichen Gewerbearten (Brunner & Laner, 2008). Es sind ökonomische Gegebenheiten, die bei der Zusammensetzung und Wertstoffgehalt von Gewerbemüll die treibenden Faktoren sind (Kranert, 2017:74). Dadurch können Wertstoffe nicht im Gewerbeabfall sein, obwohl die Gewerbetätigkeit die Erzeugung eines solchen Wertstoffes verursacht.

Bei den Untersuchungen von Brunner & Laner (2008) wurden Modellabfälle für österreichischen Gewerbemüll aus unterschiedlichen Gewerbearten erstellt. In Tabelle 2 wurden die Ergebnisse der Sortieranalysen für Gewerbemüll aus drei unterschiedlichen Gewerbearten angeführt. Das soll die Bedeutung der Herkunft des Gewerbemülls auf die Zusammensetzung verdeutlichen.

Modellabfall A repräsentiert die Werte von trockenem, heizwertreichem Gewerbeabfall. Branchen für diesen Gewerbeabfall wären Verlags- und Druckergewerbe, Einzelhandel für Printerzeugnisse (z.B. Bücher, Zeitungen, Magazine etc.), Automobilhandel und auch öffentliche Einrichtungen wie Krankenhäuser, Altenheime oder Schulen.

Modellabfall B ist feuchter, heizwertarmer Gewerbemüll. Anfallsorte können Tierhandlungen, Gartengewerbe, Gastgewerbe oder Sport- und Vereinsstätte sein (Brunner & Laner, 2008).

Modellabfall C ist Gewerbeabfall aus Splittinganlagen zur Herstellung von Ersatzbrennstoffen (EBS) (Brunner & Laner, 2008).

Tabelle 2: M-% ausgewählter Fraktionen von Gewerbeabfällen (Brunner & Laner, 2008).

Fraktionen:	A	B	C
Organik	8%	50%	9%
PPK	48%	18%	27%
Kunststoffe	10%	6%	20%
Verbund	5%	2%	1%
Metalle	5%	2%	4%
Inert	10%	8%	11%
Rest (nicht identifizierbar)	5%	5%	6%
Holz	7%	3%	11%
Textilien	1%	1%	4%

2.1.4 Altkunststoffe in Restmüll und Gewerbemüll

Kunststoffe werden nach physikalischen Eigenschaften in drei Gruppen unterteilt. Dazu zählen Duromere, Elastomere und Thermoplaste. Duromere und Elastomere sind für werkstoffliches

Recycling aufgrund ihrer vernetzten Molekülstruktur nicht geeignet. Sie verändern ihre chemische Struktur und bilden ein dreidimensionales Gitter aus, wenn sie erhitzt und geformt wurden. Danach lassen sie sich nicht wieder durch Erhitzen verformen (PlasticsEurope, 2019).

Zu den häufigsten Kunststoffen aus Siedlungsabfällen zählen Polyethylen Low Density (PE-LD), Polyethylen High Density (PE-HD), Polypropylen (PP), Polyvinylchlorid (PVC), Polyethylenterephthalat (PET), Polystyrol (PS) und Polyurethan (PU). Bis auf den letzten Kunststoff PU gehören alle zu den Thermoplasten (Kranert, 2017:266).

2.1.5 Aufbereitung von Restmüll und Gewerbemüll in Österreich

In Österreich wird ca. 69 % (BMNT, 2020:25) des angefallenen Rest- und Gewerbemülls ohne mechanischer Vorsortierung thermisch verwertet. Der restliche Anteil wird in einer von 14 mechanisch-biologischen Behandlungsanlagen aufbereitet (Stand: 2018) (BMNT, 2020:110). Bei der mechanischen Vorbehandlung in einer MBA wird der Abfallstrom in eine heizwertreiche-, eine heizwertarme- und eine Altstofffraktion getrennt. Die heizwertreiche Fraktion (69,1 %) wird anschließend thermisch verwertet. Die heizwertarme Fraktion (28,3 %) wird einer biologischen Behandlung unterzogen und 2,6 % an Altstoffen (hauptsächlich Eisen (Fe)- und Nichteisen (Ne)-Metalle) werden recycelt. Gemeinsam mit der Menge an Altstoffen aus der thermischen Verwertung (Fe- und NE-Metalle, die nach der Verbrennung aus der Asche aussortiert werden) kommt die österreichische Abfallwirtschaft auf 2,3 % an Altstoffen, die aus den gemischten Abfällen gewonnen werden können (Stand 2018) (BMNT, 2020). Darüber hinaus werden in der Reststoffaufbereitungsanlage (RABA) der Stadt Linz durchschnittlich 200.000 t/a Restmüll mechanisch aufbereitet (Linz AG, 2020). Auch in der RABA Linz werden nur Fe- und NE-Metalle aus den Altstoffen aussortiert. Der restliche Anteil an Altstoffen (u.a. Altkunststoffe) wird zu einer heizwertreichen Fraktion aussortiert und anschließend im Reststoffheizkraftwerk thermisch verwertet (Linz AG, 2020).

Zwischen-Fazit:

Zusammenfassend lässt sich für das Inputmaterial feststellen, dass die Zusammensetzungen für Restmüll wie auch für Gewerbemüll von mehreren Faktoren abhängen, aber ein wesentlicher Anteil an Altkunststoffen in den Abfallströmen besteht. Dieser Altkunststoffanteil ist im überwiegenden Anteil in Verbundwerkstücken enthalten. Ein Umstand, der bei einer energetischen Verwertung weniger problematisch ist, da bei der thermischen Verwertungsvariante andere Qualitätsfaktoren (Heizwert, Chlorgehalt, Korngrößenband, etc.) gelten und nicht die Stoffreinheit der aufbereiteten Fraktion. Welche Anforderungen an die Stoffreinheit für ein rohstoffliches Recycling gesetzt werden, wird im Folgekapitel erörtert.

2.2 Stoffliche Verwertung von Altkunststoffen

Beim Recycling allgemein unterscheidet man zwischen „Werkstofflicher Verwertung“ und „Rohstofflicher Verwertung“. Letztere wird auch als „Chemisches Recycling“ bezeichnet (Martens & Goldmann, 2016:271-272). Der technische Unterschied ist, dass beim rohstofflichen Recycling der jeweilige Kunststoff gezielt in seine molekularen Bestandteile (z.B. Makromoleküle) abgebaut wird, während die molekulare Struktur beim werkstofflichen Recycling erhalten bleibt (Martens & Goldmann, 2016:271-272).

Da im Zuge dieser Arbeit zwei Anlagen getestet wurden, die Zielfractionen aus Mischkunststoffen erzeugen, wird in diesem Kapitel das Hauptaugenmerk auf Verwertungsmöglichkeiten für Mischkunststoffe gelegt (vgl. Abbildung 3).

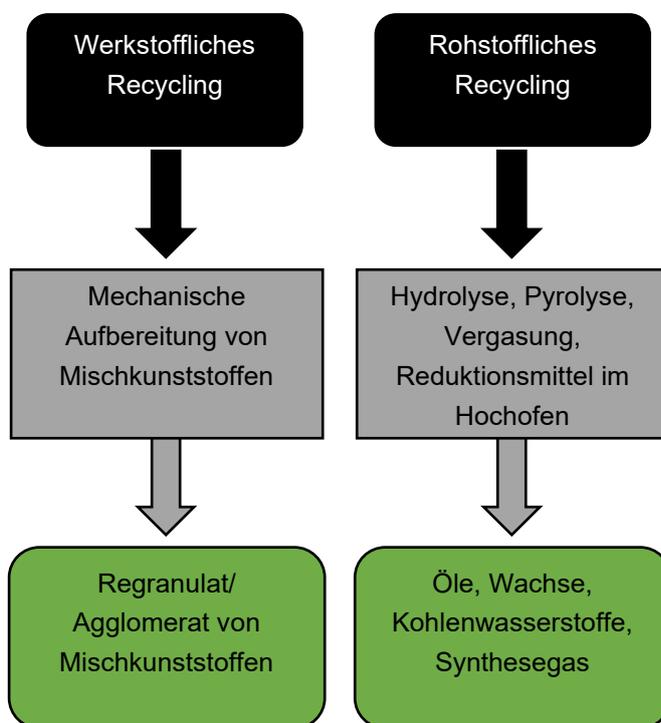


Abbildung 3: Recyclingoptionen für gemischte Altkunststoffe.

2.2.1 Herausforderungen der stofflichen Verwertung von Kunststoffen

Um den Fokus dieser Arbeit auf Mischkunststofffraktionen für ein rohstoffliches Recycling besser nachzuvollziehen, ist es nötig, allgemeine Herausforderungen des Kunststoffrecyclings zu kennen, um zu verstehen, warum rohstoffliches Recycling, zusätzlich zum werkstofflichen Recycling, durchgeführt werden sollte.

Die Herausforderungen für das Kunststoffrecycling (werkstofflich noch kritischer als rohstofflich) resultieren aus den stofflichen und physikalischen Eigenschaften der Kunststoffe und den gegenwärtigen technischen Möglichkeiten der Aufbereitung (Martens & Goldmann, 2016:272).

Eine dieser nachteiligen Eigenschaften ist der **oxidative Abbau** und die damit einher gehende Verschlechterung der mechanischen Eigenschaften. Bei der Verarbeitung (z.B. im Extruder) oder Lagerung unter Einwirkung von Wärme oder Ultraviolettstrahlung (UV-Strahlung) kommt es zu irreversiblen Abbau von Molekülketten. Das führt zur Verschlechterung der chemischen Eigenschaften im Recyclingwerkstoff und die Eignung für werkstoffliches Recycling sinkt oder ist nicht mehr gegeben – ein Umstand, der allerdings im rohstofflichen Recycling keine Rolle spielt, da bei rohstofflichem Recycling die Spaltung der Molekülketten beabsichtigt ist. (Martens & Goldmann, 2016:282)

Eine weitere Herausforderung ist die **eingeschränkte Verträglichkeit** der unterschiedlichen Kunststofftypen untereinander. Daraus resultiert die Schwierigkeit für eine Verarbeitung im Gemenge. Aus diesem Grund fallen die meisten Verfahren des werkstofflichen Recyclings für gemischte Altkunststoffe weg, da aus dem ohnehin schon inhomogenen Gemenge an Altkunststoffen in Rest- und Gewerbemüll gegenwärtig keine technische Möglichkeit besteht, eine entsprechende Sortenreinheit für Altkunststoffe unter ökonomisch vertretbaren Bedingungen zu gewährleisten (Martens & Goldmann, 2016:282). Die eingeschränkte Verträglichkeit muss für folgende Verfahren des rohstofflichen Recyclings berücksichtigt werden:

- Alkoholyse,
- Glykolyse und
- Thermische- oder Katalytische Spaltung.

Diese Verfahren werden beim rohstofflichen Recycling eingesetzt – für Reifractionen eines Altkunststoffes (z.B. Glykolyse von verunreinigten PET) oder für definierte Altkunststoffmischungen (z.B. katalytische Spaltung von Polyolefinen zu Kraftstoff) (Martens & Goldmann, 2016:308-312). Das ist ein Nachteil dieser Verfahren gegenüber Verfahren, bei denen die definierte Zusammensetzung der Mischkunststoffe keine Rolle spielt, da bei letzteren Verfahren der Sortieraufwand niedriger ist. Die Verfahren für nicht definierte Zusammensetzungen von Altkunststoff in gemischten Fraktionen werden in Kapitel 2.2.3 beschrieben.

Ein zusätzlich erschwerender Umstand ist der **Gehalt an Verunreinigungen und Zuschlagsstoffen** in Altkunststoffen. Damit gemeint sind Anhaftungen und in das Material diffundierte Stoffe, sowie Verstärkungsfasern (z.B. Glasfasern, Aramidfasern, etc) oder feinstverteilte Additive (z.B. Weichmacher, Farbstoffe, Füllstoffe, etc.). (Martens & Goldmann, 2016:283)

Bei der Aufbereitung selbst werden zusätzliche Herausforderungen durch die hohe Sortenvielfalt der Kunststofftypen (chemische Zusammensetzung) und Vielfalt an Produktarten (Form und Design z.B. Verbundwerkstoffe) verursacht. Die Folge ist ein hoher Aufbereitungsaufwand, um die schwierige Identifikation und Aussortierung der Altkunststoffe zu bewerkstelligen (Martens & Goldmann, 2016:283).

2.2.2 Werkstoffliches Recycling von Mischkunststoffen undefinierter Zusammensetzung

Obwohl, wie schon erwähnt, der Fokus dieser Arbeit auf rohstofflichem Recycling liegt, wird zur vollständigen Aufzählung der stofflichen Verwertungswege von Mischkunststofffraktionen auch die Möglichkeit zur werkstofflichen Verwertung (vgl. Abbildung 4) erwähnt. In herkömmlichen Recyclinganlagen für Kunststoffabfälle wird rund zwei Drittel der Kunststoffe vor dem Granulieren aussortiert (Martens & Goldmann, 2016:293). Diese Mischkunststoffe haben einen Störstoffanteil von durchschnittlich 10 % (Martens & Goldmann, 2016:293). Um die Störstoffe abzutrennen und die Mischkunststoffe einer Verwertung zuzuführen, können Aufbereitungsschritte, wie sie beispielsweise in Abbildung 4 angeführt sind, durchgeführt werden (Martens & Goldmann, 2016:293-294).

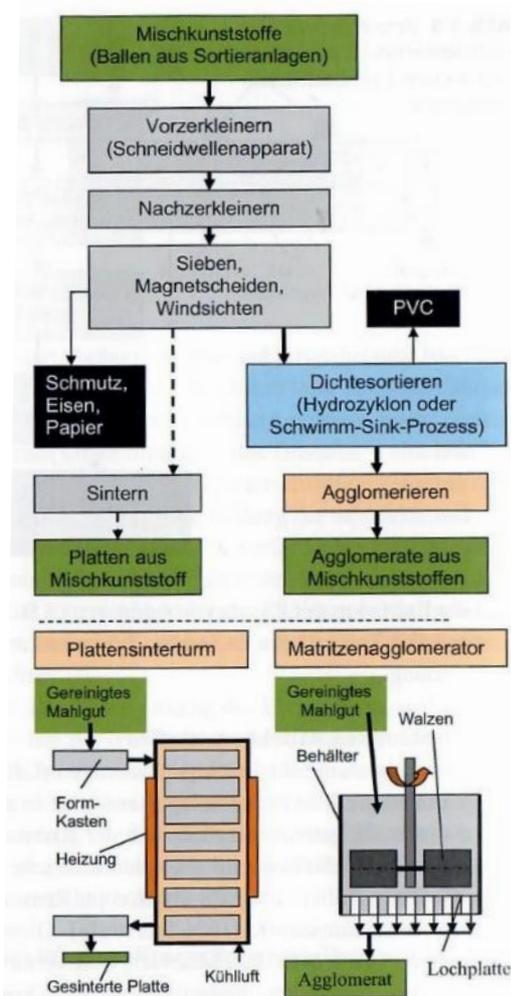


Abbildung 4: Beispielhaftes Verarbeitungsschema von Mischkunststoffen (Martens & Goldmann, 2016:294).

Mischkunststoffe (meist zu Ballen gepresst) werden in Schneidwellenaggregaten auf eine Korngröße von 50 mm vorzerkleinert und anschließend im zweiten Aufbereitungsschritt auf 10 mm nachzerkleinert. Danach wird das Feingut von Störstoffen im Trockenverfahren befreit. Je nach Störstoff folgen Siebung, Magnetabscheidung und Windsichtung um Fe, Papier und

Staub/Schmutz abzutrennen (Martens & Goldmann, 2016:293-294). Der nachfolgende Aufbereitungsweg wird durch die beabsichtigte Verwertungsvariante bestimmt. Bei einer Erzeugung von Sekundärwerkstoffen minderer Qualität (Down-Cycling) können die fein zerkleinerten Altkunststoffe in Formen gepresst und in Sintertürmen zu Platten gesintert werden. Diese Platten sind danach bearbeitbar (z.B. durch Sägen oder Bohren) und können als Trennwände oder Platten für Müllcontainer verwendet werden (Martens & Goldmann, 2016:293-294).

Der überwiegende Anteil der Mischkunststoffe wird allerdings nach den Trockenverfahren zu Agglomeraten für die thermische Verwertung verarbeitet (391.000 t im Jahr 2019) (BMNT, 2020:25). Dazu kann nach der trockenen Störstoffabtrennung noch eine nasse Dichtesortierung wie in Abbildung 4, oder auch trockene sensorgestützte Sortierung durchgeführt werden, um das PVC abzutrennen. Der Einsatz für eine thermische Verwertung erfordert aus anlagentechnischen Gründen (korrosive Effekte von Chlor in thermischen Prozessanlagen) einen niedrigen Chlorgehalt im Inputmaterial. (Martens & Goldmann, 2016:293-294).

2.2.3 Rohstoffliches Recycling von Mischkunststoffen undefinierter Zusammensetzung

Die unvorteilhaften Eigenschaften von Kunststoffen für das Recycling (vgl. Kapitel 2.2.1) können zum Großteil durch rohstoffliches Recycling vernachlässigt werden. Der entscheidende Vorteil dabei ist gute Reinigungsmöglichkeit der entstehenden Reaktionsprodukte (Gase, Öle, etc.). Das lässt hohe Qualitäten der Produkte zu. (Martens & Goldmann, 2016:308-309)

Zu den Verfahren des rohstofflichen Recyclings von undefinierten Mischkunststoffzusammensetzungen zählen:

- Hydrierung,
- Pyrolyse,
- Vergasung und
- Einsatz als Ersatzreduktionsmittel im Hochofenprozess.

Für diese Verfahren bestehen unterschiedliche Anforderungen bezüglich der Verwertung der Mischkunststoffe. Um in allen vier Verfahren behandelt zu werden, sollten Mischkunststoffe am besten so wenig PVC wie möglich und auch nicht mehr als 10 % Störstoffanteil aufweisen. (Martens & Goldmann, 2016:313-323)

Nachteil dieser Verfahren des rohstofflichen Recyclings ist allerdings, dass die Prozesse nur ökonomisch betrieben werden können, wenn sie als Massenproduktion betrieben werden, da es Verfahren sind mit sehr hohem Energiebedarf (Lechleitner, et al., 2020). Die Verwendung als Reduktionsmittel (Kunststoff als direkter Reaktand) im Hochofen kann unter Einsatz vergleichsweise geringer Mengen ökonomisch sein, da Altkunststoff bei geringeren Mengen durch konventionelle Reduktionsmittel (Koks) ersetzt werden kann, ohne die Erreichung der

Qualitätsanforderungen des Produktes (Roheisen) zu gefährden (Martens & Goldmann, 2016:308-309). In Österreich wurden 2018 laut Statusbericht der österreichischen Abfallwirtschaft rund 800 t an Altkunststoffen rohstofflich recycelt (BMNT, 2020:132). Dabei ist darauf hinzuweisen, dass der österreichische Gesetzgeber den Einsatz als Ersatzreduktionsmittel im Hochofenprozess momentan nicht als rohstoffliches Recycling anerkennt. Laut Altlastensanierungsgesetz:

„§ 3. Abs. 1. Dem Altlastenbeitrag unterliegen [...] 3a. das Einbringen von Abfällen, ausgenommen hüttenspezifische Abfälle, in einen Hochofen zur Herstellung von Roheisen oder das Verwenden von Abfällen zur Herstellung von Produkten für das Einbringen in einen Hochofen zur Herstellung von Roheisen, ausgenommen hüttenspezifische Abfälle“
(BGBl. Nr. 299/1989, 2020:4)

Aus diesem Grund findet man in den Abfallwirtschaftsplänen keine Erwähnung des Einsatzes von Altkunststoffen in Hochöfen, obwohl im Bericht des Umweltbundesamtes über Kunststoffabfälle in Österreich der Einsatz als stoffliche Verwertung angegeben wird (UBA, 2017:74).

Im Jahr 2015 wurden laut Bericht des Umweltbundesamtes insgesamt 9.037 t an österreichischem Kunststoffabfall in der Stahlindustrie als Ersatzreduktionsmittel eingesetzt, was 4 % der Gesamtmenge des stofflich verwerteten Kunststoffes, und knapp 1 % der gesamten Anfallmenge von Kunststoffabfall für 2015, ausmachte. Die Daten basieren auf dem elektronischen Datenmanagement des damaligen Bundesministeriums für Verkehr, Innovation und Technologie. (UBA, 2017:71-74)

2.2.3.1 Ersatzreduktionsmittel im Hochofen

Aufgabe eines Hochofens ist die Reduktion von meist oxidischen Erzen wie Magnetit (Fe_3O_4) oder Hämatit (Fe_2O_3). In mehreren Reduktionsschritten wird das Erz bis zu FeO (Wüstit) und schließlich zu Roheisen (Fe) reduziert. Als Reduktionsmittel wird Kohlenmonoxid (CO) und Wasserstoff (H) verwendet. Das Kohlenmonoxid entsteht durch Reaktion des eingebrachten Heißwinds mit Koks oder eingedüster Ersatzreduktionsmittel (Martens & Goldmann, 2016:319-322). Als Ersatzreduktionsmittel werden Schweröl, Kohlenstaub oder Altkunststoffe, wie in Abbildung 5 ersichtlich, eingesetzt. Im Vergleich der Ersatzreduktionsmittel ist festzustellen, dass Kunststoffe einen hohen Anteil an Chlor (Eintrag durch PVC) aufweisen, aber dafür einen vorteilhaft niedrigen Schwefelgehalt besitzen. Im Falle des Chlors ist eine Vorbehandlung zur Abtrennung auch beim Einsatz im Hochofen notwendig, um Heißwindkorrosion durch Kondensation von Chlorgas in der Abgasanlage zu verhindern. (Martens & Goldmann, 2016:319-322)

Eine weitere Herausforderung ist die Anforderung an das Schüttgutverhalten beim Eintrag in den Hochofen. Da die Kunststoffe wesentlich schneller zu Reaktionsgas umgesetzt werden als Koks, kann es zu einer ungleichmäßigen Durchströmung (zu wenig in der Mitte des Hochofens) von Kohlenmonoxid in der Reduktionszone kommen. Um das zu verhindern, wird

der Kunststoff beispielsweise in einem Topf- oder Trommelagglomerator stückig gemacht. Die entstehenden Korngrößen liegen zwischen 1 mm bis 10 mm und sind vom Durchmesser des Hochofens abhängig. (Martens & Goldmann, 2016:319-322)

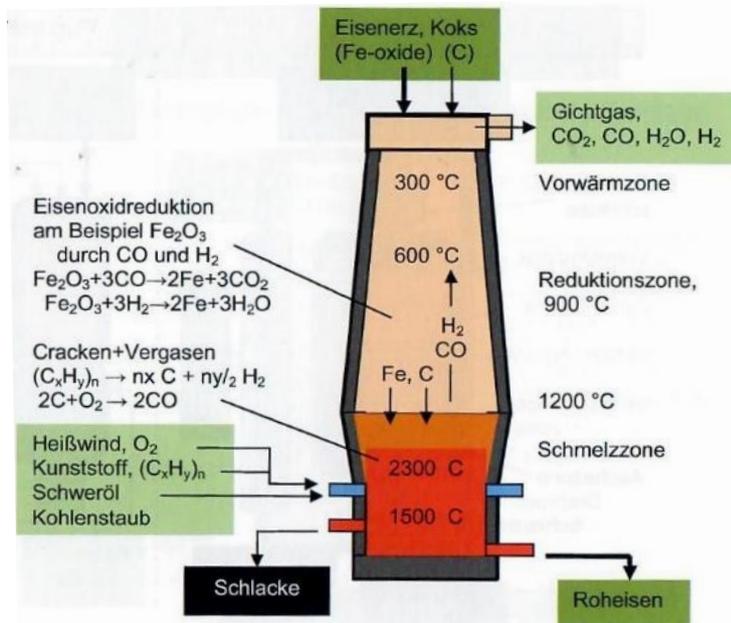


Abbildung 5: Verfahrenstechnik im Hochofen (Martens & Goldmann, 2016:320).

Metallurgen konnten nachweisen, dass über 50 % des Stoffanteils der eingebrachten Altkunststoffe zu Reaktionsgas umgewandelt werden oder zur Aufkohlung des Roheisens (Kohlenstoffanteil in der gewonnen Eisenschmelze) beitragen. Zusätzlich sind manche Kunststoffe als Ersatz für Schlackenbildner geeignet. Ungefähr 30 % des Kunststoffs wird energetisch verwertet, der Rest ist auf Verluste zurück zu führen. Die Herkunft der Kunststoffe und der Grad an realer Verschmutzung spielen dabei keine Rolle. Altkunststoffe aus verschiedenen Abfallarten (Gewerbemüll, aus MBA, Gelbe Tonne) haben sich im Einsatz bewährt (Martens & Goldmann, 2016:319-322). Der österreichische Stahlkonzern voestalpine AG besitzt die weltweit größte Anlage für die Beschickung eines Hochofens mit Altkunststoffen. Seit 2007 können laut Presseberichten bis zu 200.000 t Altkunststoffe pro Jahr (in Form von Pellets, Agglomeraten oder Granulat) in den Hochofen eingebracht werden (Voestalpine, 2020).

Zwischen-Fazit:

Aus den Quellen bezüglich der Inputmaterialien ist ersichtlich, dass eine schwankende Verteilung der Kunststofftypen in den ausgebrachten Mischkunststofffraktionen zu erwarten ist. Aus diesem Grund sind herkömmliche Verfahren des werkstofflichen Verwertens auszuschließen, da die erwarteten Reinheiten an Inputfraktionen für diese Prozesse gegenwärtig nicht ökonomisch zu erzielen sind und technisch sehr aufwendig wären. Die Fraktionen benötigen für werkstoffliches Recycling eine hohe Sortenreinheit von mindestens 96 % (Friedrich, et al., 2019). Die einzige Möglichkeit der werkstofflichen Verwertung von Mischkunststoffen wäre eine Aufbereitung zu Werkstücken minderer Qualität (vgl. Kapitel 2.2.2). Zu den Verfahren rohstofflichen Recyclings von sehr heterogenen gemischten Altkunststoffen zählen zurzeit:

- Hydrierung,
- Pyrolyse,
- Vergasung und
- Einsatz als Ersatzreduktionsmittel im Hochofen.

Die Zusammensetzung der gemischten Kunststofffraktion ist für diese Verfahren kein Qualitätskriterium. Einzig der Gehalt an PVC ist wegen des unerwünschten Chlorgehalts und den damit einhergehenden korrosiven Effekten bei den Verfahren so niedrig wie möglich zu halten. Ein Störstoffanteil (z.B. Metall, Textilien, Papier, etc.) von maximal 10 % soll ebenfalls nicht überschritten werden (vgl. Kapitel 2.2.3).

Gegenwärtig ist die Verfügbarkeit von Anlagen dieser Verwertungsverfahren in Österreich, bis auf den Einsatz als Ersatzreduktionsmittel im Hochofen, nicht gegeben. Grund hierfür ist der aus Gründen der Wirtschaftlichkeit benötigte hohe Durchsatz der Anlagen zur Hydrierung, Pyrolyse und Vergasung.

Wie die Anlagen die Anforderungen an die Mischkunststofffraktion für einen Einsatz in einen der genannten rohstofflichen Verwertungsverfahren erreichen soll, wird im folgenden Kapitel erklärt.

2.3 Aufbereitungstechnik der Versuchsanlage

2.3.1 Zerkleinerung

Zweck der Zerkleinerung ist einerseits der Aufschluss von Werkstoffen in Materialverbunden (selektive Zerkleinerung) und andererseits die Schaffung einer geeigneten Korngröße für eine bessere Trenn- und Sortierleistung in den nachkommenden Aggregaten. Aufgrund der heterogenen Zusammensetzung von Rest- und Gewerbemüll ist ein geeignetes Zerkleinerungsaggregat nicht einfach zu bestimmen. Zähelastische Bestandteile (z.B. Gummi) werden unter anderen Beanspruchungen zerkleinert als Filmbänder oder Hartkunststoffe. Das kann zu selektiver Zerkleinerung führen und in Folge die weitere Aufbereitung negativ beeinflussen. (Martens & Goldmann, 2016:31-32)

2.3.2 Siebung

Aufgabe der Siebklassierung ist die Trennung von Komponenten im Aufgabestrom aufgrund geometrischer Abmessungen. Der Output (Überkorn und Unterkorn) soll dadurch für die nachfolgende Aufbereitung (z.B. ballistische Separation wie in den getesteten Anlagen) konditioniert und eine Anreicherung von Stoffgruppen in den getrennten Strömen erreicht werden. Zusätzlich wird durch Siebung die Feinfraktion abgetrennt, die bei optischer Sortierung zu Verschlechterung der Trennleistung führen kann. (Martens & Goldmann, 2016:41-42; Kranert, 2017:209-211)

2.3.3 Ballistische Separation

Das Ziel eines Ballistikseparators ist die Trennung des Aufgabeguts in eine schwere, rollende Fraktion (3D), eine Feingutfraktion (FG_B), die von der Perforation der Paddels abhängig ist und einer leichteren, flächigen Fraktion (2D), die von den schwingenden Paddels nach oben hin ausgetragen wird (Martens & Goldmann, 2016:56-57). Ballistikseparatoren werden zur Vorkonditionierung (Abtrennung von 2D-Material und Staub) vom Material vor einer optischen Sortierung eingesetzt (Kranert, 2017:237-238).

Beim verwendeten Modell für diese Versuche wurde ein Ballistikseparator mit einstellbarer Neigung der Paddelfläche eingesetzt. Diese Modifikation kann die Reinheiten der 3D- bzw. 2D-Fraktion beeinflussen. Je steiler die Neigung, desto weniger rollendes Material wird in die 2D-Fraktion ausgetragen.

2.3.4 Sensorgestützte Sortierung (Nahinfrarot Technologie)

Die sensorgestützte Sortierung trennt Material nach verschiedenen Merkmalen wie Form, Farbe, Glanz oder Materialzusammensetzung. Seit den 1990er Jahren findet diese Technologie auch verstärkten Einsatz in der Abfallwirtschaft (Kranert, 2017:241).

Kernelemente sind u.a. Förderbänder (Vereinzelungsband und Beschleunigungsband) für die Zuführung des Trennguts, Bestrahlungsquelle (Emitter) und Sensor (Detektor) zur Erkennung

der Trennmerkmale und eine Auswerteeinheit, um die automatisierte Auswurfmechanik (z.B. Düsenleiste) zu aktivieren (Kranert, 2017:240-247).

Die sensorgestützte Sortierung mittels NIR-Technologie basiert auf einer Spektralanalyse des Trennguts im Nahinfrarotbereich (von 770 nm bis 2000 nm) (Kranert, 2017:244). Dazu wird das Material mittels Lichtquelle im eingestellten Wellenlängenbereich bestrahlt. Dabei werden die Atome und Moleküle zu Schwingungen angeregt. Je nach Stoff- und Bindungsart werden unterschiedliche Schwingungen (Valenzschwingungen, Deformationsschwingungen, etc.) erzeugt. Je nach Schwingung werden unterschiedliche Energiegehalte der Strahlung absorbiert. Die im Frequenzbereich auftretenden Absorptionsintensitäten ergeben das stoffspezifische Spektralmuster (Ritgen, 2020:233-240). Anhand dieser Muster können Sensor und Auswerteeinheit ermitteln, ob es sich um einen Wertstoff handelt oder nicht. Dazu müssen im Vorhinein Referenzspektren der Wertstoffe der Auswerteeinheit angelernt werden. Stimmen die Spektralmuster der Analyse mit den Referenzspektren überein, wird das Material als Wertstoff erkannt und kann mittels Druckluft ausgestoßen werden. Bei dieser Vorgehensweise handelt es sich um eine Positivsortierung (Wertstoffe werden ausgeschleust). Bei einer Negativsortierung werden die nicht-Wertstoffe ausgeschleust. Meist verwendet man die Druckluft sparende Variante (Kranert, 2017:242-243).

Voraussetzungen an eine Vorkonditionierung sind beispielweise eine Abtrennung von 2D-Materialien. Stoffe dieser geometrischen Struktur neigen dazu, andere Partikel zu überdecken und somit ihre Erkennung zu verhindern. Sie führen auf Grund ihres geringen Gewichts auch Relativbewegungen am Beschleunigungsband aus, was zu abweichenden Zeitabständen zwischen Erkennung und Druckluftstoß führt und somit zu einem nicht-Austrag. Auch bei Erfassung durch die Druckluft kann das Flugverhalten von 2D-Partikel dazu führen, den Austragsbereich nicht zu erreichen. Ebenfalls kann Staubentwicklung den Trennerfolg beeinträchtigen. Durch Druckluftstöße kann Staub aufgewirbelt werden und an der Oberfläche anderer Partikel anhaften. Das erschwert folglich die korrekte Erkennung durch die Messeinheit (Kranert, 2017:240-247).

Je nach Abfallgemisch sind für die NIR-Sortierung Ergebnisse für Wertstoffausbringen zwischen 80 % und 90 % mit einer Reinheit von 90 % bis 97 % üblich (Kranert, 2017:244).

Zwischen-Fazit:

Um das Ziel, eine qualitative Mischkunststofffraktion zu erzeugen, bewerkstelligen zu können, muss zuerst der gesamte Massenstrom konditioniert werden, um die Effizienz der folgenden Aggregate nicht zu mindern und der Kunststoff im Inputmaterial aufgeschlossen werden.

Die Aufgabe der Siebung ist auf der einen Seite die Abtrennung von zu feinen Partikeln, die bei der Sortierung in der NIR-Anlage zu Falscherkennung führen können, und auf der anderen Seite den Eintrag von Feinanteilen in der 2D-Fraktion zu minimieren. Der niedrige Anteil von Feingut in der 2D-Fraktion könnte für eine weitere Aufbereitung vorteilhaft sein, da die

Aufbereitungswege von Feingut und 2D unterschiedlich sein können (vgl. Kapitel 5.2) und die Anteile von Wertstoffen in der 2D-Fraktion aufkonzentriert werden könnten.

Die ballistische Trennung soll die 2D-Materialien aus dem Massenstrom abtrennen. Diese haben nachteilige Eigenschaften, die bei einer sensorgestützten Sortierung zu Fehlern führen könnten (vgl. Kapitel 2.3.4).

Über die Aggregate für Aufbereitung hinaus wurde auch eine Bandwaage verwendet. Welche Maschinen bei den Versuchen benutzt wurden und welche Einstellungen getroffen wurden, wird in Kapitel 3, Methodik und Ablauf, erörtert.

3 Methodik und Ablauf

Die wissenschaftlichen Tätigkeiten zu dieser Arbeit können in drei Ebenen strukturiert werden: Anlagenversuche, Output-Analyse und Berechnung und Bewertung.

Zur Ebene **Anlagenversuche** gehört die Testung der zwei Anlagen zur Vorkonditionierung, die Beprobung und die Dokumentation aller Massenströme. Mit Anlagen ist die Anordnung (Anlage 1 oder Anlage 2) und Einstellungen der Aggregate gemeint, um das jeweilige Inputmaterial aufzubereiten. Wie die Aggregate der zwei Anlagen angeordnet wurden, ist in Abbildung 6 ersichtlich. Zu den verwendeten Aggregaten zählte ein Shredder (Terminator 5000SD F der Firma Komptech), eine Trommelsieb (Nemus 2700 der Firma Komptech), eine Bandwaage (EBW-A-1400 / 6200 der Firma Kukla) und ein Ballistikseparator (STT5000_6_1 der Firma Stadler). Die umfangreiche Beprobung benötigte unterschiedliche Probenbehältnisse und sorgfältige Planung. Die Dokumentation war Teil der Grundlage für die Berechnungen und Interpretationen.

Mit **Output-Analyse** ist die Bewertung der Output-Ströme gemeint, die aus den Anlagenversuchen entstanden sind. Zu diesen Strömen zählen die 3D-, 2D- und Feingutfractionen aus dem Ballistikseparator (FG_B), sowie die Feingutfractionen aus dem Trommelsieb (FG_S) aus den Versuchen mit Siebmaschine. Die FG-Fractionen wurden einer Siebanalyse unterzogen und die Zusammensetzungen der 2D-Fractionen wurden per Handsortierung ermittelt. Die sensorgestützte Sortierung der 3D-Fraktion ist streng genommen noch Teil der Anlagenbewertung. Da dieser Aufbereitungsschritt zeitlich wie örtlich getrennt von den Versuchen der Anlagen stattfand, und nicht der gesamte Massenstrom aus dem Ballistikseparator durch die sensorgestützte Sortierung lief, ist die NIR (Nahinfrarot-Spektroskopie)-Sortierung Teil der Output-Analyse. Zur Analyse wurde eine REDWAVE i2 - Sortiermaschine verwendet. Ergebnisse der Bewertung wurden ebenfalls dokumentiert und bilden mit den Daten der Anlagenversuche die Grundlage der dritten Ebene.

Die Ebene **Berechnung und Bewertung** beinhaltet die Sammlung, Aufarbeitung und Präsentation der Daten und Erkenntnisse der wissenschaftlichen Tätigkeiten zu dieser Arbeit. Es wurden die Massenbilanzen der Versuche, die Rückstandskurven der Siebanalysen, die Zusammensetzungen der 2D-Fractionen, die Trenneignung der 3D-Fraktion mittels sensorgestützter Sortierung und der Einfluss der Siebung ermittelt. Auf Basis dieser Berechnungen wurde die Eignung der Aggregate, sowie Verwertungsmöglichkeiten der geschaffenen Output-Ströme bewertet.

Eine grafische Übersicht der Ebenen und Tätigkeiten ist in Abbildung 6 ersichtlich. In der Grafik sind die einzelnen Ebenen in graue Blöcke unterteilt. Die schwarzen Pfeillinien zeigen die Massenströme der Versuche. Die bunten Pfeillinien illustrieren den Probenweg der Fraktionen. Die grünen strichlierten Pfeillinien sind Informationsflüsse. Damit gemeint sind die Daten der Analysen.

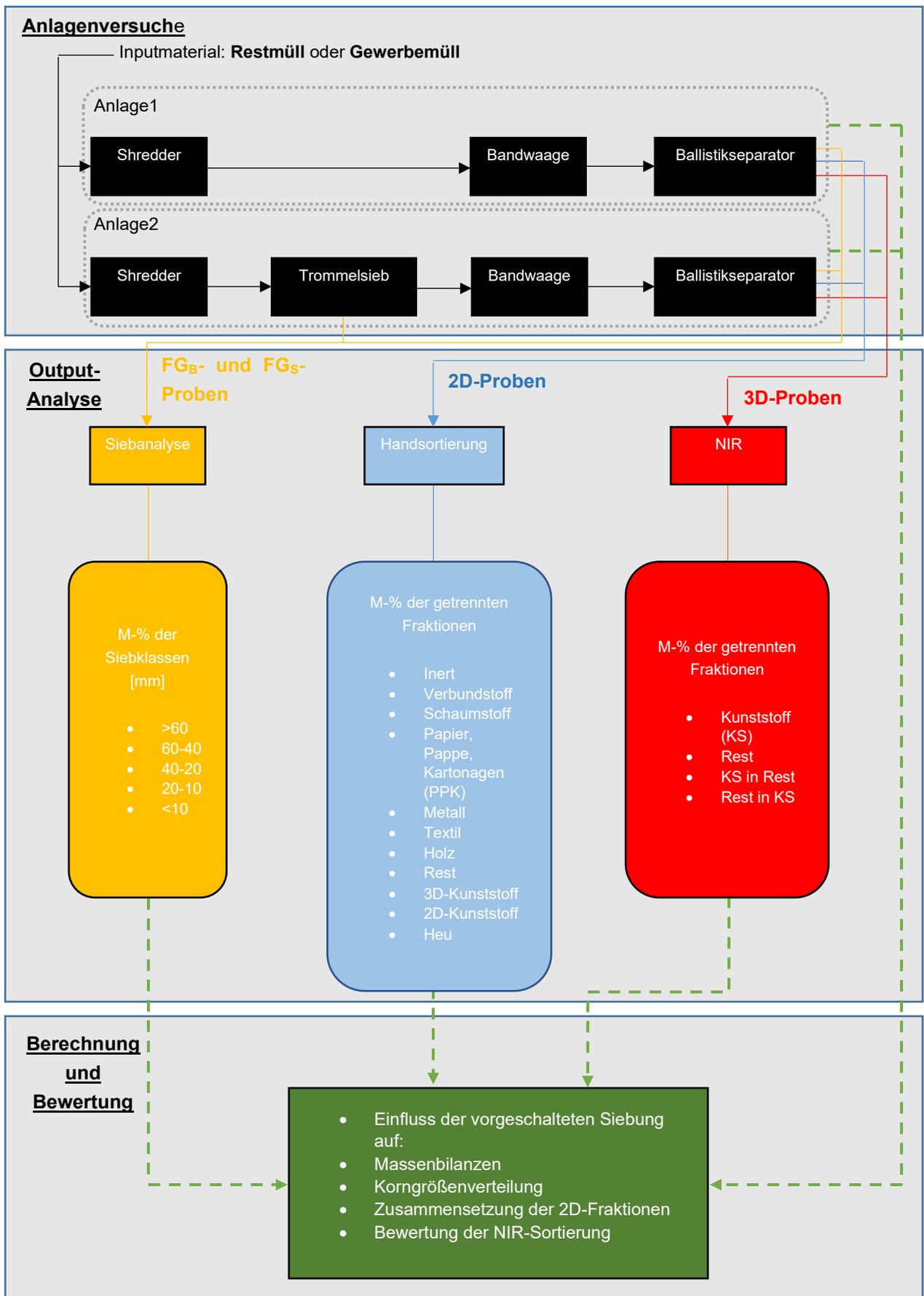


Abbildung 6: Ebenen-Struktur der wissenschaftlichen Arbeit.

3.1 Anlagenversuche

3.1.1 Vorversuchswoche, Massenstrommessung

In der Woche vom 21. bis 25. Oktober 2019 wurde die Zeit mit Vorbereitungen der Anlagenversuche genutzt. Es wurden die Anordnung der Aggregate getestet, sowie die Betriebseinstellungen des Shredders (Drehzahl der Welle und Schnittspaltbreite) und des Trommelsiebes (Drehzahl des Trommelsiebs und Austragsleistung des Förderbands vom Dosierbunker in das Sieb). Der Schnittspalt wurde so gewählt, um einen Korngrößenunterschied zwischen Grobgut und Feingut von einem Drittel bis Viertel sicherzustellen. Die gewählte Schnittspaltbreite erzeugte ca. 250-350 mm große Stücke, um sie bei der nachfolgenden Siebung im Trommelsieb (Siebschnitt 80 mm) effektiv vom Feingut trennen zu können. Das Trommelsieb wurde mit einem Füllgrad von 15 % (Feil et al., 2019) beschickt. Die aktive Siebfläche betrug 9 m² und die effektive Siebfläche betrug 30 m² (vgl. Siebtrommeldaten aus Anhang I – Technische Daten der Aggregate) für die Vorsiebung. Als Inputmaterial wurde Gewerbemüll verwendet, um Grundeinstellungen für die Anlagenversuche der Folgeweche zu ermitteln. In Tabelle 3 sind die Einstellungen an den Aggregaten aufgelistet. Manche Einstellungen wurden während der Versuche (Versuch 1 (V1); Versuch 2 (V2)) kurzfristig variiert, aber nach einigen Minuten wieder zurückgestellt. In Kapitel 3.1.3 ist genau beschrieben, welche und wie lange die Veränderungen der Einstellungen durchgeführt wurden. Bei der Anordnung der Bandwaage musste die gesamte Bandwaage erhöht werden, um die Übergabe des Materials in den Ballistikseparator zu gewährleisten. Der verwendete Ballistikseparator hatte eine Neigungswinkeleinstellung der Paddel von 7,5 ° bis 25 ° (Stadler, 2016). Der Neigungswinkel war bei allen Versuchen auf 12,5 ° eingestellt, um eine hohe Reinheit der 3D-Fraktion sicherzustellen. Die effektive Siebfläche war 8,8 m²

Tabelle 3: Maschineneinstellungen der verwendeten Aggregate.

Anlagenart/ Inputmaterial		Shredder		Siebmaschine		Ballistik- separator
		Wellen- drehzahl [Umin ⁻¹]	Schnittspalt- breite [cm]	Drehgeschw. Siebtrommel [Umin ⁻¹]	Austragsl. Dosierbunker [%]	Neigungs- winkel [°]
Anlage 1	Restmüll	9,6	4,5	-	-	12,5
	Gewerbe- müll	16	4,5	-	-	12,5
Anlage 2	Restmüll	9,6	4,5	11,5	100	12,5
	Gewerbe- müll	16	4,5	11,5	100	12,5

Mittels Bandwaage und dazugehörigem Messaggregat wurde der Massenstrom (t/h) der Versuche aufgezeichnet. Vor jedem Versuch wurde die Bandwaage kalibriert. Mittels eingebauter Prüfgewichtseinheit wurde die Kalibrierung durchgeführt und die Prüfgenaugkeit

getestet. Die Bandwaage war auf einen minimalen Sollwert von 5 % der Gewichtsmessung ausgelegt. Das Kalibrieren der Messeinheit für den Volumendurchsatz wurde ebenfalls automatisch vor jedem Versuch durchgeführt. Alle weiteren Daten zu den Aggregaten sind im „Anhang I – Technische Daten der Aggregate“ zu finden. Bilder zur Vorversuchswoche sind unter „Anlagenaufbau und Vorversuchswoche“ im „Anhang II – Fotodokumentation“ ersichtlich.

3.1.2 Versuchsmaterial

Das Inputmaterial Rest- und Gewerbemüll wurde direkt vom Projektpartner Saubermacher Dienstleistungs AG gesammelt und für die Versuche zum Versuchsgelände transportiert. Am Versuchsgelände wurden die Inputmaterialien in überdachten Kompartimenten abgeladen und bis zu den Versuchen zwischengelagert. In Abbildung 7 links ist das Inputmaterial Restmüll und rechts das Inputmaterial Gewerbemüll zu sehen.



Abbildung 7: Inputmaterial Restmüll (links) und Gewerbemüll (rechts).

Aus optischer Begutachtung war festzustellen, dass die Größe der Objekte im Restmüll gleichmäßiger verteilt war. Darüber hinaus dampfte der Restmüll bei der Anlieferung im Gegensatz zum Gewerbemüll, was einen wesentlichen Anteil an Organik im Material vermuten ließ. Die Objekte im Gewerbemüll waren in ihren Dimensionen stark unterschiedlich. Die kleineren Objekte waren z.B. abgerissene Textilien oder Klebebänder, während größere Objekte, wie z.B. Matratzen, Kanister, etc., auch im Inputmaterial zu finden waren (vgl. Abbildung 7 rechts).

3.1.3 Probenahme

Alle Proben wurden aus dem fallenden Strom in Anlehnung an die ÖNORM S 2123-3 gezogen. Für die Probenahmen kamen verschiedene Behältnisse zum Einsatz. Für die Proben der 2D- und der 3D-Fraktion wurden jeweils zwei Kunststoffboxen verwendet, um den Austragsbereich vollständig beproben zu können. Das Füllvolumen dieser Boxen betrug jeweils 600 Liter (l). Für die FG_B -Proben wurden zusätzlich auch Kunststoffwannen (vgl. Abbildung 9; bei Versuchen von Anlage 2) in zwei Größen verwendet – eine kleine mit Füllvolumen von 60 l und eine große Wanne mit 90 l. Die FG_S -Proben wurden in einem Big Bag mit Füllvolumen von 1000 l genommen. Zur Vorbereitung wurden die Behältnisse gesäubert und im Nahbereich der Probeentnahmestelle positioniert. Die kurzen Wege sollten eine schnelle, reproduzierbare und gleichzeitig ablaufende Probenahme gewährleisten.

Die 2D- bzw. 3D-Proben wurden mithilfe der Gabelstapler im jeweiligen Austragsbereich (Kompartiment) aus dem fallenden Gutstrom des Ballistikseparators entnommen (vgl. Abbildung 8).



Abbildung 8: Probenahme der Outputfraktionen a) 2D, b) 3D, c) FG_B und d) FG_S .

Vor einer Probenahme von 2D, 3D und FG_B leerte der Radlader-Fahrer das Kompartiment, damit der Gabelstapler ungehindert in das Kompartiment einfahren konnte. Auf dem Gabelstapler wurden zwei Boxen (für 3D und 2D) positioniert und in die Entnahmestelle (Abwurfbereich) eingebracht. Für FG_B wurde eine Box verwendet, die für einen Zeitraum von wenigen Sekunden in das Kompartiment befördert wurde. Es wurden pro Versuch drei Proben unter der Siebfläche verteilt (links, mittig, rechts) gezogen, um repräsentative Proben des gesamten Siebbereichs des Ballistikseparators zu erhalten. Alternativ wurden die FG_B -Proben ohne Gabelstapler gezogen, indem drei Kunststoffwannen für einen Zeitraum von 3 bis 5 Minuten ins Feingut-Kompartiment gestellt wurden (vgl. Abbildung 9). Nach jeder Probenahme stellte der Gabelstaplerfahrer die Proben beiseite und nahm, für die nächste Probenahme, zwei leere Boxen auf.



Abbildung 9: Probenahme von FG_B bei den Versuchen zu Anlage 2.

Die FG_S-Proben der Anlage 2 wurden direkt am Austrag des Unterkorns der Siebmaschine aus dem fallenden Gutstrom entnommen (vgl. Abbildung 8.d). Dazu wurde ein Big Bag an den Gabeln des Staplers befestigt. Nachdem der Radlader das Unterkorn vor dem Austragsband wegtransportiert hatte, fuhr der Gabelstaplerfahrer mit leicht zum Austrag geneigtem Gabelpaar hin und nahm Unterkorn für ein paar Sekunden in den befestigten Big Bag auf. Danach fuhr er einige Meter zurück, um den vollen Big Bag auf die Seite zu stellen und einen neuen leeren wieder am Gabelpaar zu befestigen.

Vor jedem Versuch wurden die Behälter gesäubert, um Kontaminationen auszuschließen. Ungefähr 15 Minuten nach Versuchsstart wurde begonnen, die ersten Proben zu ziehen. Danach wurde in Intervallen von 15 bis 20 Minuten so lange beprobt, bis alle Probenbehälter befüllt waren. Die Anzahl der gezogenen Proben ist in Tabelle 4 ersichtlich. Die Dauer der einzelnen Versuche ist in Tabelle 5 ersichtlich. Nach einem Versuch wurden die gezogenen Proben mittels Umfüllrutsche in Big Bags umgefüllt und zum Probenlager (Halle am Testgelände) transportiert. Dort wurden die Big Bags verwogen und die Daten (vgl. Tabelle 4) dokumentiert.

Tabelle 4: Gezogene Probenanzahl und Gewicht der Anlagenversuche.

Anlage/ Inputmaterial/ Versuch			Proben-anzahl	FG _B [kg]	Proben-anzahl	3D [kg]	Proben-anzahl	2D [kg]	Proben-anzahl	FG _S [kg]
Anlage 1	Restmüll	V1	3	87,4	4	340,8	6	662,6	0	-
		V2	3	103,9	4	431,5	6	598,3	0	-
	Gewerbemüll	V1	3	33,1	3	264,8	6	357,3	0	-
		V2	3	36,4	4	239,4	6	468,4	0	-
Anlage 2	Restmüll	V1	6	44,0	4	231,5	6	492,7	3	107,7
		V2	6	44,1	4	332,0	6	476,7	3	78,7
	Gewerbemüll	V1	6	27,0	4	265,3	6	353,6	3	99,0
		V2	6	23,0	4	267,0	6	280,2	3	62,5

Die Massen der gezogenen Proben wurden zur Berechnung der Massenbilanzen zu den Massendaten des Radlader-Fahrers hinzugerechnet.

3.1.4 Versuchswoche

In Tabelle 5 sind der Versuchsablauf und die dazugehörigen Informationen eingetragen. Zu sehen ist das Datum der Versuche, Art der Anlage, Inputmaterial Restmüll (RM) oder Gewerbemüll (GM), sowie Inputmasse und Versuchsdauer. Die Anmerkungen beinhalten Veränderungen an den Einstellungen der Anlagen oder ähnliches.

Tabelle 5: Tabellarische Darstellung der Versuchswoche.

Datum	Anlage	Versuch	Input [t]	Versuchsdauer [min]	Anmerkungen
04.Nov	1	GM V1	9,6	54	keine Anmerkungen
04.Nov	1	GM V2	9,8	47	Kurzzeitige Ausfälle des Displays an der Bandwaage.
05.Nov	2	RM V1	14	47	Nach sieben Minuten wurde die Wellendrehzahl des Shredders auf $9,6 \text{ Umin}^{-1}$ zurückgesetzt, weil sich das zerkleinerte Material im Dosierbunker des Trommelsiebes staute. Zusätzlich wurde auch die Austragsleistung des Dosierbunkers von 70 % auf 100 % erhöht. Die Drehzahl des Trommelsiebs wurde auf $11,5 \text{ Umin}^{-1}$ eingestellt und während des Versuchs beibehalten.
06.Nov	2	GM V1	11,7	58	keine Anmerkungen
06.Nov	2	GM V2	9,5	49	keine Anmerkungen
07.Nov	2	RM V2	18,11	59	Nach zwei Minuten wurde die Drehzahl des Shredders auf $12,8 \text{ Umin}^{-1}$ erhöht. Nach weiteren vier Minuten fing das Material im Dosierbunker an, sich zu stauen. Die Wellendrehzahl des Shredders wurde daraufhin wieder auf $9,6 \text{ Umin}^{-1}$ zurückgestellt.
07.Nov	1	RM V1	21,28	59	Kurzzeitige Ausfälle des Displays an der Bandwaage. Wellendrehzahl des Shredders für drei Minuten von $9,6 \text{ Umin}^{-1}$ auf 16 Umin^{-1} erhöht, jedoch wieder auf $9,6 \text{ Umin}^{-1}$ zurückgestellt.
08.Nov	1	RM V2	14,8	42	keine Anmerkungen

3.2 Output-Analyse

Es konnten geringe Massenverluste der jeweiligen Proben durch Trocknung während der Lagerung vor der Analysearbeit bemerkt werden, was jedoch keinen Einfluss auf die Analysen hatte, da die Basis für die Analysen das Probengewicht zum Zeitpunkt der Analysen war.

Die Lagerdauer zwischen den Zeitpunkten der Wiegungen – nach den Versuchen und vor der Analysearbeit – war für die FG- und 2D-Proben mindestens drei Tage bis zwei Wochen, je nachdem, wann die Probe einer Handsortierung unterzogen wurde. Die Lagerungsdauer der 3D-Proben lag bei ungefähr 4 Wochen.

3.2.1 Siebanalyse der Feingutfraktion und Siebwirkungsgrad

Nach den Anlagenversuchen wurden alle FG-Proben vier bis acht Tage in der Halle am Testgelände der Firma Mayer Recycling GmbH gelagert. Die FG_B - und FG_S -Fraktionen wurden Siebanalysen in der Trommelsiebmaschine (vgl. Anhang II; Abbildung 58) des Instituts für Abfallverwertungstechnik und Abfallwirtschaft unterzogen. Diese Analysen fanden im Zeitraum zwischen dem 12. und 18. November statt. Die Proben wurden im Trommelsieb für ein Zeitintervall von je 120 Sekunden gesiebt. Der im Sieb verbliebene Rückstand wurde verwogen. Nach Entnahme des Siebdurchgangs und Säuberung der Auffangwanne wurden die Siebplatten gewechselt und der Siebversuch mit einer geringeren Maschenbreite, mit dem Unterkorn der vorherigen Siebung, erneut durchgeführt. Jede Probe wurde mit den Siebschnitten 60 mm, 40 mm, 20 mm und 10 mm analysiert. Rechnerisch wurden danach die Korngrößenverteilungen ermittelt.

Die Siebwirkungsgrade des Trommelsiebs wurden nach Formel 1, die Siebwirkungsgrade des Ballistikseparators nach Formel 2 und die Gesamtsiebwirkungsgrade nach Formel 3 berechnet. FG_{2D} ist das verbleibende Feingut (Rest <80 mm; vgl. Tabelle 6) in der 2D-Fraktion.

$$\eta_S = \frac{FG_S}{FG_S + FG_B + FG_{2D} + FG_{3D}} * 100 \text{ [%]} \quad (1)$$

$$\eta_B = \frac{FG_B}{FG_B + FG_{2D} + FG_{3D}} * 100 \text{ [%]} \quad (2)$$

$$\eta_{Ges} = \frac{FG_B + FG_S}{FG_S + FG_B + FG_{2D} + FG_{3D}} * 100 \text{ [%]} \quad (3)$$

3.2.2 Handsortierung der 2D-Fraktion

Die Big Bags mit den 2D-Proben wurden drei bis sieben Tage in der Halle am Testgelände der Firma Mayer Recycling GmbH gelagert. Anschließend wurden die Proben im Zeitraum vom 11. bis 20. November bis zu einer Grenzkorngröße von >80 mm per Hand sortiert. Auf einem Sortiertisch wurden die Big Bags entleert und per Hand, wie in Abbildung 10 abgebildet, sortiert. Insgesamt wurden die Proben in bis zu elf unterschiedlichen Fraktionen (vgl. Tabelle 6) sortiert. Die sortierten Fraktionen wurden in unterschiedlichen Behältnissen gesammelt. Je

nach Anfallmenge in Kübel, Kunststoffwannen oder 120 l Müllcontainern. Die Behälter wurden nach der Sortierung verwogen. Aus der Differenz des Gewichts aller Einzelfraktionen und des Probengewichts vor der Sortieranalyse wurde der Sortierverlust ermittelt.



Abbildung 10: Handsortierung einer 2D-Probe.

Bei der Handsortierung wurden vereinzelt bei Restmüllproben gefährliche medizinische Gegenstände (z.B. Spritzen) gefunden. Bei diesen Vorkommnissen wurde die Sortierung abgebrochen und das bis dahin sortierte Material verwogen. Testweise wurde danach auch versucht, mit stichsicheren Handschuhen zu sortieren, allerdings war die Feinfühligkeit dadurch soweit beeinträchtigt, dass die Qualität der Sortierung darunter zu sehr gelitten hätte. Die Proben, bei denen es zum Abbruch der Sortierung kam, wurden bei den Berechnungen nicht mit einbezogen. Es handelt sich dabei um eine 2D-Probe aus Anlage 1 und zwei 2D-Proben aus Anlage 2 – beides Versuche mit Restmüll als Inputmaterial.

Tabelle 6: Fraktionen der 2D-Sortierfraktionen.

Fraktionen:	Beschreibung:
Inert	Chemisch inerte Fraktion, meistens Keramikprodukte, Steine oder Glas;
Verbundstoff	Stoffgemenge aus mehreren Fraktionen bildeten oft eine nicht zu trennende Komponente, die auch nicht mit Schneidwerkzeugen oder physischer Kraft getrennt werden konnten. Verbundwerkstoffe wie Windeln bildeten den Großteil dieser Fraktion.
Schaumstoff	Abgerissene Schaumstoffteile, vermutlich von Dämmmaterialien, Matratzen und Polsterungen.
PPK	Zeitungen, Hochglanzmagazine, Spielkarten, Kartonagen und Verpackungen bildeten den Großteil dieser Fraktion.

Metalle	Eisen (Fe)- und Nichteisen (NE)-Metalle in unterschiedlichsten Formen in den Proben, Großteils in Form von Stangen, Drähten oder kleinflächigen Blechen.
Textil	Hauptsächlich Kleidungsstücke, Schuhe, Tücher oder Teppiche.
Holz	In Form von Sperrholz, Ästen oder Holzscheite.
3D	Harte Kunststoffteile, plattgepresste Leergebinde wie Kanister oder Flaschen.
2D	Folien, Bänder, Tragetaschen und Verpackungen aus Kunststoff.
Heu	In manchen Proben war vermehrt Heu zu finden. Vermutlich ein Gewerbeabfall aus einem landwirtschaftlichen oder tierärztlichen Betrieb.
Rest	Material, das am Probentisch übriggeblieben ist (< 80 mm).

3.2.3 NIR-Sortierung der 3D-Fraktion

Zur Feststellung, ob sich die entstandenen 3D-Fraktionen in einer NIR-Sortiermaschine zu einer Zielfraktion gewünschter Qualität (3D-Kunststoffe) sortieren lassen, wurde eine „REDWAVE 2i“ der Firma REDWAVE verwendet. Die Arbeitsbreite der Sortiermaschine betrug zwar 2,8 m, allerdings war nur die Hälfte davon mit einer NIR-Sensorleiste bestückt und somit für die Versuche nutzbar. Der Materialstrom am Beschleunigungsband wurde mittels Trennleiste auf die entsprechende Breite eingengt.

Das Material wurde über ein Förderband zum Beschleunigungsband befördert, wobei die Aufgabe und Vereinzeln von Mitarbeitern vollzogen wurde. Damit soll eine ideale Beschickung erreicht werden, um keine Überlappungen der Objekte zuzulassen.

Das Anlernen von Referenzspektren wurde durch Techniker der Firma REDWAVE durchgeführt. Spektren von folgenden Kunststoffen wurden der NIR-Anlage angelern:

- PE-LD,
- PE-HD,
- PP,
- PET,
- PU,
- PS und
- PVC.

Nach der Trennung in der NIR-Sortiermaschine in eine Wertstofffraktion (3D-Kunststoff) und eine Restfraktion (nicht-Kunststoff) wurden die Fehlausträge per Hand aus den beiden Outputfraktionen aussortiert. Die Mengen an Wertstoff in der Wertstofffraktion (M_{WW}), Reststoff

in der Reststofffraktion (M_{RR}), Fehlasträge (Reststoff) in die Wertstofffraktion (M_{RW}) und Fehlasträge (Wertstoff) in die Restfraktion (M_{WR}) wurden anschließend verwogen. Aus den Massen konnte der Aufgabestrom an Wertstoffen (M_W) nach Formel 4, der Aufgabestrom an Reststoffen (M_R) nach Formel 5 und der Gesamtmassenstrom der Aufgabe (M_A) nach Formel 6 berechnet werden. Der Wertstoffanteil im Aufgabestrom (C_A) (vgl. Formel 7) wurde ebenfalls berechnet. In Abbildung 11 stehen die Indizes R für Reststofffraktion und W für Wertstofffraktion.

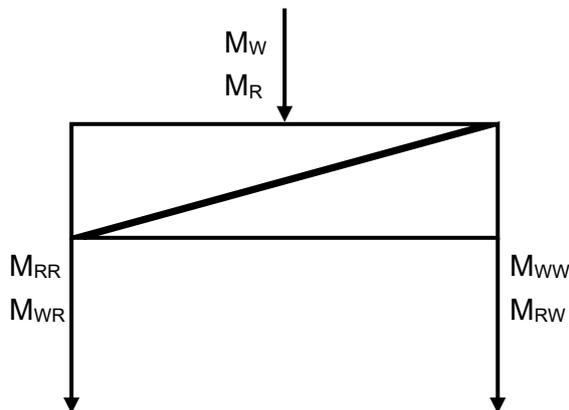


Abbildung 11: Trennschema mit Berechnungsgrößen (Kranert, 2017:225).

$$M_W = M_{WW} + M_{WR} \text{ [kg]} \quad (4)$$

$$M_R = M_{RR} + M_{RW} \text{ [kg]} \quad (5)$$

$$M_A = M_W + M_R \text{ [kg]} \quad (6)$$

$$C_A = \frac{M_W}{M_A} \text{ [kg]} \quad (7)$$

Zur Bewertung der Trennergebnisse wurden für die NIR-Versuche die Reinheit der Wertstofffraktion (C_W) nach Formel 8, das Massenausbringen (R_M) nach Formel 9, das Wertstoffausbringen (R_W) nach Formel 10 und die Fehlaustragsrate der Wertstoffe (E_W) nach Formel 11 berechnet.

$$C_W = \frac{M_{WW}}{M_{WW} + M_{RW}} * 100 \text{ [%]} \quad (8)$$

$$R_M = \frac{M_{WW} + M_{RW}}{M_A} * 100 \text{ [%]} \quad (9)$$

$$R_W = \frac{M_{WW}}{M_W} * 100 \text{ [%]} \quad (10)$$

$$E_W = \frac{M_{WR}}{M_W} * 100 \text{ [%]} \quad (11)$$

Bilder zur sensorgestützten Sortierung sind unter „Sensorgestützte Sortierung“ im „Anhang II – Fotodokumentation“ zu finden.

4 Ergebnisse und Diskussion

4.1 Anlagenbilanzierung

Tabelle 7 zeigt alle Ergebnisse der Anlagenversuche und die errechneten MW sowie STABW aus den Versuchen. Die Ungenauigkeiten entstanden aus Wiegeungenauigkeiten der unterschiedlichen Waagen zur Probenwiegung oder die Ungenauigkeiten des Schaufel-Wiegesystems des Radladers. Einen weiteren Einfluss auf die Ungenauigkeiten hatten auch Materialverluste während den Versuchen. Zu diesen Materialverlusten zählen beispielsweise Verlust an Übergabebändern zwischen den Aggregaten oder auch Wasserverluste von Fraktionen. Wasser aus dem Material blieb in den Kompartimenten zurück (vgl. beispielsweise Bild 1 in Anhang II – Fotodokumentation – Restmüllversuche – Anlage 1).

Tabelle 7: Ergebnisse der Anlagenbilanzen.

		GM Anlage 1 [t/h]	GM Anlage 2 [t/h]	RM Anlage 1 [t/h]	RM Anlage 2 [t/h]
Input	Versuch 1	10,69	12,03	21,72	17,69
	Versuch 2	14,12	11,74	21,39	18,33
	MW	12,40	11,89	21,56	18,01
	STABW	1,71	0,14	0,17	0,32
FG_s	Versuch 1	0,00	6,70	0,00	10,65
	Versuch 2	0,00	7,36	0,00	11,14
	MW	0,00	7,03	0,00	10,89
	STABW	0,00	0,33	0,00	0,25
3D	Versuch 1	0,52	0,79	0,60	0,61
	Versuch 2	0,57	1,01	1,35	0,59
	MW	0,54	0,90	0,98	0,60
	STABW	0,03	0,11	0,37	0,01
FG_B	Versuch 1	4,70	0,34	11,21	0,88
	Versuch 2	7,26	0,28	10,01	1,05
	MW	5,98	0,31	10,61	0,97
	STABW	1,28	0,03	0,60	0,09
2D	Versuch 1	5,40	3,40	10,57	5,11
	Versuch 2	7,36	3,56	8,84	6,34
	MW	6,38	3,48	9,71	5,73
	STABW	0,98	0,08	0,87	0,61
Ungenauigkeit	Versuch 1	0,07	0,80	-0,66	0,44
	Versuch 2	-1,07	-0,46	1,19	-0,80
	MW	-0,50	0,17	0,27	-0,18
	STABW	0,57	0,63	0,93	0,62

4.1.1 Anlage 1 – Gewerbemüll

Die Abbildung 12 links zeigt die Verteilung der einzelnen Ströme durch die Anlage 1 bei Versuch 1 mit Gewerbemüll als Input. Der Inputstrom lag bei 10,69 t/h. Die erzeugten

Outputfraktionen wurden mittels Radlader gewogen. Daraus ergab sich eine Ungenauigkeit von <1%. Die Ungenauigkeiten können auf Messfehler durch die Messungen des Radladers zurückgeführt werden. Damit dieser genaue Messungen vornehmen kann, müsste dieser für eine gewisse Zeit stillstehen, ohne sich zu bewegen. Für solche Messungen war allerdings während der Versuche nicht die Zeit vorhanden. Abbildung 12 rechts zeigt das Sankey-Diagramm von Versuch 2 der Anlage 1 mit Gewerbemüll. Bei diesem Versuch wurde die Anlage mit einem Input von 14,12 t/h getestet. Dabei kam es zu einer Zunahme um 7 % der Output-Masse gegenüber dem Input. Die Steigerung des Outputs kann auf Messungenauigkeit zurückgeführt werden.

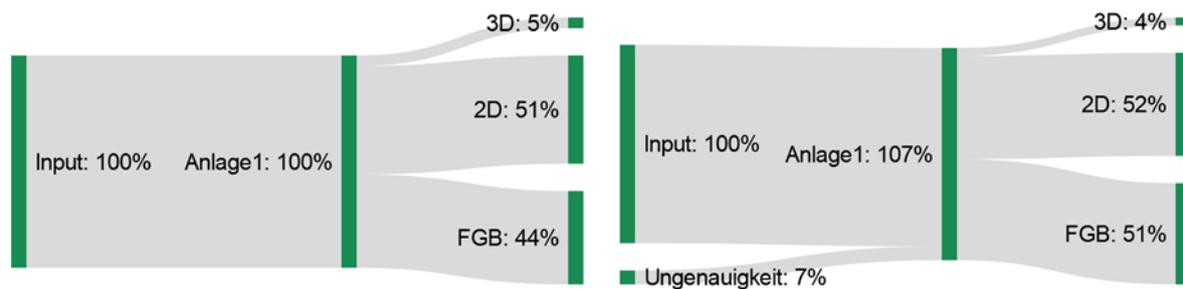


Abbildung 12: Sankey-Diagramme: GM Anlage 1: Versuch 1 (links) und Versuch 2 (rechts).

Abbildung 13 zeigt den MW der Massenströme aus Versuch 1 und Versuch 2. Aufgrund der Steigerung des Durchsatzes bei Versuch 2 ist die STABW des Inputs bei diesem Versuch mit 14 % die höchste. Dabei blieb die ausgebrachte Masse des 3D-Outputs konstant bei rund 0,5 t/h. Die durchschnittliche Ungenauigkeit betrug rund 0,5 t/h.

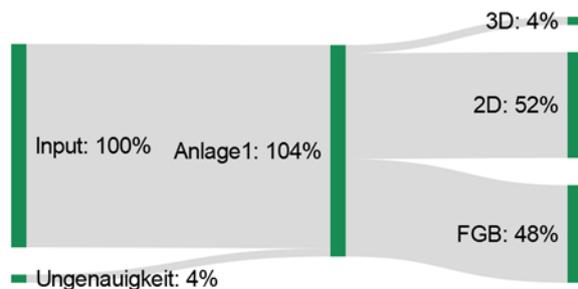


Abbildung 13: Sankey-Diagramm: GM Anlage 1: MW aus Versuch 1 und Versuch 2.

Bei den zwei Versuchen waren lange Klebebänder im Abfall, die sich manchmal ausrollten und sich so in den Aggregaten verfangen. Erst nach längerer Zeit wurden diese vom nachkommenden Abfallstrom weiterbefördert. Die Aufbereitung wurde dadurch behindert, dass diese Bänder nicht richtig vom Ballistikseparator getrennt werden konnten, und so in allen Fraktionen ausgetragen wurden, wie die gelben Pfeile in Abbildung 14 verdeutlichen. Vergleicht man die Änderungen aller Massenströme beider Versuche, kann festgestellt werden, dass die Steigerung des Inputs auch eine ähnlich proportionelle Steigerung für die 2D- und FGB-Massenströme nach sich zog, wobei allerdings der 3D-Massenstrom annähernd gleich blieb. Das ist eine Bestätigung für die gewählte Einstellung des Neigungswinkels am

Ballistikseparator – die ungeachtet des sortierten Massenstroms eine reine 3D-Fraktion aussortieren soll.



Abbildung 14: Klebebänder in allen Kompartimenten des Ballistikseparators.

4.1.2 Anlage 2 – Gewerbemüll

Abbildung 15 links zeigt die Verteilung der Massenströme von Versuch 1 der Anlage 2 mit Gewerbemüll. Dabei wurde die Anlage mit einem Inputstrom von 12,03 t/h getestet. Bei Anlage 2 lag der Massenstrom 3D-Fraktion bei 0,79 t/h, was eine leichte Steigerung gegenüber Anlage 1 darstellt. Abbildung 15 rechts zeigt die Massenströme von Versuch 2 der Anlage 2 mit Gewerbemüll. Der Inputstrom betrug 11,74 t/h. Obwohl der Inputstrom leicht niedriger war als bei Versuch 1, war der Massenstrom 3D-Fraktion bei diesem Versuch leicht über 1 t/h. Der Inputstrom war bei Versuch 1 höher und bei Versuch 2 niedriger im Vergleich zu den Versuchen zu Anlage 1 mit Gewerbemüll. Im Durchschnitt konnte für Anlage 1 ein um 0,5 t/h höherer Inputstrom erreicht werden (vgl. Tabelle 7: Ergebnisse der Anlagenbilanzen.). Die Vorsiebung hat den Massenstrom für 2D erheblich reduziert. Bei beiden Versuchen und auch im Durchschnitt reduzierte sich der 2D-Massenstrom der Anlage 2 um die Hälfte im Gegensatz zu den Massenströmen aus Anlage 1. Im Gegensatz zu den Änderungen des 2D-Massenstroms, wurde durch die Vorsiebung der 3D-Massenstrom erhöht. Im Durchschnitt war der 3D-Massenstrom bei Anlage 2 um ca. 0,5 t/h höher als bei Anlage 1.

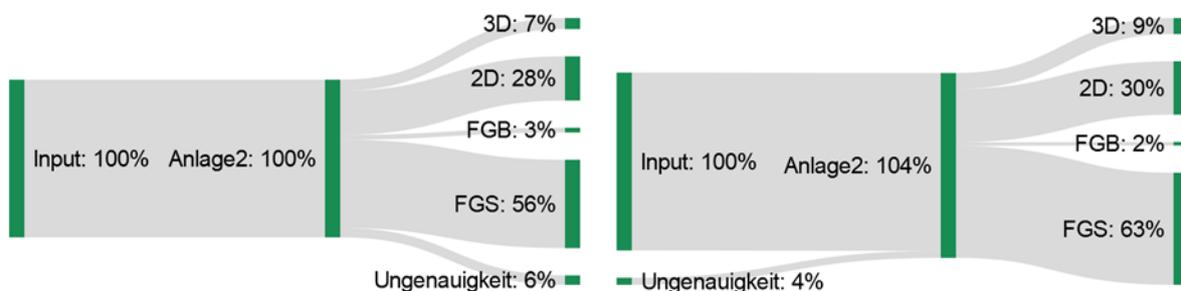


Abbildung 15: Sankey-Diagramm: GM Anlage 2: Versuch 1 (links) und Versuch 2 (rechts).

Die Abbildung 16 zeigt die gemittelten Massenströme aus Versuch 1 und Versuch 2 von Anlage 2 mit Gewerbemüll als Inputmaterial. Anders als bei den Gewerbemüllversuchen zu

Anlage 1 waren die erzielten Massenströme bei beiden Versuchen konstant. Größte Schwankung lag bei der STABW der Ungenauigkeit mit 5 %. Diese ist, wie zuvor erwähnt, auf Messungenauigkeiten des Radladers, andere Waagen oder Materialverluste zurück zu führen. Bei allen anderen Massenströmen sind die STABW niedriger als bei den Massenströmen aus Anlage 1 ohne Trommelsieb. Das kann auf die ähnlichen Inputströme für Versuch 1 und Versuch 2 bei Anlage 2 im Gegensatz zu Anlage 1 zurückgeführt werden.

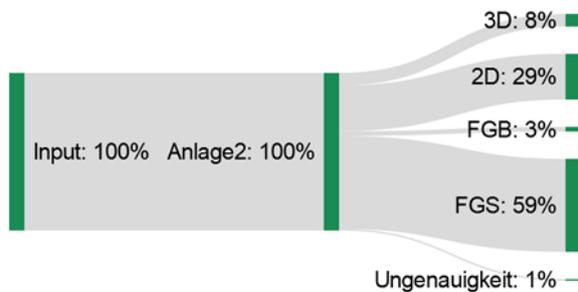


Abbildung 16: Sankey-Diagramm: GM Anlage 2: MW aus Versuch 1 und Versuch 2.

Bei den Versuchen wurde ersichtlich, dass die Siebmaschine Probleme mit der Aufbereitung des Inputmaterials hatte. Ein Problem war, dass sich Bestandteile im Gewerbemüll befanden, die nicht gleichmäßig zerkleinert werden konnten. Bei dieser selektiven Zerkleinerung kam es vor, dass längliche, elastische Bestandteile (z.B. Filmbänder von Videokassetten) zur Siebmaschine befördert wurden und dort auf zwei Arten Probleme verursachten. Zum ersten wickelten sie sich um das Trommelsieb. Dieses Verhalten führte dazu, dass die effektive Siebfläche vermindert wurde. Auf Basis von Messungen (vgl. Abbildung 17 rechts) der Umwicklungen nach einem Versuch konnte eine Minderung der Siebfläche errechnet werden. Zum zweiten kam es zu Zopfbildung, was zu Anlagenstillständen hätte führen können (vgl. Abbildung 17 links). Diese Gemenge mussten zwei bis drei Mal während des Versuchs manuell auf das Austragsband gezogen oder mit einem Rechen aus der Anlage entfernt werden. Der Massenaustrag der Zöpfe wurde nicht in die Anlagenbilanz miteingerechnet.

Zusätzlich zur Minderung der effektiven Siebfläche kann auch bei nicht vollständiger Bedeckung der Masche die Siebung beeinflusst werden. Wenn sich beispielsweise ein Filmband einzeln über eine Masche legt, halbiert dieses Band die ursprüngliche Siebklasse. Das führt zu unterschiedlichen Siebschnitten, welche nicht gewollt waren.

Berechnung zur Minderung der Siebfläche:

Der Lamellenabstand der Austragsspirale in der Siebtrommel beträgt 80 cm. Die Umwicklungen nahmen ungefähr eine Breite von 30 cm (vgl. Abbildung 17 rechts) ein. Solche Umwicklungen waren bei den Versuchen (Gewerbemüll Anlage 2) zwei Mal festzustellen. Daraus folgt für ein Trommelsieb mit einem Durchmesser von 2 m eine Minderung der Siebfläche um 1,8 m². Die Siebfläche der Siebeinheit ohne Kontamination war 30 m² (vgl. Kapitel 3.1.1). Daraus folgt die Minderung der effektiven Siebfläche von rund 6 % im Laufe der Versuche.



Abbildung 17: Zopfbildung (links) und Filmband-Umwicklung am Trommelsieb (rechts).

4.1.3 Anlage 1 – Restmüll

Abbildung 18 links zeigt die Massenströme aus Anlage 1 von Versuch 1 mit Restmüll als Inputmaterial. Die Anlage wurde mit 21,72 t/h Restmüll getestet. Obwohl mehr Inputmaterial bei den Restmüllversuchen durch die Anlage 1 lief, war die Höhe des 3D-Outputs ähnlich hoch wie bei den Versuchen mit Gewerbemüll. Der Massenstrom des 3D-Outputs betrug 0,6 t/h. Abbildung 18 rechts zeigt die Massenströme aus dem Versuch 2 für Restmüll der Anlage 1. Dabei zeigt sich eine prozentuelle Zunahme des 3D-Massenstroms auf 6% des Inputs. Der Input für Versuch 2 lag bei 21,39 t/h, was für den 3D-Massestrom ein Ergebnis von 1,35 t/h bedeutete.

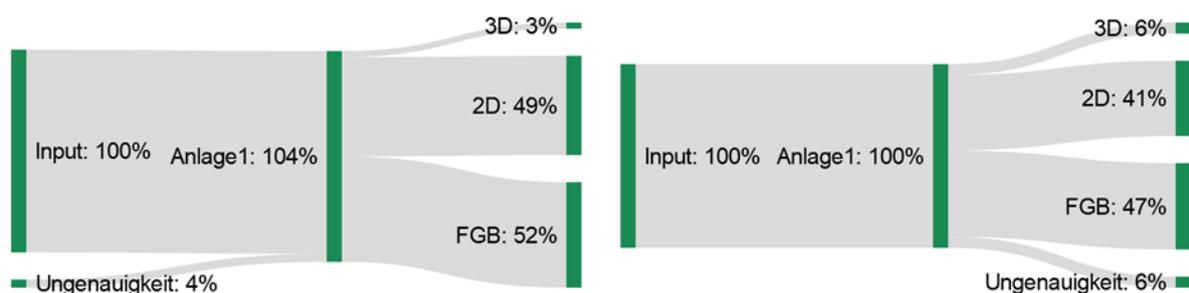


Abbildung 18: Sankey-Diagramm: RM Anlage 1: Versuch 1 (links) und Versuch 2 (rechts).

Abbildung 19 zeigt die gemittelten Massenströme aus Versuch 1 und Versuch 2. Dabei ist festzustellen, dass bei den Restmüllversuchen die Massenströme über beide Versuche konstant hoch waren. Die höchste STABW (4 %) bei den Versuchen wurde bei den Messungenauigkeiten verzeichnet. Durchschnittlich erzielte Anlage 1 mit Restmüll einen 3D-Massenstrom von 0,98 t/h.

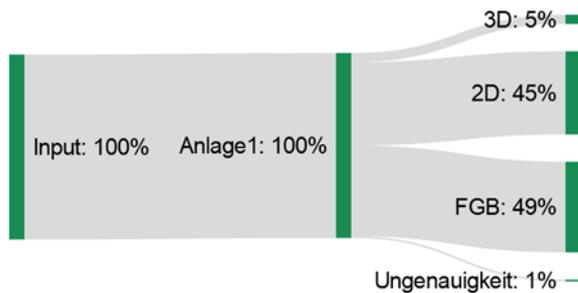


Abbildung 19: Sankey-Diagramm: RM Anlage 1: MW aus Versuch 1 und Versuch 2.

4.1.4 Anlage 2 – Restmüll

Abbildung 20 links zeigt die Ergebnisse der Massenströme von Versuch 1 für Anlage 2 mit Restmüll als Inputmaterial. Bei diesem Versuch wurde ein Durchsatz von 17,69 t/h erreicht. Der 3D-Output lag bei 0,61 t/h. Abbildung 20 rechts zeigt die Ergebnisse von Versuch 2 der Anlage 2. Dieser Versuch erreichte einen Massendurchsatz von 18,33 t/h. Der Massenstrom des 3D-Outputs lag bei 0,59 t/h. Die größte prozentuelle Zunahme verzeichnete der 2D-Output – von 5,11 t/h bei Versuch 1 zu 6,34 t/h in Versuch 2. Im Vergleich der Versuche aus Anlage 2 zu Anlage 1 waren die Inputströme bei Anlage 2 für beide Versuche um ca. 3 t/h niedriger. Die Vorsiebung verringerte – wie bei den Gewerbemüllversuchen – den 2D- und FGB-Massenstrom bei beiden Versuchen. Das kann darauf hinweisen, dass ein wesentlicher Anteil an FG bei Anlage 1 in die 2D-Fraktion ausgetragen wurde, aber in Anlage 2 durch die zusätzliche Vorsiebung in eine der beiden FG-Fractionen ausgetragen wurde.

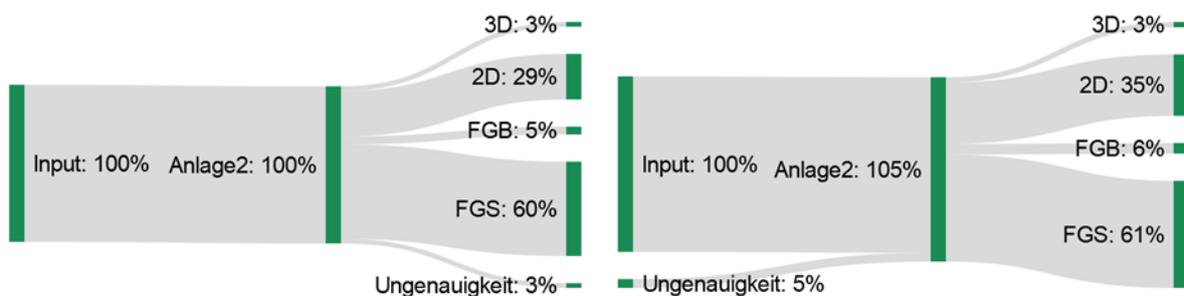


Abbildung 20: Sankey-Diagramm: RM Anlage 2: Versuch 1 (links) und Versuch 2 (rechts).

Abbildung 21 zeigt die MW der Massenströme aus Versuch 1 und Versuch 2. Ein Unterschied zu den Gewerbemüllversuchen ist bei den 3D-Massenströmen zu erkennen. Während bei Anlage 2 für Gewerbemüll eine Steigerung des 3D-Massenstroms zu verzeichnen war, sind bei Restmüll die 3D-Massenströme in Anlage 2 niedriger als oder gleich hoch wie bei Anlage 1. Eine Begründung hierfür könnte sein, dass kleinere 3D-Partikel (<80 mm) im Trommelsieb vorzeitig aussortiert wurden, was bei Anlage 1 nicht möglich gewesen wäre. Warum bei Gewerbemüll das Gegenteil festzustellen war, kann mit der volatilen Zusammensetzung des Gewerbemülls im Gegensatz zu Restmüll zusammenhängen – wie im Theorieteil nachzulesen (vgl. 2.1.3.2 Gewerbemüll), kann die Zusammensetzung des Gewerbemülls je nach Gewerbe oder Herkunft stark variieren. Auch das Versuchsmaterial (Gewerbemüll) entstammte aus

mehreren Anlieferungen und könnte somit unterschiedlich viel 3D-Material beinhaltet haben.

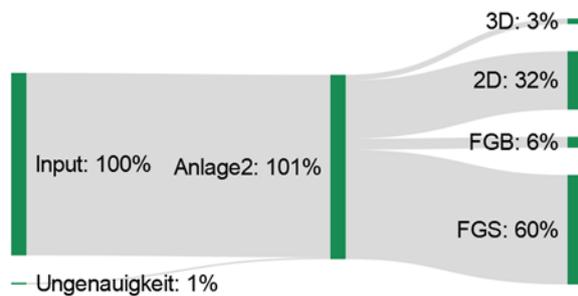


Abbildung 21: Sankey-Diagramm: RM Anlage 2: MW aus Versuch 1 und Versuch 2.

Bei den Versuchen mit Restmüll wurde festgestellt, dass sich kleinere Teile auch um die Maschen wickelten, es allerdings zu keiner wirklichen Minderung der Siebfläche kam. Deutlich ersichtlich ist der Vergleich von Abbildung 17 mit Abbildung 22. Auf Abbildung 17 ist das Material großflächig um die Trommel gewickelt und in Abbildung 22 hängen einzelne Objekte an den Maschen, aber ohne die Siebfähigkeit zu beeinträchtigen.



Abbildung 22: Siebtrommel während des zweiten Restmüll-Versuchs mit Anlage 2.

Weitere Bilder zu den einzelnen Anlagenversuchen sind in den Abschnitten „Gewerbemüllversuche – Anlage 1“, „Gewerbemüllversuche – Anlage 2“, „Restmüllversuche – Anlage 1“ und „Restmüllversuche – Anlage 2“ im „Anhang II – Fotodokumentation“ zu finden.

4.1.5 Siebwirkung

In Tabelle 8 sind die Siebwirkungsgrade für die Abtrennung des Feinguts (berechnet nach Formel 1 aus Kapitel 3.2.1) aufgelistet.

Es ist festzustellen, dass der Gesamt-Siebwirkungsgrad (η -Anlage in Tabelle 8) durch Vorsiebung gesteigert werden konnte. Der η -Anlage für Gewerbemüll bei Anlage 1 lag durchschnittlich bei 92 % (94 % (Versuch 1) und 90 % (Versuch 2)). Durch die Vorsiebung erzielte Anlage 2 einen durchschnittliche η -Anlage für Gewerbemüll von 99 % (99 % (Versuch 1 und Versuch 2)). Ähnlich stieg auch der η -Anlage bei Anlage 2 durch die Vorsiebung, im Gegensatz zu Anlage 1 bei den Versuchen mit Inputmaterial Restmüll. Der durchschnittliche η -Anlage lag bei 97 % (97 % (Versuch 1 und Versuch 2) für Anlage 2, während er bei Anlage 1 bei 89 % (90 % (Versuch 1) und 88 % (Versuch 2)) lag. Es kann somit festgestellt werden, dass die Erweiterung der aktiven Siebfläche des Ballistikseparators durch die aktive Siebfläche des Trommelsiebs eine Steigerung des η -Anlage um durchschnittlich 7 % (GM und RM) bewirkte. Die allgemein höheren Siebwirkungsgrade (Anlage 1 und Anlage 2) für Inputmaterial Gewerbemüll, im Gegensatz zu Restmüll, können darauf zurückgeführt werden, dass der FG-Anteil für das Inputmaterial Restmüll (z.B. Organik; vgl. Kapitel 2.1.3 – Zusammensetzung Restmüll und Gewerbemüll) höher ist, als bei Gewerbemüll. Die größere Menge an FG im Restmüll würde eine höhere Siebleistung (z.B. mehr aktive Siebfläche) benötigen, um dieselben Siebwirkungsgrade zu erreichen, wie bei Gewerbemüll mit weniger hohem FG-Anteil. Bei der Aufbereitung beider Inputmaterialien konnte festgestellt werden, dass bei den Restmüllversuchen mehr FG in nicht-FG-Fractionen ausgetragen wurden. Das wird in den Ergebnissen der Sortieranalysen der 2D-Fractionen (vgl. Kapitel 4.3 Sortieranalyse der 2D-Fractionen) ersichtlich. Diese zeigen, dass der Anteil Rest (<80 mm) in den 2D-Fractionen des Restmülls höher war, als bei den 2D-Fractionen des Gewerbemülls (Anlage 1 und Anlage 2). In den 3D-Fractionen konnten keine FG-Anteile festgestellt werden.

Durch die Vorsiebung reduzierte sich der η -Ballistikseparator – unabhängig des Inputmaterials. Bei den Gewerbemüllversuchen sank der η -Ballistikseparator durch Vorsiebung im Durchschnitt um 11 % (92 % (Anlage 1) und 81 % (Anlage 2)) und bei den Versuchen mit Restmüll um 17 % (89 % (Anlage 1) und 72 % (Anlage 2)). Die Begründung für die Reduktion liegt am Aussieben von FG der Korngröße <10 mm durch das Trommelsieb. Partikel mit kleinerer Korngröße werden schneller durch größere Maschen fallen und ausgesiebt werden, als Partikel im Grenzkornbereich, die längere Zeit benötigen, um durch die Maschen zu gelangen. Dadurch gelangte allgemein weniger FG in den Ballistikseparator und das FG, das in den Ballistikseparator gelangte, war wegen der größeren durchschnittlichen Korngröße schwerer abzusieben. Es änderte sich durch Vorsiebung auch die Korngrößenverteilung des FG_B – von Korngrößenverteilungen mit überwiegendem Anteil an Partikeln der Korngröße <10 mm (Anlage 1) hin zu Korngrößenverteilungen mit größeren Anteilen von FG in der Nähe des Grenzkornbereichs (Klassenbreiten 40-60 mm und 60-80 für Anlage 2).

Es ist auf die Vorsiebung zurückzuführen, dass durch die zusätzliche aktive Siebfläche und der längeren Verweilzeit im Trommelsieb ein wesentlicher Anteil an Partikeln ausgesiebt wurde, der bei den Versuchen zu Anlage 1 ansonsten in die 2D-Fraktion gelangt wäre (vgl. Reduktion des 2D-Massenstroms im Vergleich zwischen Anlage 1 und Anlage 2 in Kapitel 4.1 Anlagenbilanzierung).

Aus Untersuchungen von Möllnitz et al. (2020) konnte festgestellt werden, dass durch selektive Zerkleinerung von Restmüll oder Gewerbemüll, Inertstoffe oder Organik eher in sehr feinem FG (<10 mm) und Wertstoffe (z.B. Kunststoff) in gröberen FG zu finden sind. Somit könnte die Vorsiebung den Wertstoffanteil (Kunststoff) im FG_B aufkonzentrieren.

Weiters zeigt Tabelle 8, dass die Minderung der effektiven Siebfläche (vgl. Kapitel 4.1.2 Anlage 2 – Gewerbemüll) bei den Gewerbemüllversuchen keinen erkennbaren Einfluss auf die Effizienz der Abtrennung hatte – zumindest für die Dauer der durchgeführten Versuche. Es ist zu erwarten, dass das bei längerem Anlagenbetrieb anders sein kann.

Tabelle 8: Siebwirkungsgrade der Aggregate bei Versuch 1 und Versuch 2, sowie MW und STABW.

		GM Anlage 1	GM Anlage 2	RM Anlage 1	RM Anlage 2
Versuch 1	η-Trommelsieb	-	94%	-	90%
	η-Ballistikseparator	94%	83%	90%	71%
	η-Anlage	94%	99%	90%	97%
Versuch 2	η-Trommelsieb	-	96%	-	89%
	η-Ballistikseparator	90%	79%	88%	73%
	η-Anlage	90%	99%	88%	97%
MW	η-Trommelsieb	-	95%	-	89%
	η-Ballistikseparator	92%	81%	89%	72%
	η-Anlage	92%	99%	89%	97%
STABW	η-Trommelsieb	-	1%	-	1%
	η-Ballistikseparator	2%	2%	1%	1%
	η-Anlage	2%	0%	1%	0%

4.2 Korngrößenverteilungen der FG-Fractionen

4.2.1 Gewerbemüll

Die Korngrößenverteilung der FG_B aus Anlage 1 mit Inputmaterial Gewerbemüll ist in Abbildung 23 oben dargestellt. Der Anteil des FG_B mit einer Korngröße von weniger als 10 mm machte ca. 45 % bei Versuch 1 aus, während bei Versuch 2 ca. 30 % der Masse eine kleinere Korngröße als 10 mm aufwies. Der größte Massenanteil der FG_B ist auch bei Anlage 2 (vgl. Abbildung 23 unten) in der Kornklasse <10 mm zu verzeichnen. In den Klassen von 80 mm bis 40 mm waren bei Anlage 2 ähnlich große Massenanteile festzustellen. Von Klasse 40 mm bis 10 mm sank der Anteil konstant.

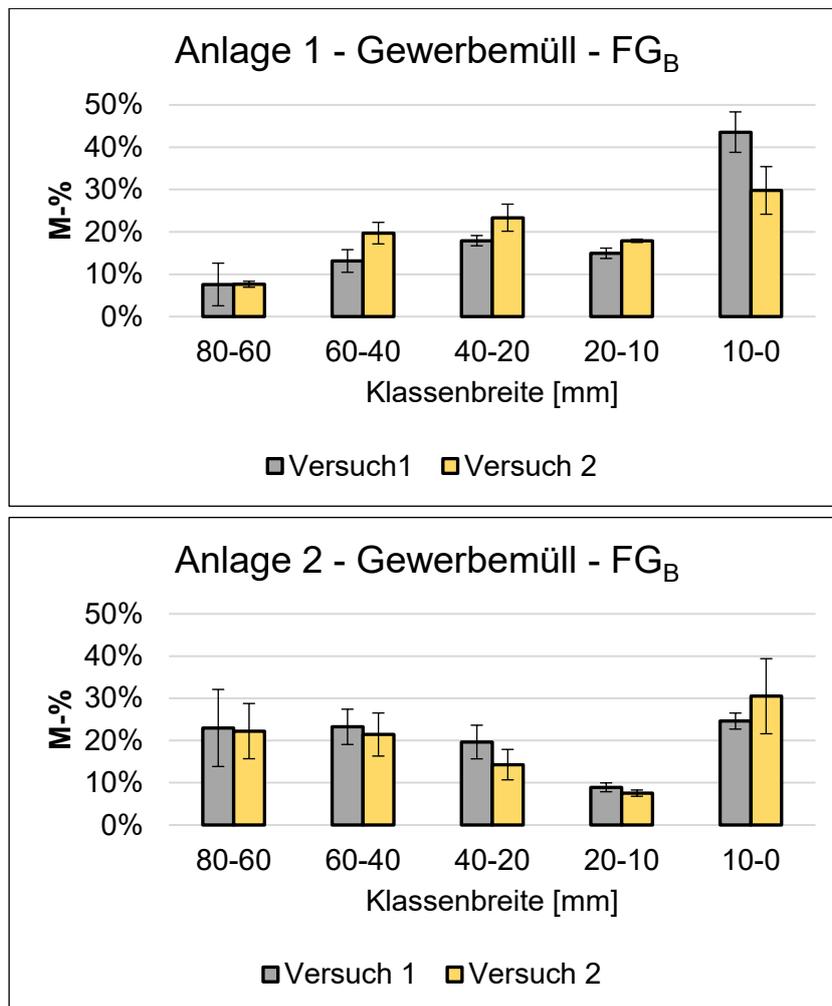


Abbildung 23: Korngrößenverteilung Anlage 1 (oben) und Anlage 2 (unten) - Gewerbemüll - FG_B .

Im Vergleich kann festgestellt werden, dass die Vorsiebung eine Verteilung des FG_B zugunsten der größeren Korngrößen verursacht hat und eine durchschnittliche Senkung des Massenanteils der Kornklasse <10 mm um 10 % verursachte. Das bedeutet, dass der Einsatz des Trommelsiebs die Siebung durch den Ballistikseparator entlastete und so FG_B größerer Korngröße höhere Anteile ausmachten.

Die Korngrößenverteilung des FG_S ist in den Klassen 80 mm bis 10 mm annähernd gleich und steigt erst deutlich an in der Kornklasse <10 mm (vgl. Abbildung 24). Unter Betrachtung des Gesamtmassenstroms des FG_S bei Anlage 2 mit Gewerbemüll (vgl. Kapitel 4.1.2) deutet der Anteil an FG_S <10 mm darauf hin, dass eine erhebliche Menge an FG <10 mm schon durch das Trommelsieb abgesiebt wird und die erwähnte Entlastung des Ballistikseparators bewirkt.

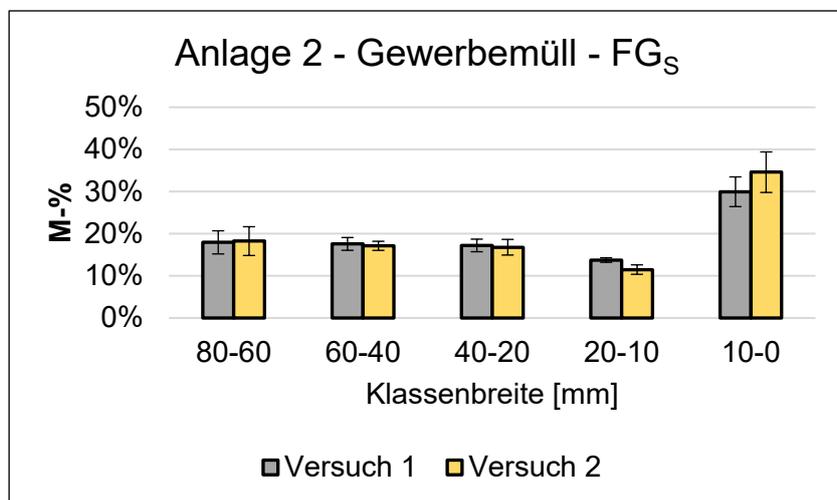


Abbildung 24: Korngrößenverteilung Anlage 2 - Gewerbemüll - FG_S .

4.2.2 Restmüll

In Abbildung 25 ist die Verteilung des FG_B der Anlage 1 und Anlage 2 mit Inputmaterial Restmüll illustriert. Mit durchschnittlich 40 % Korngröße <10 mm weist der Feingutstrom (Anlage 1) eine Verteilung wie der Gewerbemüll im ersten Versuch auf. Anders als der Gewerbemüll bleibt der FG_B bei Restmüll auch im Versuch 2 ähnlich verteilt. Bei den Versuchen der Anlage 2 ist festzustellen, dass der Einsatz des Trommelsiebs den Massenanteil für die Kornklasse <10 mm für FG_B verringert und den Anteil der anderen Klassen erhöht hat (vgl. Abbildung 25). Das kann eventuell darauf zurückzuführen sein, dass die Verringerung der effektiven Siebfläche bei den Gewerbemüllversuchen dazu führte, dass FG mit kleinerer Korngröße erst durch den Ballistikseparator ausgetragen werden konnte. Da bei den Restmüllversuchen keine Minderungen der Siebfläche stattfanden, konnte somit mehr FG mit kleinerer Korngröße schon im Trommelsieb ausgesiebt werden.

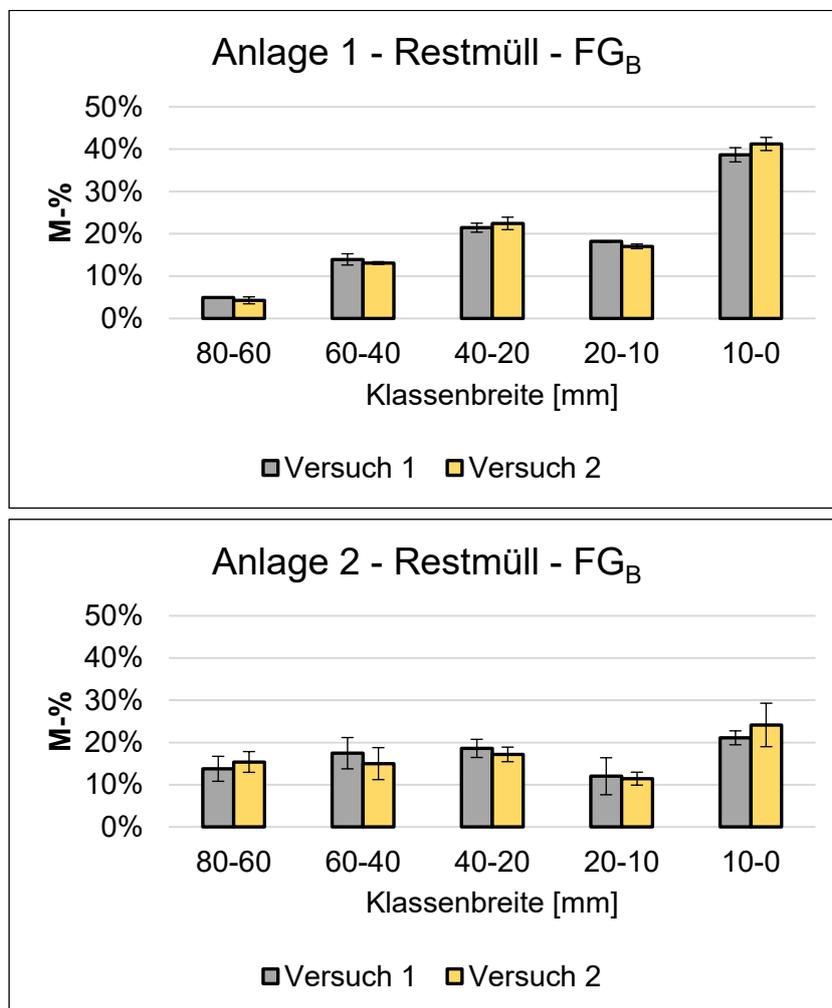


Abbildung 25: Korngrößenverteilung Anlage 1 (oben) und Anlage 2 (unten) - Restmüll - FG_B

Die Veränderung der Korngrößenverteilung von mehrheitlich FG_B <10 mm (Anlage 1) hin zu FG_B größerer Korngröße (Anlage 2) kann durch die Entlastung der Siebung des Ballistikseparators durch den Einsatz des Trommelsiebs – wie schon bei Gewerbemüll – erklärt werden.

Die Korngrößenverteilung des FG_S (vgl. Abbildung 26) für Restmüll ist leicht gleichmäßiger verteilt und kann auf den Einfluss einer möglichen selektiven Zerkleinerung (vgl. Kapitel 4.1.5) zurückgeführt werden.

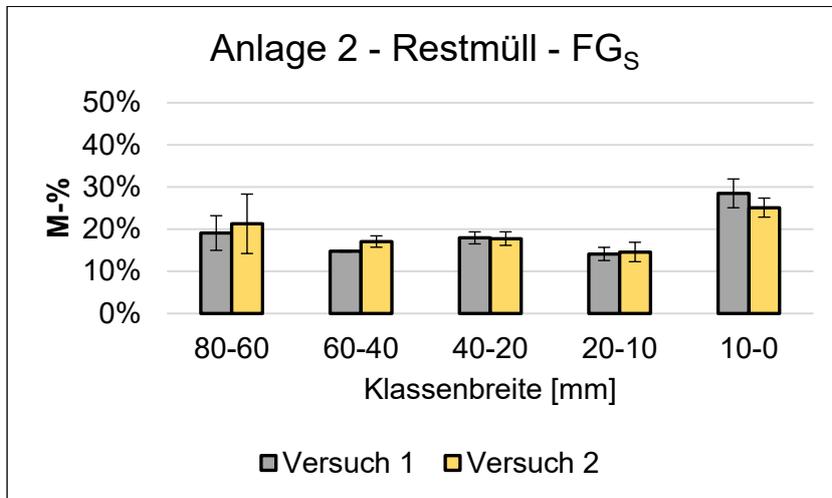


Abbildung 26: Korngrößenverteilung Anlage 2 - Restmüll - FG_S .

Im Vergleich der FG_S von Gewerbemüll (vgl. Abbildung 24) und Restmüll (vgl. Abbildung 26) stellte sich das FG_S von Gewerbemüll als feiner heraus.

Allgemein konnte für beide Inputmaterialien bei optischer Untersuchung festgestellt werden, dass die FG_B auffällig viele bunte Partikel beinhalteten, was einen vermutlichen Anteil an Kunststoff bedeutet. Mögliche weitere Verwertungswege werden daher in Kapitel 5.2 diskutiert. Für die $FG_S < 10$ mm war das nicht so – hier war die Färbung eher grau bis bräunlich, was vermutlich auf Organik oder Inertstoffe hinweist. Ein weiterer Hinweis auf diese Beobachtung geben die sehr niedrigen Massenanteile von Inertstoffen in den 2D-Fractionen (vgl. Kapitel 4.3).

4.3 Sortieranalyse der 2D-Fractionen

4.3.1 Gewerbemüll

In Abbildung 27 sind die Massenanteile der unterschiedlichen Sortierfraktionen der 2D-Fraktion aus den Anlagen 1 und 2, mit Inputmaterial Gewerbemüll, ersichtlich. Die Säulen zeigen den Durchschnittswert aus den Ergebnissen der Sortieranalysen (Versuch 1 und Versuch 2) für Anlage 1 (graue Säulen) und Anlage 2 (blaue Säulen) an, während die Fehlerindikatoren (dünne schwarze Striche) die Standardabweichung anzeigen.

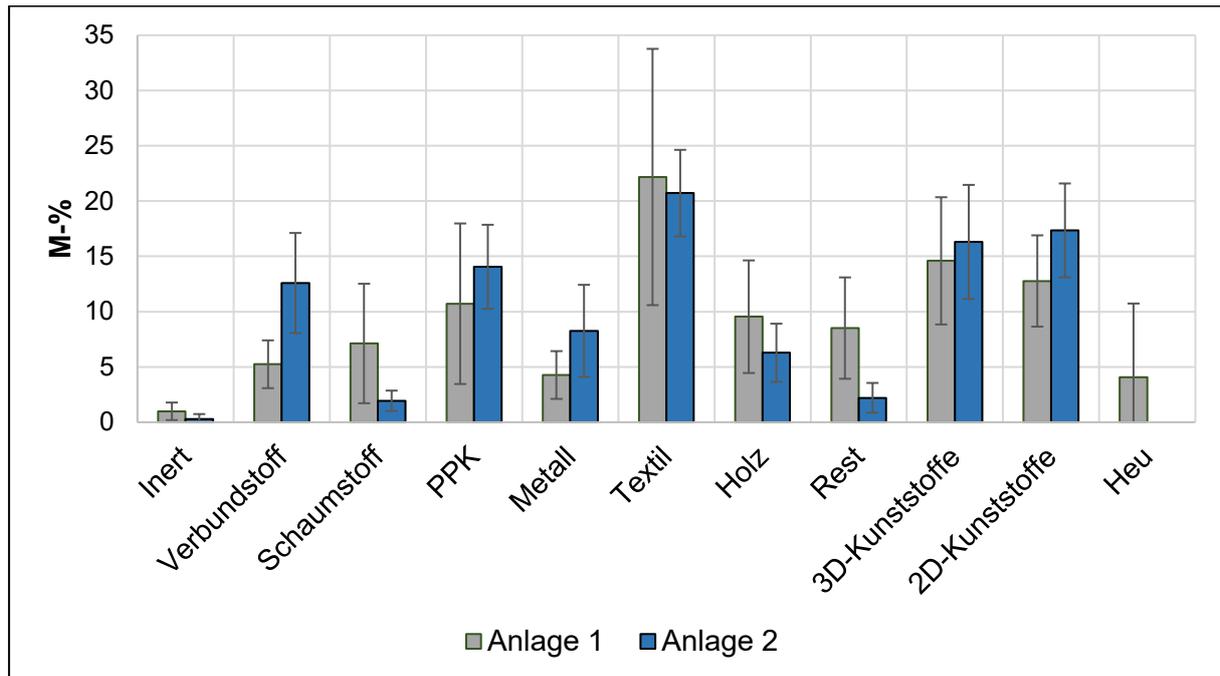


Abbildung 27: Zusammensetzung des 2D-Output im Anlagenvergleich (Gewerbemüll). Säulenhöhe: MW aus Versuch 1 und Versuch 2.

Die Fraktion Textil machte bei den Versuchen von Anlage 1 den mengenmäßig größten Anteil aus. Im Versuch 1 war der Massenanteil bei rund 18 % und beim Versuch 2 rund 26 %, was einen MW von rund 22 % ergibt. Ebenfalls ist in Abbildung 27 ersichtlich, dass auch bei den Versuchen mit Vorsiebung die Fraktion Textil den größten Massenanteil ausmachte. Textil kam in den Versuchen der Anlage 2 im Durchschnitt auf 19 % (Versuch 1) bzw. 22 % (Versuch 2). In Betrachtung der Fehlerindikatoren (vgl. Abbildung 27) kann festgestellt werden, dass die Vorsiebung (Anlage 2) die Schwankungsbreite der meisten Fraktionen minimierte.

Abbildung 28 zeigt Textilproben aus den Gewerbemüllversuchen von Anlage 1 und Anlage 2. Enthalten sind unter anderem verschieden große Stücke von Vliesen (z.B. Malervliese) und auch Kleidungstextilien wie beispielsweise eine Schuheinlage, erkennbar in Abbildung 28.a. Im Verhältnis zueinander überwiegt der Anteil an nicht-Kleidungstextilien.



Abbildung 28: Beispielfotos Gewerbemüll: händisch sortierte Textil-Fractionen der a) Anlage 1 und b) Anlage 2.

Die Fraktionen 3D-Kunststoffe und 2D-Kunststoffe blieben bei beiden Versuchen von Anlage 1 konstant hoch, mit Anteilen zwischen 10 % bis knapp unter 20 %. Gemeinsam kamen die Kunststoffe auf ca. 28 % (Versuch 1) und 25 % (Versuch 2). Die Ergebnisse aus den Versuchen mit Anlage 2 zeigen für die Kunststofffraktionen eine Erhöhung des Massenanteils. 3D-Kunststoffe stiegen um ungefähr 2 % auf ca. 17 %, während 2D-Kunststoffe um ca. 5 % auf 18 % stiegen. Summiert machten die Kunststoffe somit ca. 33 % der Zusammensetzung aus. Die Erhöhung der Kunststoffe durch Vorsiebung ist auf die selektive Zerkleinerung zurückzuführen, die Wertstoffe (z.B. Kunststoffe) weniger fein zerkleinert als andere Materialien (z.B. Inertstoffe). Dadurch erhöht sich der Anteil an Kunststoffen in den Proben der Anlage 2. Der hohe Anteil der 3D-Kunststoffe ist auf die Neigungswinkeleinstellungen des Ballistikseparators zurück zu führen. Dieser wurde so gewählt, um eine gezielt reine 3D-Fraktion zu erhalten. Damit wurden wesentliche Mengen an 3D-Kunststoffen als Verluste in die 2D-Fraktion ausgetragen. Abbildung 29 zeigt Beispielfotos von händisch sortierten 3D- bzw. 2D-Kunststofffraktionen aus den Gewerbemüllversuchen.

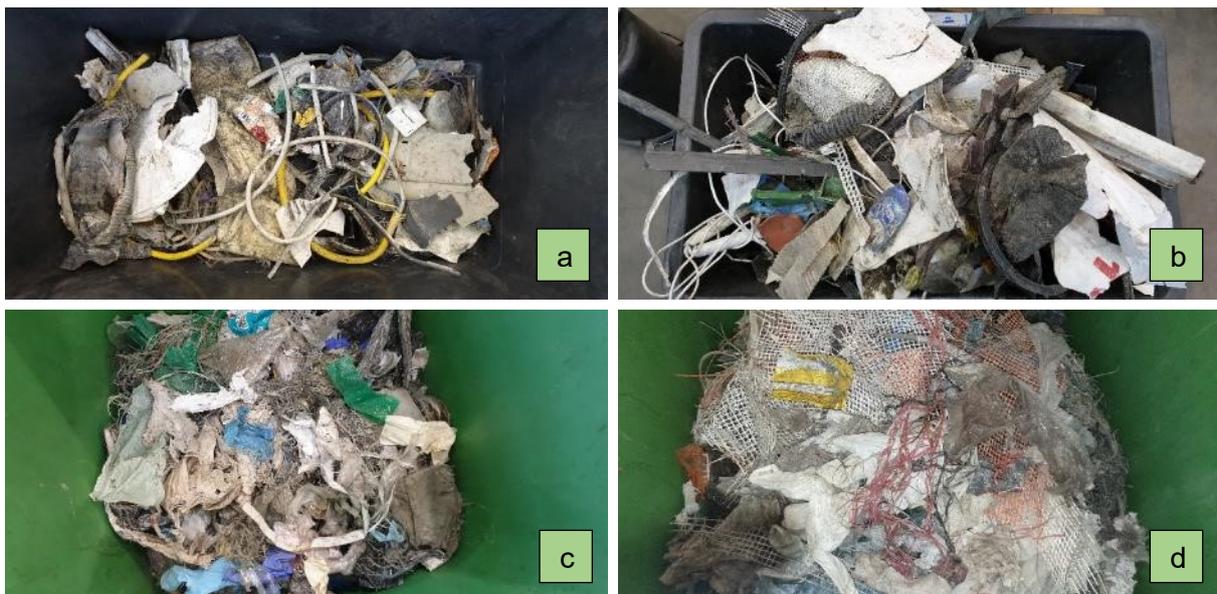


Abbildung 29: Beispielfotos Gewerbemüll: händisch sortierte 3D-Fractionen der a) Anlage 1, b) Anlage 2 und 2D-Fractionen aus c) Anlage 1 und d) Anlage 2.

Große Schwankungsbreite konnte im Fall von PPK beobachtet werden. Bei Anlage 1 waren durchschnittlich ca. 4 % (Versuch 1) bis 18 % (Versuch 2) der Fraktion in den einzelnen Proben vorhanden, was einen durchschnittlichen Anteil von 11 % PPK für Anlage 1 ergab. Die Vorsiebung (Anlage 2) konnte die Schwankungsbreite der PPK-Anteile (7 % (Anlage 1) und 3,5 % (Anlage 2)) halbieren, aber den durchschnittlichen Anteil an PPK auf ca. 14 % erhöhen. Der Grund für die stark unterschiedlich hohen Anteile könnte sein, dass entweder der Grundanteil an PPK im Inputmaterial (abhängig von Gewerbeart) stark volatil ist oder durch flächige Geometrie nicht gleichmäßig zerkleinert werden konnte (selektive Zerkleinerung) und somit nicht einheitlich als Feingut oder 2D ausgetragen wurde. Auch könnte bei PPK mit hohem Feuchtegehalt (durch Kontakt mit anderen Fraktionen in den Anlagen oder Kompartimenten), die Zerkleinerung effektiver gewesen sein als bei trockenem Material, da es möglicherweise schneller zu Zersetzungen und Zerkleinerung bei der Aufbereitung kommen kann. Da sich allerdings ein Anstieg an PPK durch Vorsiebung ergeben hat, ist vermutlich die selektive Zerkleinerung – wegen der Geometrie der PPK-Objekte (z.B. Klebebänder) – für die nicht-Aussiebung verantwortlich. Abbildung 30 zeigt Beispielfotos von händisch sortierten PPK-Fractionen aus der 2D-Fraktion nach einer Sortieranalyse.



Abbildung 30: Beispielfotos Gewerbemüll: händisch sortierte PPK-Fractionen von a) Anlage 1 und b) Anlage 2.

Abbildung 31 zeigt Beispielfotos sortierter Metall-Fractionen aus den Gewerbemüllversuchen. Unter den Metallen befanden sich Stangen verschiedenster Durchmesser, Spraydosen und Kunststoffe im Verbund mit Metalldraht.



Abbildung 31: Beispielfotos Gewerbemüll: händisch sortierte Metall-Fraktion aus a) Anlage 1 und b) Anlage 2.

Die Massenanteile von Metall konnten durch Vorsiebung um durchschnittlich 4 % gesteigert werden (4 % (Anlage 1) und 8 % (Anlage 2)).

Die Senkung des Anteils der Restfraktion (<80 mm) (8 % (Anlage 1) und 2 % (Anlage 2)), der Inert-(1 % (Anlage 1) und 0,5 % (Anlage 2)) und Holzfraktion (10 % (Anlage 1) und 6 % (Anlage 2)) bei Gewerbemüll ist mit selektiver Zerkleinerung und höherem Siebwirkungsgrad (vgl. Tabelle 8) durch die Vorsiebung zu erklären. Die größere aktive Siebfläche bei Anlage 2 und die Verweildauer im Trommelsieb haben die fein zerkleinerten Fraktionen schon vor dem Ballistikseparator zum Großteil abgesiebt.

Die Verringerung des Schaumstoffanteils bei Anlage 2 ist zum einen durch die Vorsiebung zu erklären wie bei anderen Fraktionen (z.B. Inert, Holz, Rest), und zum anderen auch weil Schaumstoffobjekte im Ballistikseparator in die 3D-Fraktion ausgetragen wurden, wie in Abbildung 66 links zu sehen ist.

Die Verbundstoffe wurden wegen ihrer Eigenschaften (Rissfestes Material, wenig spröde) nur schlecht zerkleinert. Deshalb blieben die Objekte über Grenzkorngröße der Siebflächen und wurden unabhängig der Anlage in die 2D-Fraktion ausgetragen.

Weitere Beispielfotos von händisch sortierten Fraktionen aus Anlage 1 und Anlage 2 der Gewerbemüllversuche sind in „Anhang II – Fotodokumentation“ unter „2D-Fractionen Gewerbemüll – Anlage 1“ und „2D-Fractionen Gewerbemüll – Anlage 2“ zu finden.

4.3.2 Restmüll

In Abbildung 32 sind die Massenanteile der unterschiedlichen 2D-Fractionen aus den Anlagen 1 und 2, mit Inputmaterial Restmüll, ersichtlich. Drei Proben der Restmüllversuche mussten verworfen werden, nachdem medizinisches Material gefunden wurde. Eine Probe aus den Versuchen zu Anlage 1 und zwei Proben aus den Versuchen der Anlage 2.

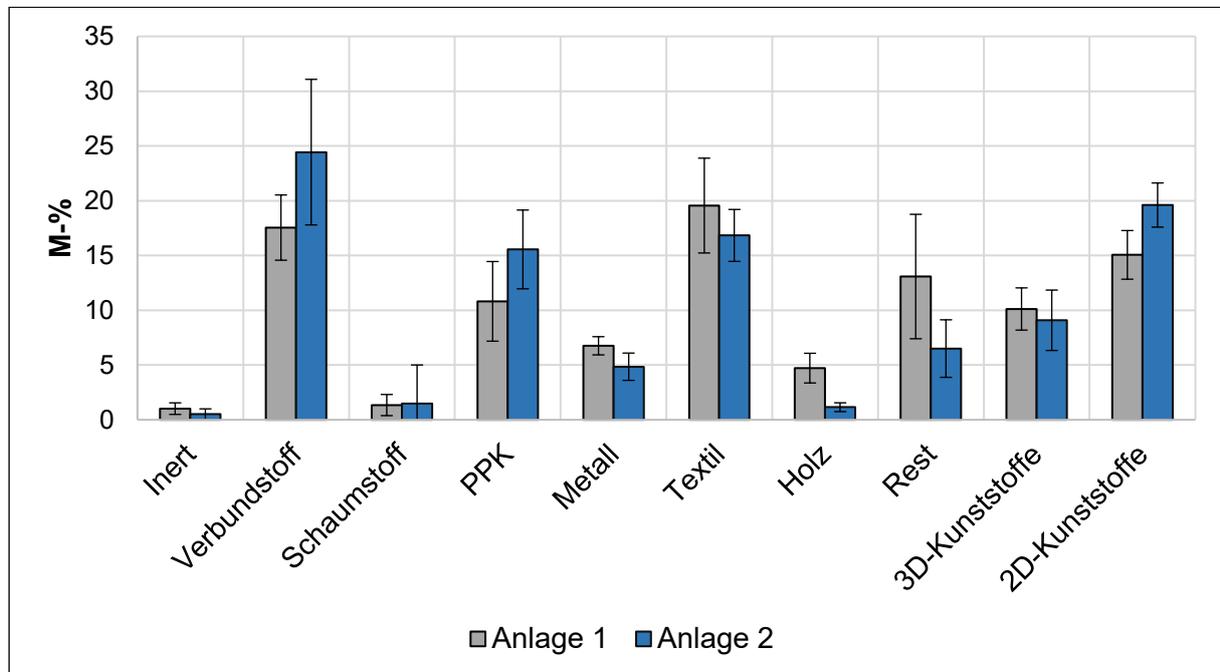


Abbildung 32: Zusammensetzung der 2D-Fraktion im Anlagenvergleich (Restmüll). Säulenhöhe: MW aus Versuch 1 und Versuch 2.

Auch bei diesem Inputmaterial war der Anteil an Textil einer der höchsten. Bei den Proben der Anlage 1 kam Textil im Durchschnitt auf 20 %. Bei den Proben aus Anlage 2 lag der Wert niedriger, mit ca. 17 %. Dieser liegt laut Recherchen zwischen ca. 2 % bis 10 % (vgl. Tabelle 1). Abbildung 33 zeigt sortierte Textil-Fractionen aus dem 2D-Output der Restmüllversuche. Im Gegensatz zu den Textilien aus den Gewerbemüllversuchen war hier der Anteil der Kleidungstextilien mehrheitlich vorhanden.



Abbildung 33: Beispielfotos Restmüll: händisch sortierte Textil-Fractionen aus a) Anlage 1 und b) Anlage 2.

Bei den Kunststoffen konnte der Anteil der 2D-Kunststoffe bei Anlage 2 gegenüber Anlage 1 um mehr als 4 % steigen, während die Vorsiebung den Anteil der 3D-Kunststoffe bei Anlage 2 um ca. 1 % senkte. So konnte für 2D-Kunststoffe in Anlage 2 ein Masseanteil von ca. 19 %, im Gegensatz zu 15 % bei Anlage 1, erzielt werden, während der durchschnittliche Anteil der 3D-Kunststoffe bei Anlage 1 ca. 10 % ausmachte und bei Anlage 2 ca. 9%. Die Senkung des Anteils der 3D-Kunststoffe mit Restmüll, im Gegensatz zur Steigerung des Anteils der 3D-Kunststoffe mit Gewerbemüll, kann auf die unterschiedliche Zusammensetzung der Abfälle und deren Verhalten in den Anlagen zurückgeführt werden. Während sich Objekte aus dem Gewerbemüll um die Maschen wickelten (vgl. Anlage 2 – Gewerbemüll), war bei den Restmüllversuchen nichts Derartiges (Minderung der aktiven Siebfläche) zu erkennen. Die größere aktive Siebfläche in Anlage 2 (bei Restmüll im Gegensatz zu Gewerbemüll) könnte der Grund dafür sein, dass die zerkleinerten 3D-Kunststoffe aus dem Restmüll effektiver abgesiebt wurden als bei Gewerbemüll. In Abbildung 34 sind sortierte Fraktionen von 3D- bzw. 2D-Kunststoffen der Restmüllversuche zu sehen. Der Anteil der 3D-Kunststoffe im 2D-Material ist auch für Restmüll auf die Neigungswinkeleinstellungen des Ballistikseparators zurück zu führen.



Abbildung 34: Beispielbilder Restmüll: händisch sortierte 3D-Fraktionen der a) Anlage 1, b) Anlage 2 und 2D-Fraktionen aus c) Anlage 1 und d) Anlage 2.

Der Massenanteil von PPK war bei Versuchen aus Anlage 1 und 2 im Durchschnitt etwa gleich hoch wie bei Gewerbemüll. Der Unterschied lag an den Abweichungen zum Mittelwert. Die Schwankungsbreite der Abweichungen war geringer als bei Gewerbemüll und bei beiden Anlagen gleich groß. Anders als bei Gewerbemüll ist der erzielte Massenanteil PPK durch Aufbereitung ähnlich dem des unbehandelten Restmülls (vgl. Tabelle 1) und liegt zwischen ca. 11,5 % und ca. 19 %. Es kann somit festgestellt werden, dass durch Vorsiebung bei Restmüll eine Steigerung des PPK-Anteils zu erzielen ist. Die PPK-Objekte wiesen bei beiden Inputmaterialien ähnliche Korngrößen auf (vgl. Beispielfotos von PPK-Fraktionen: Abbildung 30 (Gewerbemüll) und Abbildung 35 (Restmüll)). Viele der PPK-Objekte in den 2D-Fraktionen

waren im Grenzkornbereich (<80 mm). Bei längeren Anlagenzeiten kann erwartet werden, dass sich auch die Anteile des PPK in der 2D-Fraktion ändern können (für Restmüll und Gewerbemüll). Abbildung 35 zeigt die sortierten Inhalte von PPK-Fraktionen aus dem 2D-Output. Ähnlich wie bei den Gewerbemüllproben waren hauptsächlich Zeitungen und Verpackungsmaterial aus PPK enthalten. Zusätzlich befand sich beim Restmüll auch Hygienepapier in der PPK-Fraktion.

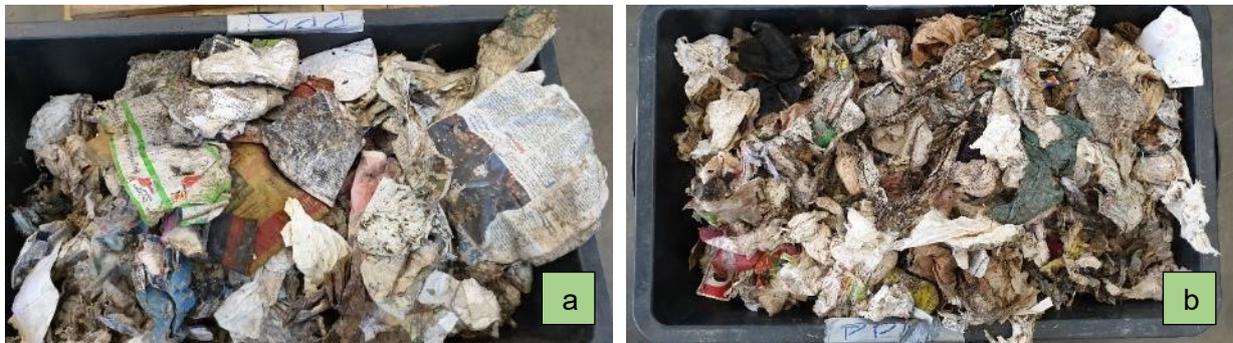


Abbildung 35: Beispielfotos Restmüll: händisch sortierte PPK-Fraktionen aus a) Anlage 1 und b) Anlage 2.

Die Metalle machten 7 % bei Proben aus Anlage 1 und 5 % bei den Proben der Anlage 2 aus. Damit liegen sie im selben Größenbereich wie für nicht behandelte Restmüllströme (vgl. Kapitel 2.1.3.1). In Abbildung 36 sind zwei ausgewählte sortierte Metall-Fraktionen aus dem 2D-Output der Restmüllversuche zu sehen. Man erkennt beispielsweise Dosen oder Stangen. Darüber hinaus fällt der hohe Anteil an Metall-Verbunden mit anderen Stoffen wie Kunststoff auf.



Abbildung 36: Beispielfotos Restmüll: händisch sortierte Metall-Fraktionen aus a) Anlage 1 und b) Anlage 2.

Die Verbundstoffe im Restmüll konnten wie bei Gewerbemüll aufgrund ihrer Geometrie und Eigenschaften nur schwer zerkleinert werden und verblieben dadurch in der 2D-Fraktion. Dadurch steigerte sich auch der Anteil der Verbundstoffe durch Vorsiebung in der 2D-Fraktion, da die Verbundstoffe auch durch die größere Siebfläche nicht abgesiebt werden konnten.

Im Gegensatz zu den Verbundstoffen wurden die Anteile der Reststoffe (<80 mm) und Holz – durch den Einsatz der Vorsiebung – deutlich gesenkt. Der Anteil Rest reduzierte sich im

Durchschnitt von ca. 13 % (Anlage 1) auf ca. 6 % (Anlage 2) und der Anteil Holz wurde von ca. 5 % (Anlage 1) auf ca. 1 % (Anlage 2) verringert. Das ist, wie beim Gewerbemüll, auf die spezifische Zerkleinerung und größere Siebfläche zurückzuführen. Inertstoffe (z.B. Glas) werden im Shredder (ähnlich wie bei Holz) feiner zerkleinert als andere Stoffe (z.B. Verbundstoffe oder Textilien). Dadurch können sie effektiver abgesiebt werden. Somit war der Anteil an Inertstoffen bei allen 2D-Fractionen sehr niedrig (ca. 1 % (Anlage 1) und 0,5 % (Anlage 2)).

Anders als bei Gewerbemüll waren Schaumstoffe bei Restmüll in den 2D-Fractionen beider Anlagen nur in geringen Mengen vorhanden (durchschnittlich ca. 1,5 % bei beiden Anlagen). Das bedeutet, dass entweder weniger Schaumstoff im Restmüll vorhanden war oder die Schaumstoffe besser zerkleinert und abgesiebt werden konnte.

Weitere Beispielfotos von händisch sortierten Fractionen aus Anlage 1 und Anlage 2 der Gewerbemüllversuche sind in „Anhang II – Fotodokumentation“ unter „2D-Fractionen Restmüll – Anlage 1“ und „2D-Fractionen Restmüll – Anlage 2“ zu finden.

4.4 Sensorgestützte Sortierung der 3D-Fractionen

4.4.1 Reinheit der Wertstofffraktionen (3D-Kunststoffe)

In Abbildung 37 sind die Mediane der Reinheitsgrade der aussortierten Wertstofffraktionen (Kunststoffe und Rest-Fehlastrag) aus den 3D-Fractionen (Anlage 1 und Anlage 2) von Gewerbemüll und Restmüll ersichtlich. Die Bereiche zwischen den Quartilen waren bei Restmüll um einige Prozent kleiner als bei Gewerbemüll, aber nicht wesentlich.

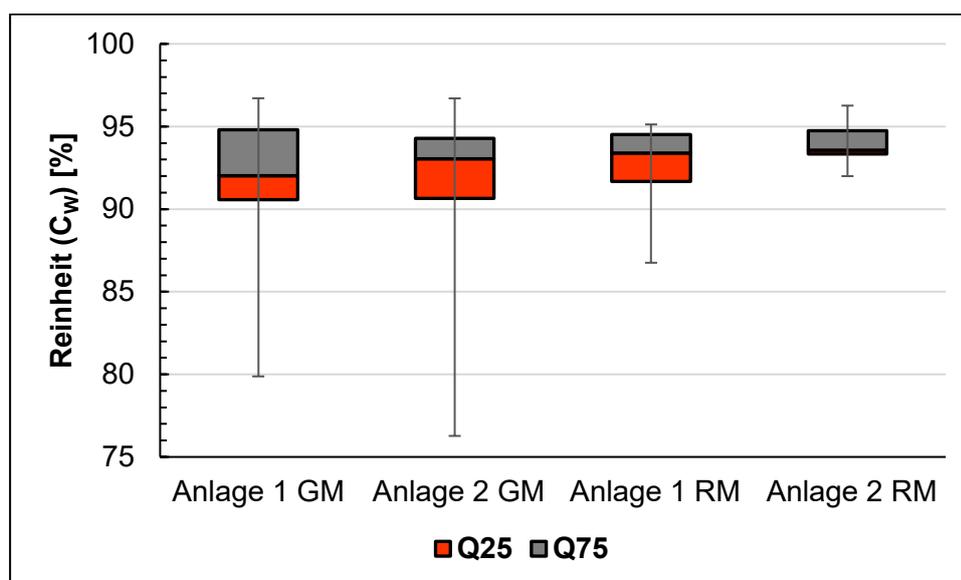


Abbildung 37: Reinheitsgrade der Wertstofffraktionen (3D-Kunststoffe) aus der 3D-Fraktion bei sensorgestützter Sortierung.

Bei den Gewerbemüll-Proben ist eine größere Streuung zu geringeren Reinheitsgraden im Vergleich mit den Restmüll-Proben erkennbar. Reinheitsgrade unter 90 % wurden bei einer von sieben Proben für Anlage 1 und zwei von acht Proben bei Anlage 2, mit Gewerbemüll als Input, festgestellt. Bei den Restmüll-Versuchen aus Anlage 1 erreichten zwei von acht Proben einen Reinheitsgrad von knapp unter 90 %. Gerundet 87 % war der niederste Reinheitsgrad aller Proben für Anlage 1 mit Inputmaterial Restmüll. Bei allen Proben aus Anlage 2 mit Restmüll lag der Reinheitsgrad klar über 90 % (Minimalwert bei 92 %). Das bedeutet, dass eine Steigerung der Reinheit in den Wertstofffraktionen durch Vorsiebung nur bei Restmüll erreicht werden konnte. Bei Gewerbemüll war keine Steigerung der Reinheitsgrade durch Vorsiebung bei sensorgestützter Sortierung zu erkennen.

Die erzielten Reinheitsgrade entsprechen denen von unsortierten gemischten Kunststofffraktionen aus Kunststoffsortieranlagen. Dort werden rund zwei Drittel der sortierten Kunststoffe zu Mischkunststoffen vermengt. Diese Mischkunststofffraktion haben durchschnittlich einen Störstoffanteil von 10 % (Martens & Goldmann, 2016).

Es ist somit festzustellen, dass die Anlagen (1 und 2) geeignet sind, eine geeignete Mischkunststofffraktion aus Gewerbe- und Restmüll für rohstoffliche Recyclingverfahren für

Mischkunststofffraktion unbestimmter Zusammensetzung (vgl. Kapitel 2.2.3 Rohstoffliches Recycling von Mischkunststoffen undefinierter Zusammensetzung) zu erzeugen.

Es wurde kein 2D-Material oder FG in der 3D-Fraktion gefunden, was bedeutet, dass die Einstellung des Neigungswinkels (12,5 °) der Paddel für die Erzeugung einer reinen 3D-Fraktion am Ballistikseparator geeignet war.

4.4.2 Ausbringen der Wertstofffraktion (Kunststoffe und Rest-Fehlaustrag) aus der 3D-Fraktion

In Abbildung 38 sind die Ergebnisse für die Massenanteile an ausgebrachter Wertstofffraktion (Kunststoffe und Rest-Fehlaustrag) aus der 3D-Fraktion durch die NIR-Anlage dargestellt.

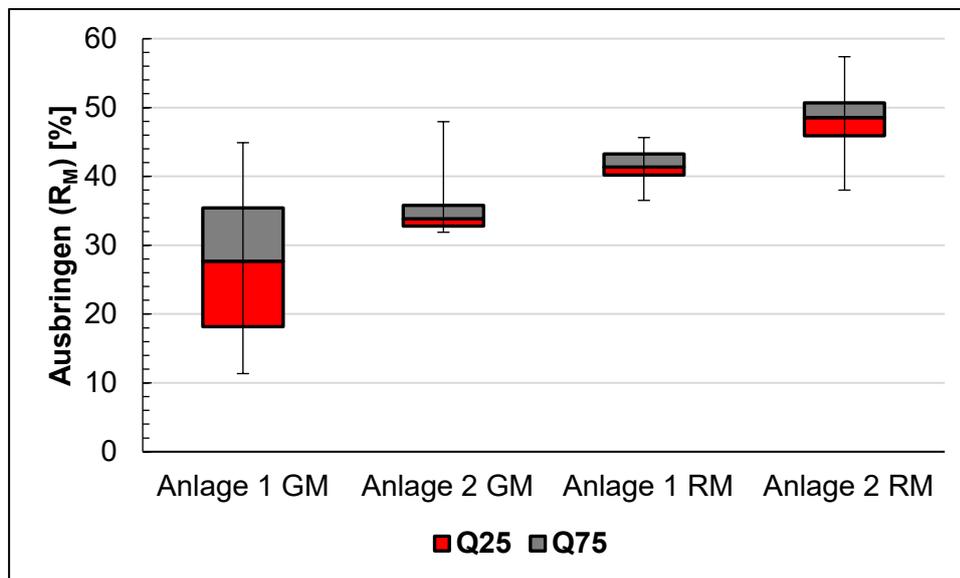


Abbildung 38: Ausbringen der Wertstofffraktionen (3D-Kunststoffe) aus den 3D-Fraktionen bei sensorgestützter Sortierung.

Bei der sensorgestützten Sortierung mittels NIR wurde mehr Wertstoff bei Restmüll erkannt und ausgebracht als bei Gewerbemüll. Die Begründung könnte sein, dass im Restmüll mehr Objekte der 3D-Fraktionen auch 3D-Kunststoffe waren als bei den Objekten der 3D-Fraktionen aus den Gewerbemüllversuchen.

Bei beiden Inputmaterialien waren die Werte für die Ausbringung bei den Anlagen mit Trommelsieb höher (34 % (Gewerbemüll) und 49 % (Restmüll)) als bei den Anlagen ohne (28 % (Gewerbemüll) und 41 % (Restmüll)). Das erklärt sich vermutlich daraus, dass es durch die Drehbewegung des Trommelsiebs und die längere Verweilzeit der Partikel in der Trommel zu mehr Kontakt und Reibung der Partikel (Partikel an Partikel oder Partikel an der Innenwand des Trommelsiebs) kam und sich so oberflächliche Verschmutzungen an den Partikeln abgerieben haben. Dadurch konnten die Objekte in der sensorgestützten Sortierung besser erkannt und in weiterer Folge ausgetragen werden.

Für die Anlagen 1 und 2 mit Gewerbemüll und Anlage 1 mit Restmüll zeigt sich, dass die gewählte Positivsortierung die ökonomisch günstigere Variante ist, da weniger Druckluft gebraucht wird. Bei Anlage 2 mit Restmüll ist die Wahl zwischen Positiv- und Negativsortierung nicht mehr eindeutig, da sich bei zwei der Proben eine Ausbringung an Wertstofffraktion über 50 % (Maximalwert 57 %) ergab.

4.4.3 Wertstoffausbringen (Kunststoffe aus der 3D-Fraktion)

In Abbildung 39 sind die erzielten Ergebnisse an ausgebrachtem Wertstoff (Kunststoff aus der 3D-Fraktion) in die Wertstofffraktion (Kunststoff und Rest-Fehlaustrag) durch die NIR-Anlage abgebildet.

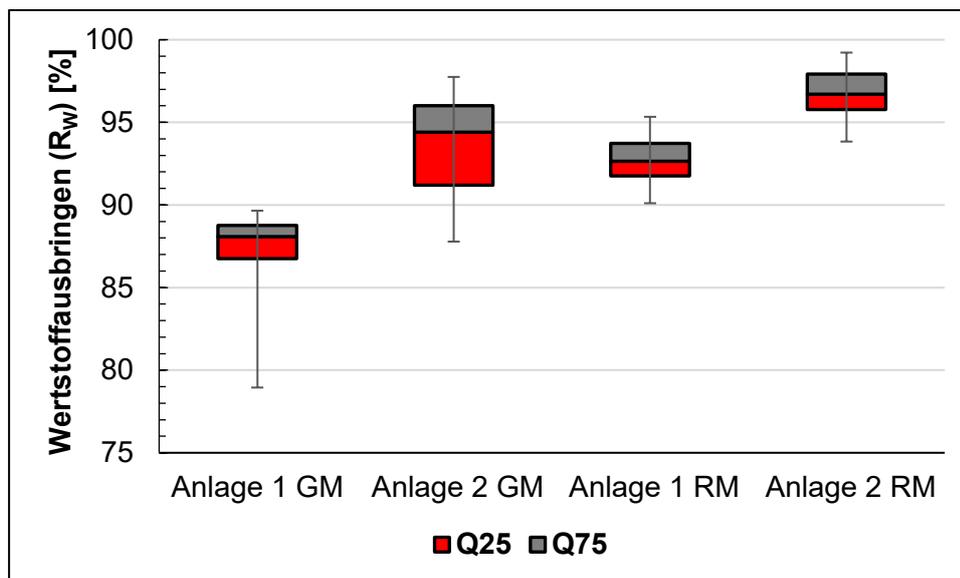


Abbildung 39: Wertstoffausbringen (Kunststoffe aus der 3D-Fraktion) bei sensorgestützter Sortierung.

Die Medianwerte der Wertstoffausbringung sind, bis auf Anlage 1, mit Gewerbemüll als Inputmaterial über 90 %. Bei Anlage 1 mit Gewerbemüll lag der Medianwert bei 88 % und konnte auch bei keinem Maximalwert der insgesamt sieben Proben über 90 % erreichen.

Im Vergleich von durchschnittlichen Raten für Wertstoffausbringung durch NIR-Technologie liegen die Ergebnisse im Bereich des technisch realisierbaren (Anlage 1 (Gewerbemüll)) oder höher (Anlage 2 (Gewerbemüll), Anlage 1 und Anlage 2 (Restmüll)). Je nach Beschaffenheit des Abfalls liegt die Wertstoffausbringung zwischen 80 % und 90 % (Kranert, 2017:244). Es muss jedoch darauf hingewiesen werden, dass bei den Versuchen zu dieser Arbeit eine manuelle Aufgabe (ideale Bedingungen) der 3D-Fractionen, in die NIR-Anlage, realisiert wurde (vgl. Kapitel 3.2.3 NIR-Sortierung der 3D-Fraktion). Diese idealisierte Aufgabe entspricht nicht der Aufgabe eines realen Anlagenbetriebs. Dadurch ist davon auszugehen, dass die Wertstoffausbringung (unabhängig von Anlage und Inputmaterial) im realen Anlagenbetrieb niedriger sein wird.

Das breitere Spektrum der Wertstoffausbringungsraten der Gewerbemüllversuche kann mit den Beobachtungen während der Anlagenversuche zur Vorkonditionierung erklärt werden. Abfälle im Gewerbemüll konnten, aufgrund ihrer Beschaffenheit, nicht gleichmäßig zerkleinert werden (vgl. Kapitel 2.3.1 Zerkleinerung). In den Fehlwürfen der Wertstofffraktion (Rest in Wertstoff) befanden sich mehrheitlich Verbundstoff-Objekte (z.B. beschichtete PPK-Verpackung) (vgl. Abbildung 68). Aus Abbildung 39 ist ebenfalls der Einfluss der Vorsiebung (Anlage 2) auf die Ergebnisse der Wertstoffausbringung ersichtlich. Die größere Siebleistung durch das Trommelsieb (mehr abgeseiebtes FG, das bei sensorgestützter Sortierung zu Falschidentifikation führen kann) wirkt sich bei beiden Inputmaterialien positiv auf den Sortiererfolg durch sensorgestützte Sortierung aus. Für Gewerbemüll konnte die Wertstoffausbringung um 6 % (88 % (Anlage 1) und 94 % (Anlage 2)) gesteigert werden und für Restmüll stieg die Wertstoffausbringung um 4 % (93 % (Anlage 1) und 97 % (Anlage 2)).

4.4.4 Fehlaustrag (Kunststoff in Reststofffraktion)

In Abbildung 40 sind die unterschiedlichen Fehlausträge (Kunststoff aus der 3D-Fraktion in die Reststofffraktion ausgetragen) der Versuche ersichtlich. Die Medianwerte bei den Anlagenversuchen von Gewerbemüll waren leicht niedriger als bei Restmüll, jedoch war die Schwankungsbreite der Minimal- und Maximalwerte größer.

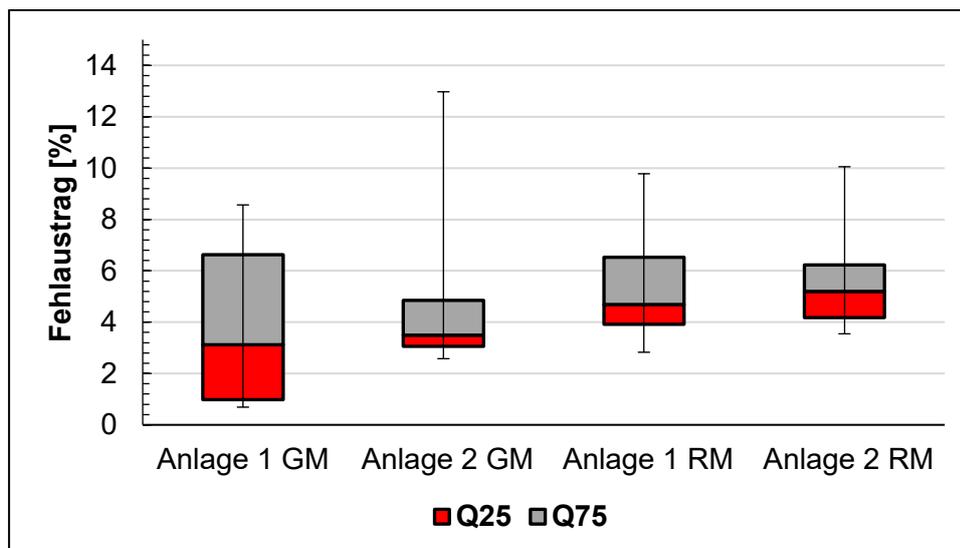


Abbildung 40: Fehlaustrag (Kunststoff in Restfraktion) bei sensorgestützter Sortierung.

Es konnte keine Veränderung bei den Fehlausträgen für Restmüll durch die Vorsiebung beobachtet werden. Bei Gewerbemüll hingegen konnte die Streuung sichtlich geschmälert werden (kleiner Interquartilabstand), auch wenn eine von acht Gewerbemüllproben zu Anlage 2 13 % Fehlausträge aufwies.

Die Fehlausträge können auf Fehlerkennung durch Verunreinigungen an der Objekt Oberfläche, unterschiedlicher Flugverhalten von Objekten, Überlappungen von Objekten oder durch Fehlerkennung von Verbundstoffen im Abfallstrom zurückgeführt werden.

Verpackungsabfälle mit metallischen Beimengungen (z.B. Aluminiumfolie) oder mit Kunststoff beschichtetes Sperrholz waren unter den Fehlwürfen.

Um Fehlwürfe dieser Art zu verhindern werden meist zusätzliche Vorsortierungen durchgeführt. Diese kann den Einsatz von Wirbelstromsortierern oder Magnetabscheidern beinhalten. Dadurch wird nicht nur der Metallgehalt in der Ziel- bzw. Restfraktion vermindert, sondern auch ein zusätzlicher Wertstoff gewonnen. (Martens & Goldmann, 2016:59-60)

Eine weitere Variante, die Fehlwürfe durch Verunreinigungen abzuschwächen, ist der Einsatz von Multisensorik. Dabei werden mittels Röntgensensorik die Schwer- und Leichtmetalle, oder, mithilfe von Induktionssensoren, alle Metalle aussortiert. Ebenfalls könnte eine mehrstufige NIR-Sortierung Fehlwürfe reduzieren. (Martens & Goldmann, 2016:59-60)

Beispielsbilder zu den sortierten Fraktionen durch sensorgestützte Sortierung sind im „Anhang II – Fotodokumentation“ unter „Sensorgestützte Sortierung“ zu finden.

5 Erweiterte Diskussion

5.1 Wertstoffpotentiale in den FG-Fractionen

Für die Abschätzung der Wertstoffanteile in den Feingütern (20-80 mm von FG_B und FG_S) wird auf Ergebnisse der Versuche von Möllnitz et al. (2020) verwiesen. Bei diesen Versuchen wurden ungefähr 21 t Rest- und Gewerbemüll zuerst aufbereitet und anschließend in neun Kornklassen gesiebt. Die drei Kornklassen 20-40 mm, 40-60 mm und 60-80 mm können zur Abschätzung der Kunststoffanteile im Feingut-Output der untersuchten Anlagen herangezogen werden. Die enthaltenen Materialfraktionen in den genannten Kornklassen wurden anschließend per Hand in neun Sortierfraktionen sortiert, darunter auch 3D- sowie 2D-Kunststoffe. Abbildung 41 zeigt die Anteile der Kunststofffraktionen pro Kornklasse für Rest- und Gewerbemüll.

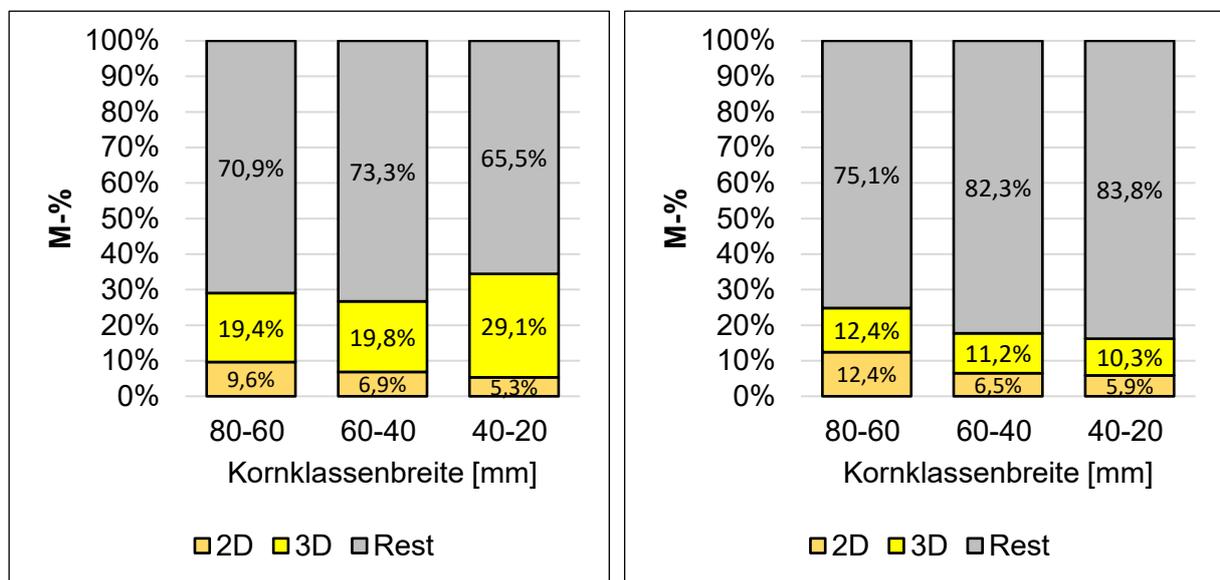


Abbildung 41: Kunststoffanteile im Feingut von Gewerbemüll (links) und Restmüll (rechts) (Möllnitz, et al., 2020).

Die sortierten 2D- und 3D-Kunststofffraktionen wurden mittels NIR-Technologie auf Art des Kunststoffes hin analysiert. Unter den ermittelten Kunststoffarten handelte es sich auch um die Kunststoffe, die bei dieser Arbeit mittels NIR-Sortierung zu einer Mischkunststofffraktion aussortiert wurden (vgl. Kapitel 3.2.3), sowie bis zu acht weiteren Fraktionen (Möllnitz, et al., 2020).

Der Anteil der Kunststoffe gleich der Mischkunststofffraktion (PE-HD, PE-LD, PP, PET, PU, PS, PVC) in den 2D-Kunststoffen mit Gewerbemüll als Input war ca. 70 % für die Kornklasse 20-40 mm, 80 % für die Kornklasse 40-60 mm und 85 % für die Kornklasse 60-80 mm. Die Anteile der Mischkunststoffe in den 3D-Kunststoffen mit Gewerbemüll war ca. 55 % für die Kornklasse 20-40 mm, 60 % für die Kornklasse 40-60 mm und 60 % für die Kornklasse 60-80 mm (Möllnitz, et al., 2020).

Für Restmüll war der Anteil der Mischkunststoffe in der 2D-Kunststofffraktion bei ca. 50 % für die Kornklasse 20-40 mm, 75 % für die Kornklasse 40-60 mm und 70 % für die Kornklasse 60-80 mm. Die Anteile in der 3D-Kunststofffraktion waren ca. 65 % für die Kornklasse 40-20 mm, 60 % für die Kornklasse 60-40 mm und 70 % für die Kornklasse 80-60 mm (Möllnitz, et al., 2020).

Auf Basis der Ergebnisse von Möllnitz et al. (2020) ergeben die Feingutströme aus den in dieser Arbeit durchgeführten Versuchen einen Wertstoffanteil wie in Tabelle 9 gelistet.

Tabelle 9: Theoretischer Wertstoffgehalt (Kunststoffe) in den Feingütern <80 mm .

		GM Anlage 1	GM Anlage 2	RM Anlage 1	RM Anlage
Versuch 1 [M-%]	FG _S 60-80 mm	-	18%	-	19%
	FG _S 40-60 mm	-	18%	-	15%
	FG _S 20-40 mm	-	17%	-	18%
	FG _B 60-80 mm	8%	23%	5%	14%
	FG _B 40-60 mm	13%	23%	14%	17%
	FG _B 20-40 mm	18%	20%	21%	19%
Versuch 2 [M-%]	FG _S 60-80 mm	-	18%	-	21%
	FG _S 40-60 mm	-	17%	-	17%
	FG _S 20-40 mm	-	17%	-	18%
	FG _B 60-80 mm	8%	22%	4%	15%
	FG _B 40-60 mm	20%	21%	13%	15%
	FG _B 20-40 mm	23%	14%	22%	17%
Möllnitz et al. (2020)	KS in GM 60-80 mm	20%			
	KS in GM 40-60 mm	17%			
	KS in GM 20-40 mm	20%			
	KS in RM 60-80 mm	17%			
	KS in RM 40-60 mm	12%			
	KS in RM 20-40 mm	10%			
Versuch 1 [M-%]	KS in FG _S 60-80 mm	-	4%	-	3%
	KS in FG _S 40-60 mm	-	3%	-	2%
	KS in FG _S 20-40 mm	-	3%	-	2%
	KS in FG _B 60-80 mm	2%	5%	1%	2%
	KS in FG _B 40-60 mm	2%	4%	2%	2%
	KS in FG _B 20-40 mm	4%	4%	2%	2%
Versuch 2 [M-%]	KS in FG _S 60-80 mm	-	4%	-	4%
	KS in FG _S 40-60 mm	-	3%	-	2%
	KS in FG _S 20-40 mm	-	3%	-	2%
	KS in FG _B 60-80 mm	2%	4%	1%	3%
	KS in FG _B 40-60 mm	3%	4%	2%	2%
	KS in FG _B 20-40 mm	5%	3%	2%	2%
Gesamt [M-%]	KS in FG _S (Versuch 1)	-	10%	-	7%
	KS in FG _B (Versuch 1)	7%	12%	5%	6%
	KS in FG _S (Versuch 2)	-	10%	-	7%
	KS in FG _B (Versuch 2)	10%	11%	4%	6%

Tabelle 9 listet in den ersten zwei Absätzen (Versuch 1 (weiß) und Versuch 2 (grau)) die Anteile der jeweiligen Kornklasse am Gesamtstrom der FG (FG_S und FG_B) auf. Bei den theoretischen Kunststoffanteilen (Möllnitz et al. (2020)) handelt es sich um die Anteile der Kunststoffe PE-HD, PE-LD, PP, PET, PU, PS und PVC, in den jeweiligen Kornklassen. In Folge wurden die theoretischen Anteile an Kunststoff in den FG (FG_S und FG_B) berechnet. Die Ergebnisse zeigen, dass es bei den FGB wahrscheinlich zu einer Erhöhung des Kunststoffanteils durch Vorsiebung kommt (zwischen 1-5 % bei Gewerbemüll und zwischen 1-2 % bei Restmüll). Im Vergleich der Inputmaterialien kann angenommen werden, dass für die FG des Gewerbemülls ein größeres Wertstoffpotential zu erwarten ist als bei Restmüll. Bei Anlage 1 sind die Kunststoffanteile im FGB bei Gewerbemüll von ca. 2 % (Versuch 1) bis ca. 6 % (Versuch 2) höher als bei Restmüll. Bei Anlage 2 sind die Kunststoffanteile sogar um ca. 10-11 % höher.

5.2 Verwertungswege für Kunststoffe aus den FG- und 2D-Fraktionen

Um die Kunststoffe der FG- und 2D-Fraktionen aus dem Rest- bzw. Gewerbemüll zu verwerten, sind folgende Strategien möglich.

5.2.1 Mechanische Aufbereitung

In der Literatur werden folgende drei Möglichkeiten zur Sortierung von Kunststoffen aus gemischten Fraktionen empfohlen: Sortieren nach mechanischen Eigenschaften, sensorgestützte Sortierung und Dichtesortierung (Martens & Goldmann, 2016).

Sortierung nach mechanischen Eigenschaften ist im Fall der FG- und 2D-Fraktionen nicht ohne Vorkonditionierung (z.B. Fe- und NE-Abscheidung, Zerkleinerung, Siebung etc.) anzuwenden, da die geometrischen Dimensionen der Körner ohne weitere Vorkonditionierung zu ähnlich sind für die Sortierung auf Aggregaten wie Siebband oder Ballistikseparator (vgl. Vorkonditionierung für Ballistikseparator in Kapitel 3.1). Das gewünschte Trennergebnis für eine gemischte Kunststofffraktion (Reinheitsgrade von mindestens 90 %) ist mit reiner Trennung nach mechanischen Eigenschaften ökonomisch nur schwer zu erreichen (Martens & Goldmann, 2016).

Eine sensorgestützte Sortierung ist ebenfalls auszuschließen (Martens & Goldmann, 2016). Zum einen ist für diese Art der Sortierung die Korngröße quer durch die gesamte Feingutfraktion zu breit verteilt. Für hohe selektive Sortierung mittels Sensorik müssten die Korngrößenbereiche enger sein. Bereiche von beispielsweise (Martens & Goldmann, 2016):

- 2 mm bis 10 mm,
- 10 mm bis 60 mm oder
- 20 mm bis 80 mm.

Vergleicht man nun die aus der Fachliteratur ausgegebenen Korngrößenbereiche mit den Verteilungen der Feingutfraktionen aus den Anlagenversuchen (vgl. Abbildung 23 bis

Abbildung 26), ist ersichtlich, dass die sensorgestützte Sortierung erst nach zusätzlichen Aufbereitungsschritten (z.B. durch neuerliche Siebung oder mehrere Sortiereinheiten für unterschiedliche Größenbereiche) wäre. Für die 2D-Fractionen ist festzuhalten, dass die Vereinzelung der Stoffgemenge schwierig wäre und das Flugverhalten von 2D-Materialien nicht geeignet ist für eine sensorgestützte Sortierung (vgl. Kapitel 2.3.4). Deshalb müssten die 2D-Fractionen vor einer sensorgestützten Sortierung entsprechend vorkonditioniert werden – beispielsweise eine Zerkleinerung mit anschließender Siebung (z.B. FG (<20 mm)), um geeignete Korngrößenbereiche für die Sortierung (z.B. 20 mm bis 80 mm) zu schaffen.

Die letzte noch nicht ausgeschlossene Sortiervariante ist die Trennung nach Dichte. Diese verlangt ebenfalls eine Vorkonditionierung zu einer einheitlichen Korngröße (Martens & Goldmann, 2016:45-47). Dichtesortierung wird grob in zwei Varianten unterteilt. Eine Sortierung in Trocken- und Nass-Verfahren, je nachdem ob das Trennmedium Luft oder eine Flüssigkeit ist. Das Trennprinzip (mit Trennmedium Wasser) beruht auf der Trennung von Partikel unterschiedlicher Dichte im Trennmedium, das eine Dichte im Bereich zwischen den Dichten der zu trennenden Partikeln aufweist (Martens & Goldmann, 2016:45-47). Die Dichten bestimmter Stoffe im Vergleich zur Dichte des Trennmediums Wasser ist in Abbildung 42 ersichtlich.

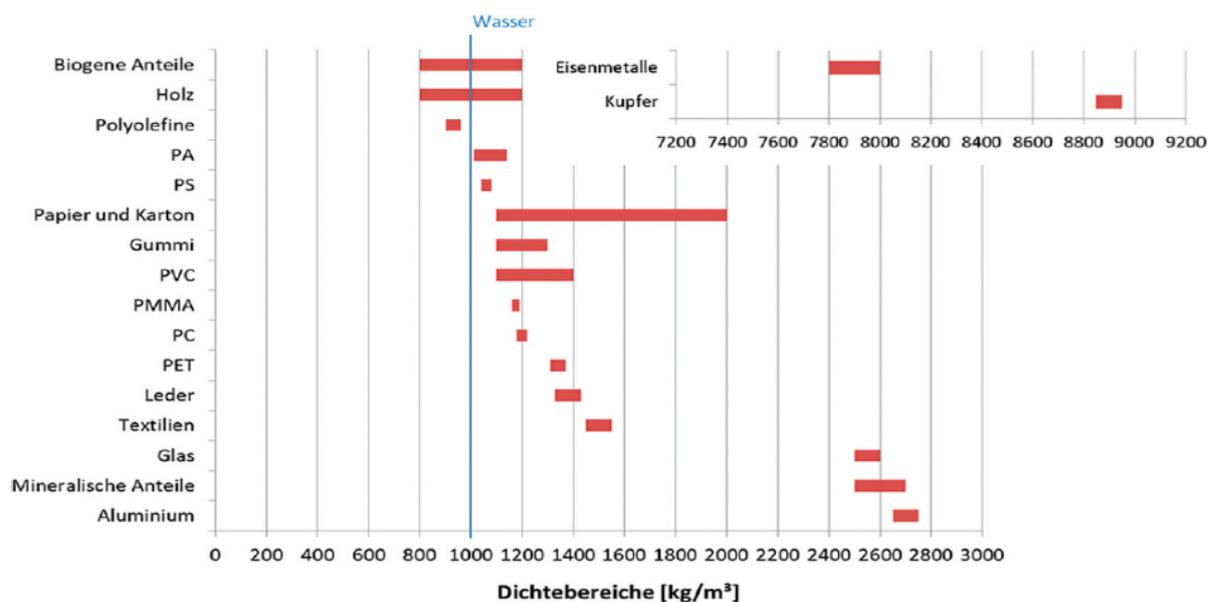


Abbildung 42: Stoffdichten unterschiedlicher Materialfraktionen aus Rest- und Gewerbemüll im Vergleich zu Wasser (Bauer, et al., 2017:448).

In Abbildung 42 ist ebenfalls gut zu erkennen, wie geeignet dieses Sortierverfahren ist, um PVC abzutrennen. Gleichzeitig werden bei Nass-Verfahren auch die oberflächlichen Verschmutzungen entfernt oder zumindest reduziert (Bauer, et al., 2017:447-449).

Die negativen Aspekte der Nass-Dichtesortierung sind eine anschließende Entwässerung, eventuelle Trocknung und Aufbereitung des Prozesswassers. Der Umfang hängt vom

nachfolgenden Aufbereitungs- bzw. Verwertungsweg ab, ist aber mit nicht vernachlässigbarem Kostenaufwand verbunden (Bauer, et al., 2017:447-449).

In Bauer et al. (2017) wurde eine Anlage mittels zweistufiger Dichtesortierung getestet. Ziel der Anlage ist eine Abtrennung von Polyolefinen (PO) aus polyolefinhaltigen Abfällen. Zuerst wird der Abfall auf <20 mm Korngröße zerkleinert, um anschließend in einer Setzmaschine vorsortiert zu werden. Dabei entsteht eine Schwergutfraktion (SGF), die hauptsächlich aus Fe- und NE-Metallen besteht. Der Anteil nicht-SGF durchläuft eine Aufbereitung in einem Entwässerungssieb, bevor sie in den zwei nachfolgenden Zentrifugalkraftscheidern in eine Mittulgutfraktion (MGF) und eine Leichtgutfraktion (LGF) getrennt wird. Die MGF besteht aus hauptsächlich heizwertreichen Stoffen und eignet sich daher gut für eine thermische Verwertung. Die LGF (überwiegend PO und PS) kann als Inputmaterial für bestimmte Verfahren des rohstofflichen Recyclings (z.B. Alkohololyse, thermische- oder katalytische Spaltung, etc.) genutzt werden (Bauer, et al., 2017:450-457).

5.2.2 Erzeugung von heizwertreichen Fraktionen

Die technischen Sortierverfahren, um heizwertreiche Fraktionen aus Restmüll oder Gewerbemüll zu gewinnen, sind in Österreich Stand der Technik (vgl. Kapitel 2.1.5). Diese Aufbereitungswege können auch weiterhin für die Verwertung der 2D- und Feingutfractionen genutzt werden. Die Aufbereitungsarten umfassen Zerkleinerung und Vorsiebung (Martens & Goldmann, 2016:523). Diese Schritte wurden schon von den Aggregaten der getesteten Anlagen vollzogen. Im Anschluss wird die Fe-Fraktion durch Magnetsortierung abgetrennt. In einer zweiten Siebklassierung wird Feingut weiter abgetrennt (Martens & Goldmann, 2016:523). Dieser Schritt konnte ebenfalls durch die Perforation der Paddel am Ballistikseparator schon vorgenommen werden (vgl. Kapitel 2.3.3). Mit Windsichtung wird anschließend das LGF aus dem Material aussortiert und Störstoffe mit sensorgestützter Sortierung entfernt. Die SGF kann mit induktiver Sortierung in Kunststoffe und NE-Metalle getrennt werden (Martens & Goldmann, 2016:523).

5.2.3 Manuelle Sortierung

Aufgrund der hohen Anteile von Kunststoff (3D- und 2D-Kunststoffe) in den 2D-Fractionen ist eine mögliche visuelle Beurteilung mit anschließender manueller Sortierung eine weitere Möglichkeit, Wertstoffe zu gewinnen. Inline-Sortierungen in klimatisierten Sortierkabinen sind unter anderem in einigen MBA-Anlagen in Österreich schon seit längerem Teil der mechanischen Aufbereitung. Problematische Faktoren dieser Sortierung sind allerdings verschiedenste Kosten und Aufwände (z.B. Lohnkosten, Arbeitsschutzmaßnahmen, etc.), weshalb die manuelle Sortierung nicht mehr oft eingesetzt wird.

5.3 Theoretischer Einsatz der Anlagen in Österreich

Es kann allgemein festgestellt werden, dass mit der alleinigen Ausbeute der Kunststoffe aus der 3D-Fraktion ein geringer Anteil an Kunststoff aus Rest- und Gewerbemüll aussortiert werden kann – im Gegensatz zum gesamten Anteil an Kunststoffen in den Inputmaterialien.

Ein großer Anteil der Kunststoffe ist nachweislich (Handsortierung) in der 2D-Fraktion, oder, laut Untersuchungen (vgl. Möllnitz et al. (2020)), im Feingut zu finden. Wie die Ergebnisse der Arbeit zeigen, ist eine zusätzliche Aufbereitung der beiden anderen Ströme möglich und sollte durchgeführt werden (vgl. Kapitel 5.2 Verwertungswege für Kunststoffe aus den FG- und 2D-Fraktionen).

Für eine Sortierung von Altkunststoffen aus Rest- und Gewerbemüll – ähnlich der Anlage 2 aus den Versuchen zu dieser Arbeit – ist eine Erweiterung von MBA-Anlagen durch einen ballistischen Separator und einer sensorgestützten Sortieranlage vorzusehen. Auch für eine Reststoffaufbereitungsanlage wie am Standort Linz ist diese Erweiterung ein möglicher Schritt. Die vorherigen Aggregate (Shredder und Trommelsieb) sind bereits in den genannten Anlagen vorhanden. Die Kunststoffe aus den FG- und 2D-Fraktionen können zu heizwertreicher Fraktion verarbeitet oder ebenfalls aussortiert werden (vgl. Kapitel 5.2 Verwertungswege für Kunststoffe aus den FG- und 2D-Fraktionen). Für eine derartige Sortiertiefe braucht es allerdings größere Investitionsleistungen als bei der einfachen Erweiterung. Darüber hinaus müsste auch der Markt für Abnehmer für solche Mengen erst ausgebaut werden (vgl. Kapitel 2.2.3 Rohstoffliches Recycling von Mischkunststoffen undefinierter Zusammensetzung). Würde man nämlich den gesamten Restmüll aus dem Jahre 2018 (1.722.000 t (BMNT, 2020:20)) durch die getestete Anlage 1 aufbereiten, würde die Menge an gewonnener Mischkunststofffraktion (3D-Kunststoffe) (mit mittleren Störstoffanteil von ca. 6 %; vgl. Kapitel 4.4.1 Reinheit der Wertstofffraktionen (3D-Kunststoffe)) rund 35.301 t betragen. Für Anlage 2 wäre die Jahresmenge rund 25.313 t schwer (mit mittleren Störstoffanteil von ca. 6 %; vgl. Kapitel 4.4.1 Reinheit der Wertstofffraktionen (3D-Kunststoffe)). Der Jahreseinsatz an Altkunststoffen als Ersatzreduktionsmittel in der Voestalpine lag jedoch bei 9.037 t im Jahr 2015 (vgl. Kapitel 2.2.3.1 Ersatzreduktionsmittel im Hochofen). Das ist allerdings die gegenwärtig größte Anlage ihrer Art für rohstoffliches Recycling von Altkunststoffen (unbestimmter Zusammensetzung) in Österreich. Anlagen, die andere Verfahren des rohstofflichen Recyclings betreiben, sind in Österreich nur im Modellmaßstab vorhanden und recycelten im Jahr 2018 insgesamt knapp 800 t Altkunststoffe auf rohstoffliche Art (BMNT, 2020:132). Daher gilt es für eine zusätzliche Sortiertiefe, zwecks rohstofflichen Recyclings, erst, geeignete Absatzwege zu finden. Es gibt kommerzielle Anlagen für rohstoffliches Recycling, jedoch befinden sich diese nicht in Österreich (Lechleitner, et al., 2020). Wie es die ARA schon in ihrem Nachhaltigkeitsbericht aus 2019 formuliert hat, ist ein größerer Einsatz von rohstofflichem Recycling unter den gegenwärtigen Verfügbarkeiten an Anlagen noch „Zukunftsmusik“.

6 Zusammenfassung

Die Ergebnisse dieser Arbeit zeigen, dass eine 3D-Mischkunststofffraktion aus Rest- und Gewerbemüll mit den untersuchten Anlagenkonstellationen (Anlage 1 und Anlage 2) aussortiert werden kann (vgl. Kapitel 4.4). Für den Inputstrom Gewerbemüll muss allerdings darauf verwiesen werden, dass die Anforderung an stofflicher Reinheit (vgl. Abbildung 37) bei wenigen Proben Abweichungen weit unter dem maximal akzeptierbaren (max. 10 % Störstoffe) zu verzeichnen hatte, unabhängig davon ob eine Vorsiebung stattfand oder nicht. Bei den Restmüllversuchen wurden keine großen Abweichungen bezüglich Reinheit bemerkt und bei Anlage 2 mit Restmüll als Input trat bei keiner einzigen Probe eine Reinheit unter 92 % auf. Weiters konnte festgestellt werden, dass sich für beide Inputmaterialien die Wertstoffausbringung (vgl. Abbildung 39) bei einer Vorsiebung (Anlage 2) erhöhte.

Über die Anteile an Kunststoffen (2D und 3D) in den untersuchten 2D-Fractionen kann festgestellt werden, dass bei allen Versuchen der durchschnittliche Kunststoffanteil deutlich über 20 % war und Kunststoff bei der 2D-Fraktion mit Gewerbemüll aus Anlage 2 sogar 33 % ausmachte. Mögliche Aufbereitungsvarianten wären eine mechanische Aufbereitung, eine Aufbereitung samt Einsatz als heizwertreiche Fraktion und eine manuelle Sortierung. Diese Varianten sind in „Kapitel 5.2 Verwertungswege für Kunststoffe aus den FG- und 2D-Fractionen“ beschrieben und diskutiert. Mögliche Untersuchungen und Arbeiten diesbezüglich könnten die Erkenntnisse aus dieser Arbeit ergänzen und die Verwertungsoptionen von Kunststoffen aus Rest- und Gewerbemüll aus den Anlagen 1 und Anlage 2 erweitern. Weiters soll im Hinblick auf die Ergebnisse der Sortieranalysen festgehalten werden, dass große Anteile von Textilien in den 2D-Fractionen festgestellt wurden (vgl. Abbildung 27 und Abbildung 32). Mit Anteilen – abhängig von Inputmaterial und Anlage – von etwa 16 % bis 22 %, sind Untersuchungen zur Sortierung dieser Anteile zukünftig interessant – auch unter der Berücksichtigung, dass die europäische Union auch in ihrem neuen Aktionsplan eine hohe Quote bei der Sammlung und eine verstärkte Wiederverwendung und Recycling von Textilien fordert (EU, 2020:12).

Für die FG ist festzustellen, dass die Mehrheit der Partikel eine Korngröße <10 mm aufwies. Für die Partikel der größeren Korngrößen (>10 mm) konnten viele bunte Partikel (vgl. Abbildung 49.2) darunter gefunden werden (v.a. bei den FG_B beider Inputmaterialien), was auf einen möglichen hohen Anteil an Kunststoffen schließen lässt. Die erweiterte Diskussion der Ergebnisse mit den Untersuchungen von Möllnitz et al. (2020) lässt den Schluss zu, dass sich Gewerbemüll vermutlich besser als Restmüll für eine Rückgewinnung von feinen Kunststoffpartikeln eignet. Für die $FG <10$ mm aus Restmüll ist aufgrund optischer Beurteilung ein höherer Anteil an Inertmaterial oder Organik zu erwarten.

Auf die Frage, welche Anlage schlussendlich zu bevorzugen ist, gilt festzustellen, dass die Anlagenvariante 2 mit Vorsiebung – in Bezug auf die Mischkunststofffraktion aus beiden Inputmaterialien – die Reinheit nicht nur erhöht, sondern auch Schwankungsbreiten minimiert. Speziell für Restmüll sind die sehr schmalen Schwankungsbreiten der Reinheit äußerst positiv zu beurteilen. Die Wertstoffausbringung (vgl. Abbildung 39) wurde auch durch Vorsiebung für

beide Inputmaterialien erhöht. Die bei der Vorsiebung bemerkte Zopfbildung (vgl. Kapitel 4.1.2) bei den Gewerbemüllversuchen hatte keine Auswirkung auf die Mischkunststofffraktion – unabhängig vom Inputmaterial und Anlagenvariante – in ihrer Reinheit oder Wertstoffausbringung. Die Minderung der effektiven Siebfläche durch Umwicklung der Siebtrommel hatten, wie die Berechnungen (vgl. Tabelle 8) zeigen, zu keiner nachhaltigen Verminderung der Siebwirkung beigetragen.

7 Verzeichnisse

7.1 Literatur

ARA, 2019. Aktionsfelder Kreislaufwirtschaftsziele. Altstoff Recycling Austria AG, Wien. Online unter: www.ara.at/kreislauf-wirtschaft. Zugriff am: Mai 2020.

ARA, 2019. Transparenz- und Nachhaltigkeitsbericht 2019. Altstoff Recycling Austria AG, Wien. Online unter: www.ara.at/kreislauf-wirtschaft. Zugriff am: Mai 2020.

Bauer, M., Lehner, M., Schwabl, D., Flachberger, H., Kranzinger, L., Pomberger, R., Hofer, W., 2017. Bestandsaufnahme und mögliche Perspektiven der nass-mechanischen Aufbereitung von Altkunststoffen für das rohstoffliche Recycling. Österreichische Wasser- und Abfallwirtschaft 69:446-459. doi:10.1007/s00506-017-0420-1. Zugriff am: März 2020.

BGBl. I Nr. 192/2002, 2020. Abfallwirtschaftsgesetz 2002. Bundesrepublik Österreich, Wien. Zugriff am: März 2020.

BGBl. I Nr. 299/1989, 2020. Bundesgesetz vom 7. Juni 1989 zur Finanzierung und Durchführung der Altlastensanierung (Altlastensanierungsgesetz). Bundesrepublik Österreich, Wien. Zugriff am: 24. Juni 2020.

BGBl. II Nr.184/14, 2020. Verordnung des Bundesministers für Land- und Forstwirtschaft, Umwelt und Wasserwirtschaft über die Vermeidung und Verwertung von Verpackungsabfällen und bestimmten Warenresten, Bundesrepublik Österreich, Wien. Zugriff am: März 2020.

BMNT, 2017. Bundesabfallwirtschaftsplan 2017 – Teil I, Bundesministerium für Nachhaltigkeit und Tourismus, Wien. Zugriff am: April 2020.

BMNT, 2019. Die Bestandsaufnahme der Abfallwirtschaft in Österreich – Statusbericht 2019, Bundesministerium für Nachhaltigkeit und Tourismus, Wien. Zugriff am: April 2020.

BMNT, 2020. Die Bestandsaufnahme der Abfallwirtschaft in Österreich – Statusbericht 2020, Wien: Bundesministerium für Klimaschutz, Umwelt, Energie, Mobilität, Innovation und Technologie, Wien. Zugriff am: 24. Juni 2020.

BMU, 2018. Abfallwirtschaft in Deutschland 2018, Berlin: Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und nukleare Sicherheit. Zugriff am: April 2020.

Brunner, P. H., & Laner, D., 2008. Kriterien zur Trennung von Siedlungsabfall aus Industrie und Gewerbe als Voraussetzung zur Zuordnung zu Behandlungsverfahren. Technische Universität Wien, Wien. Zugriff am: April 2020.

- Dehne, I., Oetjen-Dehne, R., Kanthak, M., 2011. Aufkommen, Verbleib und Ressourcenrelevanz von Gewerbeabfällen. Umweltbundesamt Deutschland, Dessau-Roßlau. Zugriff am: April 2020.
- EU, 2018. Richtlinie zur Änderung der Richtlinie 94/62/EG über Verpackungen und Verpackungsabfälle. EU, Brüssel. Zugriff am März 2020.
- EU, 2020. Ein neuer Aktionsplan für die Kreislaufwirtschaft - Für ein sauberes und wettbewerbsfähiges Europa. EU, Brüssel. Zugriff am April 2020.
- Eurostat, 2020. Municipal waste by waste management operations, EU, Brüssel. Online unter: ec.europa.eu/eurostat/web/waste/data/database. Zugriff am: April 2020.
- Eurostat, 2020. Recycling von Verpackungsabfällen nach Art der Verpackung. EU, Brüssel. Online unter: ec.europa.eu/eurostat/web/waste/data/database. Zugriff am: April 2020.
- Eurostat, 2020. Recyclingquote von Siedlungsabfällen. EU, Brüssel. Online unter: ec.europa.eu/eurostat/web/waste/data/database. Zugriff am: April 2020.
- Feil, A., Coskun, E., Bosling, M., Kaufeld, S., Pretz, T., 2019. Improvement of the recycling of plastics in lightweight packaging treatment plants by a process control concept. Waste management & research: the journal of the International Solid Wastes and Public Cleansing Association, ISWA 37 (2), pp. 120–126. DOI:10.1177/0734242X19826372. Zugriff am: März 2020.
- Friedrich, K., Möllnitz, S., Holzschuster, S., Pomberger, R., Sarc, R., 2019. Benchmark analysis for plastic recyclates in austrian waste management. Detritus In Press:1. doi:10.31025/2611-4135/2019.13869. Zugriff am: Mai 2020.
- Hietler, P., 2019. Ergebnisse der Restabfallanalyse OÖ 2018/2019. Im Rahmen der Kommunalen Abfallwirtschaftstagung OÖ vom 18. Juni 2019 in Linz. pulswerk GmbH, Wien. Zugriff am: 9. Juni 2020.
- Hietler, P., & Pladerer, C., 2019. Restabfallanalyse Salzburg 2019. Auftraggeber: Land Salzburg, Abteilung 5 – Natur- und Umweltschutz Gewerbe. pulswerk GmbH, Wien. Zugriff am 9. Juni 2020.
- Komptech, 2020. Produktbeschreibung Terminator. Online unter: www.komptech.com, Frohnleiten. Zugriff am: 20. April 2020.
- Komptech, 2018. Originalbetriebsanleitung Terminator 5000s. Komptech GmbH, Frohnleiten. Zugriff am: 29. Mai 2020.
- Komptech, 2018. Originalbetriebsanleitung Nemus 2700. Komptech GmbH, Frohnleiten. Zugriff am: 29. Mai 2020.

- Kranert, M., 2017. Einführung in die Kreislaufwirtschaft. Springer Fachmedien, Wiesbaden. Zugriff am: April 2020.
- Kukla, 2019. Technisches Datenblatt Bandwaage. Kukla Weighing Technology. Zugriff am: 29. Mai 2020.
- Lechleitner, A., Schwabl, D., Schubert, T., Bauer, M., Lehner, M., 2020. Chemisches Recycling von gemischten Kunststoffabfällen als ergänzender Recyclingpfad zur Erhöhung der Recyclingquote. Österreichische Wasser- und Abfallwirtschaft 72:47-60. Doi:10.1007/s00506-019-00628-w. Zugriff am: Mai 2020.
- Linz AG, 2020. Reststoffaufbereitungsanlage. Online unter: www.linzag.at, Linz. Zugriff am: 20. April 2020.
- Martens, H., & Goldmann, D., 2016. Recyclingtechnik. Springer Vieweg, Wiesbaden. Zugriff am: April 2020.
- Möllnitz, S., Khodier, K., Pomberger, R., Sarc, R., 2020. Grain size dependent distribution of different plastic types in coarse shredded mixed commercial and municipal waste. Waste Management, New York 103:388-398. doi:10.1016/j.wasman.2019.12.037. Zugriff am: März 2020.
- PlasticsEurope, 2019. An analysis of European plastics production, demand and waste data. PlasticsEurope Deutschland e.V., Brüssel. Online unter: www.plasticseurope.org. Zugriff am: April 2020.
- Ritgen, U., 2020. Infrarotspektroskopie. Analytische Chemie I., Springer Spektrum, Berlin:233-241. Zugriff am: April 2020.
- RL 2000/532/EG, 2000. Richtlinie über ein Abfallverzeichnis. EU, Brüssel. Zugriff am: März 2020.
- RL 2008/98/EG, 2008. Richtlinie über Abfälle. EU, Brüssel. Zugriff am: März 2020.
- RL 2018/851/EG, 2018. Richtlinie zur Änderung der Richtlinie 2008/98/EG über Abfälle. EU, Brüssel. Zugriff am: März 2020.
- Stadler, 2018. Betriebsanleitung Ballistikseparator. STADLER Anlagenbau GmbH, Altshausen. Zugriff am: 29. Mai 2020.
- Stadler, 2016. Versandzeichnung STT5000_6_1. STADLER Anlagenbau GmbH, Altshausen. Zugriff am: 29. Mai 2020.
- UBA, 2006. Ist-Stand der MBA in Österreich. Umweltbundesamt GmbH, Wien. Online unter: www.umweltbundesamt.at. Zugriff am: Mai 2020.

UBA, 2017. Kunststoffabfälle in Österreich – Aufkommen und Behandlung. Umweltbundesamt GmbH, Wien. Online unter: www.umweltbundesamt.at. Zugriff am: Mai 2020.

Voestalpine, 2020. Ersatzreduktionsmittel. Online unter: www.voestalpine.com. Zugriff am: 12. Mai 2020.

7.2 Abkürzungsverzeichnis

%	Prozent
Σ	Summe
°	Grad
°C	Grad Celsius
2D	Zweidimensional
3D	Dreidimensional
a	Jahr
abh.	abhängig
Austragsl.	Austragsleistung
BW	Bandwaage
cm	Centimeter
CO	Kohlenmonoxid
Drehgeschw.	Drehgeschwindigkeit
EBS	Ersatzbrennstoff
etc.	et cetera
EWC	European Waste Catalogue
Fe	Eisen
FG	Feingut
FG _B	Feingut aus dem Ballistikseparator
FG _S	Feingut aus der Siebmaschine
GM	Gewerbemüll
kg	Kilogramm
l	Liter
M-%	Massenprozent/ prozentueller Massenanteil
m ²	Quadratmeter
mm	Millimeter
M _R	Masse Rest
M _{RR}	Masse Rest in Restfraktion
M _{RW}	Masse Rest in Wertstofffraktion
MW	Mittelwert
M _W	Masse Wertstoff
M _{WR}	Masse Wertstoff in Restfraktion
M _{WW}	Masse Wertstoff in Wertstofffraktion
NE	Nichteisen
Neigungsw.	Neigungswinkel

NIR	Nahinfrarotspektroskopie
PO	Polyolefine
PPK	Papier, Pappe und Kartonagen
Q25	25-%-Quartil
Q75	75-%-Quartil
RM	Restmüll
Schnittspaltbr.	Schnittspaltbreite
STABW	Standardabweichung
t	Tonne
t/a	Tonnen pro Jahr
u.a.	unter anderem
Umin ⁻¹	Umdrehungen pro Minute
v.a.	vor allem
v.o.l.n.u.r	von oben links nach unten rechts
v.o.n.u.	von oben nach unten
vgl.	vergleiche
z.B.	Zum Beispiel
z.Z.	zur Zeit
η	Wirkungsgrad

7.3 Tabellen

Tabelle 1: M-% ausgewählter Fraktionen im Restmüll und Geschäftsmüll (BMNT 2019, Hietler 2019, Hietler & Pladerer 2019).....	10
Tabelle 2: M-% ausgewählter Fraktionen von Gewerbeabfällen (Brunner & Laner, 2008). ...	11
Tabelle 3: Maschineneinstellungen der verwendeten Aggregate.	25
Tabelle 4: Gezogene Probenanzahl und Gewicht der Anlagenversuche.	28
Tabelle 5: Tabellarische Darstellung der Versuchswoche.....	29
Tabelle 6: Fraktionen der 2D-Sortierfraktionen.	31
Tabelle 7: Ergebnisse der Anlagenbilanzen.....	35
Tabelle 8: Siebwirkungsgrade der Aggregate bei Versuch 1 und Versuch 2, sowie MW und STABW.	43
Tabelle 9: Theoretischer Wertstoffgehalt (Kunststoffe) in den Feingütern <80 mm	62
Tabelle 10: Abmessungen – (Shredder Komptech, 2018:145).....	I
Tabelle 11: Gewichte, Durchsatz, Zerkleinerungseinheit – Shredder (Komptech, 2018:146)..	I
Tabelle 12: Maschinenbetrieb und Betriebsstoffe – Shredder (Komptech, 2018:146).....	II
Tabelle 13: Datenblatt – Siebmaschine (Komptech, 2018:146).	III
Tabelle 14: Waagendaten – Bandwaage (Kukla, 2019:1).....	IV

Tabelle 15: Technische Daten Ballistikseparator (Stadler, 2016).....	VI
Tabelle 16: Empfohlene Umgebungsbedingungen – Ballistikseparator (Stadler, 2018:25). ..	VI

7.4 Abbildungen

Abbildung 1: Recyclingraten von Siedlungsabfällen 2008 bis 2018 in Österreich (Eurostat, 2020).....	5
Abbildung 2: Recyclingraten von Kunststoffverpackungen 2008 bis 2017 in Österreich (Eurostat, 2020). ..	6
Abbildung 3: Recyclingoptionen für gemischte Altkunststoffe.	13
Abbildung 4: Beispielhaftes Verarbeitungsschema von Mischkunststoffen (Martens & Goldmann, 2016:294).....	15
Abbildung 5: Verfahrenstechnik im Hochofen (Martens & Goldmann, 2016:320).....	18
Abbildung 6: Ebenen-Struktur der wissenschaftlichen Arbeit.	24
Abbildung 7: Inputmaterial Restmüll (links) und Gewerbemüll (rechts).	26
Abbildung 8: Probenahme der Outputfraktionen a) 2D, b) 3D, c) FG _B und d) FG _S	27
Abbildung 9: Probenahme von FG _B bei den Versuchen zu Anlage 2.	27
Abbildung 10: Handsortierung einer 2D-Probe.	31
Abbildung 11: Trennschema mit Berechnungsgrößen (Kranert, 2017:225).....	33
Abbildung 12: Sankey-Diagramme: GM Anlage 1: Versuch 1 (links) und Versuch 2 (rechts).	36
Abbildung 13: Sankey-Diagramm: GM Anlage 1: MW aus Versuch 1 und Versuch 2.	36
Abbildung 14: Klebebänder in allen Kompartimenten des Ballistikseparators.	37
Abbildung 15: Sankey-Diagramm: GM Anlage 2: Versuch 1 (links) und Versuch 2 (rechts)..	37
Abbildung 16: Sankey-Diagramm: GM Anlage 2: MW aus Versuch 1 und Versuch 2.	38
Abbildung 17: Zopfbildung (links) und Filmband-Umwicklung am Trommelsieb (rechts).....	39
Abbildung 18: Sankey-Diagramm: RM Anlage 1: Versuch 1 (links) und Versuch 2 (rechts)..	39
Abbildung 19: Sankey-Diagramm: RM Anlage 1: MW aus Versuch 1 und Versuch 2.	40
Abbildung 20: Sankey-Diagramm: RM Anlage 2: Versuch 1 (links) und Versuch 2 (rechts)..	40
Abbildung 21: Sankey-Diagramm: RM Anlage 2: MW aus Versuch 1 und Versuch 2.	41
Abbildung 22: Siebtrommel während des zweiten Restmüll-Versuchs mit Anlage 2.	41
Abbildung 23: Korngrößenverteilung Anlage 1 (oben) und Anlage 2 (unten) - Gewerbemüll - FG _B	44
Abbildung 24: Korngrößenverteilung Anlage 2 - Gewerbemüll - FG _S	45

Abbildung 25: Korngrößenverteilung Anlage 1 (oben) und Anlage 2 (unten) - Restmüll - FG _B	46
Abbildung 26: Korngrößenverteilung Anlage 2 - Restmüll - FG _S	47
Abbildung 27: Zusammensetzung des 2D-Output im Anlagenvergleich (Gewerbemüll). Säulenhöhe: MW aus Versuch 1 und Versuch 2.	48
Abbildung 28: Beispielfotos Gewerbemüll: händisch sortierte Textil-Fraktionen der a) Anlage 1 und b) Anlage 2.	49
Abbildung 29: Beispielfotos Gewerbemüll: händisch sortierte 3D-Fraktionen der a) Anlage 1, b) Anlage 2 und 2D-Fraktionen aus c) Anlage 1 und d) Anlage 2.	49
Abbildung 30: Beispielfotos Gewerbemüll: händisch sortierte PPK-Fraktionen von a) Anlage 1 und b) Anlage 2.	50
Abbildung 31: Beispielfotos Gewerbemüll: händisch sortierte Metall-Fraktion aus a) Anlage 1 und b) Anlage 2.	50
Abbildung 32: Zusammensetzung des 2D-Fraktion im Anlagenvergleich (Restmüll). Säulenhöhe: MW aus Versuch 1 und Versuch 2.	52
Abbildung 33: Beispielfotos Restmüll: händisch sortierte Textil-Fraktionen aus a) Anlage 1 und b) Anlage 2.	52
Abbildung 34: Beispielbilder Restmüll: händisch sortierte 3D-Fraktionen der a) Anlage 1, b) Anlage 2 und 2D-Fraktionen aus c) Anlage 1 und d) Anlage 2.	53
Abbildung 35: Beispielfotos Restmüll: händisch sortierte PPK-Fraktionen aus a) Anlage 1 und b) Anlage 2.	54
Abbildung 36: Beispielfotos Restmüll: händisch sortierte Metall-Fraktionen aus a) Anlage 1 und b) Anlage 2.	54
Abbildung 37: Reinheitsgrade der Wertstofffraktionen (3D-Kunststoffe) aus der 3D-Fraktion bei sensorgestützter Sortierung.	56
Abbildung 38: Ausbringen der Wertstofffraktionen (3D-Kunststoffe) aus den 3D-Fraktionen bei sensorgestützter Sortierung.	57
Abbildung 39: Wertstoffausbringen (Kunststoffe aus der 3D-Fraktion) bei sensorgestützter Sortierung.	58
Abbildung 40: Fehlaustrag (Kunststoff in Restfraktion) bei sensorgestützter Sortierung.	59
Abbildung 41: Kunststoffanteile im Feingut von Gewerbemüll (links) und Restmüll (rechts) (Möllnitz, et al., 2020).	61
Abbildung 42: Stoffdichten unterschiedlicher Materialfraktionen aus Rest- und Gewerbemüll im Vergleich zu Wasser (Bauer, et al., 2017:448).	64
Abbildung 43: Grundriss – Ballistikseparator (Stadler, 2016).	IV
Abbildung 44: Aufriss – Ballistikseparator (Stadler, 2016).	V

Abbildung 45: Seitenriss – Ballistikseparator (Stadler, 2016).....	V
Abbildung 46: von oben links nach unten rechts (v.o.l.n.u.r.): 1) Aufbau der Kompartimente des Ballistikseparators; 2) Aufbau Anlage 1; 3) Einstellung der Schnittpaltbreite; 4) Wechsel des Trommelsiebs.	VII
Abbildung 47: v.o.l.n.u.r.: 1) Aufgabe von Gewerbemüll des ersten Tests von Anlage 1; 2) FG-Output; 3) 2D-Output; 4) 3D-Output.	VII
Abbildung 48: v.o.l.n.u.r.: 1) Beschickung des Shredders; 2) Bandwaage und Ballistikseparator während des Versuchs; 3) Störstoffe im Gewerbemüll (vgl. 4.1.1); 4) Störstoff Kunststoffband Nahaufnahme.	VIII
Abbildung 49: v.o.l.n.u.r.: 1) 3D-Fraktion; 2) FG _B -Fraktion; 3) 2D-Fraktion.	VIII
Abbildung 50: von oben nach unten (v.o.n.u.): 1) Austrag FG _S ; 2) Probenahme FG _S ; 3) Gewerbemüll im Trommelsieb.	IX
Abbildung 51: Störstoffe im Gewerbemüll – verursachten Umwicklungen am Trommelsieb und Zopfbildung am Austrag.	X
Abbildung 52: v.o.l.n.u.r.: 1) FG _S -Output; 2) 3D-Output; 3) FG _B -Output 4) 2D-Output.....	XI
Abbildung 53: v.o.l.n.u.r.: 1) Kompartimente des Ballistikseparators. Zum Ende der Versuche war der Boden verschlammt; 2) Gesamtanlage während eines Versuchs; 3) Austragsband der Bandwaage; 4) Beprobung des FG _B	XI
Abbildung 54: v.o.n.u.: 1) 3D-Output; 2) FG _B -Output; 3) 2D-Output.....	XII
Abbildung 55: von links nach rechts (v.l.n.r.): 1) Restmüll im Trommelsieb; 2) Restmüll am Austrag der Siebmaschine.	XIII
Abbildung 56: Probenahme-Big-Bag für FG _S am Gabelstapler.....	XIII
Abbildung 57: v.o.n.u.: 1) FGS-Output; 2) 3D-Output; 3) FG _B -Output; 4) 2D-Output.....	XIV
Abbildung 58: v.o.n.u.: 1) Siebanalyse-Trommel des AVAW; 2) Mitarbeiter während einer Siebanalyse; 3) Herstellung einer Laborprobe für weitere Analysen.....	XV
Abbildung 59: Handsortierung einer Restmüllprobe von Mitarbeitern.	XVI
Abbildung 60: Medizinisches Material (Spritze) in verschiedenen Restmüllproben.	XVI
Abbildung 61: v.o.l.n.u.r.: 1) 2D-Kunststoff; 2) 3D-Kunststoff; 3) Holz; 4) Textil; 5) PPK; 6) Metall; 7) Schaumstoff; 8) Verbund; 9) Inert; 10) Rest; 11) Heu.	XVII
Abbildung 62: v.o.l.n.u.r.: 1) 2D-Kunststoff; 2) 3D-Kunststoff; 3) Holz; 4) Textil; 5) PPK; 6) Metall; 7) Schaumstoff; 8) Verbund; 9) Inert; 10) Rest.....	XVIII
Abbildung 63: v.o.l.n.u.r.: 1) 2D-Kunststoff; 2) 3D-Kunststoff; 3) Holz; 4) Textil; 5) PPK; 6) Metall; 7) Schaumstoff; 8) Verbund; 9) Inert; 10) Rest.....	XIX
Abbildung 64: v.o.l.n.u.r.: 1) 2D-Kunststoff; 2) 3D-Kunststoff; 3) Holz; 4) Textil; 5) PPK; 6) Metall; 7) Schaumstoff; 8) Verbund; 9) Inert; 10) Rest.....	XX

Abbildung 65: v.o.l.n.u.r.: 1) Vereinzelung von Aufgabeband zum Beschleunigungsband der Anlage; 2) Schurre von Aufgabeband auf Beschleunigungsband; 3) Sortiergut im Sensorbereich; 4) Inline-Sortierung von Fehlwürfen.	XXI
Abbildung 66: v.l.n.r.: Mischkunststofffraktion aus 1) Gewerbemüll und 2) Restmüllversuche.	XXI
Abbildung 67: v.l.n.r.: Restfraktion aus 1) Gewerbemüll und 2) Restmüll.....	XXI
Abbildung 68: v.l.n.r.: Fehlwürfe der Wertstofffraktion (Rest im Wertstoff) von 1) Gewerbemüll und 2) Restmüll.	XXII
Abbildung 69: v.l.n.r.: Fehlwürfe der Restfraktion (Wertstoff im Rest) von 1) Gewerbemüll und 2) Restmüll.	XXII

Anhang I – Technische Daten der Aggregate

Shredder

Tabelle 10: Abmessungen – (Shredder Komptech, 2018:145).

Abmessungen	
Ausführung	Trailer
Maschine montiert auf	3-Achs-Fahrgestell
Befüllhöhe (mm / in)	3005 / 118.3
Befülllänge (mm / in)	4618 / 181.8
Befüllbreite (mm / in)	3328 / 131.0
Förderbandbreite (mm / in)	1000 mm / 39.4 in
klappbares Abwurfband	10 - 35 °
Transportposition L x B x H (mm / in) (Standard, ohne Überbandmagnet)	9065 x 2549 x 3367 / 356.9 x 100.3 x 132.6
Transportposition L x B x H (mm / in) (Standard, mit Überbandmagnet)	9644 x 2549 x 3367 / 379.7 x 100.3 x 132.6
Transportposition L x B x H (mm / in) (mit Magnetrolle, ohne Überbandmagnet)	9065 x 2549 x 3453 / 356.9 x 100.3 x 136.0
Transportposition L x B x H (mm / in) (mit Magnetrolle, mit Überbandmagnet)	9644 x 2549 x 3453 / 379.7 x 100.3 x 136.0
Transportposition L x B x H (mm / in) (mit Abwurfbandverlängerung, ohne Überbandmagnet)	9065 x 2549 x 3389 / 356.9 x 100.3 x 133.4
Transportposition L x B x H (mm / in) (mit Abwurfbandverlängerung, mit Überbandmagnet)	9644 x 2549 x 3389 / 379.7 x 100.3 x 133.4
Arbeitsposition L x B x H (mm / in) (Standard, Förderband 10°)	14322 x 2450 x 3734 / 563.9 x 96.5 x 147.0
Arbeitsposition L x B x H (mm / in) (mit Abwurfbandverlängerung, Förderband 10°)	15321 x 2450 x 3734 / 603.2 x 96.5 x 147.0
Arbeitsposition L x B x H (mm / in) (Standard, Förderband 35°)	13497 x 2450 x 4250 / 531.4 x 96.5 x 167.3
Arbeitsposition L x B x H (mm / in) (mit Abwurfbandverlängerung, Förderband 35°)	14327 x 2450 x 4832 / 564.1 x 96.5 x 190.2

Tabelle 11: Gewichte, Durchsatz, Zerkleinerungseinheit – Shredder (Komptech, 2018:146).

Gewichte	
Hook (t)	ca. 22,1
Trailer (t)	ca. 24,9
Track (t)	ca. 26.0
Durchsatz - Walzendrehzahl	
Typ	CAT ® C13
Walzendrehzahl min ⁻¹ / rpm	max. 32
Durchsatzleistung (t/h)	bis 80
Zerkleinerungseinheit	
Ausführung	TM-F 32
Länge Zerkleinerungswalze	3000 mm / 118.1 in
Außendurchmesser	1050 mm / 41.3 in
Durchmesser Walzenrohr	770 mm / 30.3 in
Hydraulisch verstellbarer Schneidspalt	0-45 mm / 0-1.8 in
Walze: Anzahl der Zähne	32
Gegenkamm: Anzahl der Zähne	17

Tabelle 12: Maschinenbetrieb und Betriebsstoffe – Shredder (Komptech, 2018:146).

Maschinenantrieb	
Antriebsart	Dieselmotor
Hersteller	Caterpillar®
Typ	CAT C13 Tier 4 Final/Stage IV
Schadstoffemissionen	US (EPA) TIER 4f / EU Stage IV
Leistung (kW / PS)	328 / 446
Hubraum (ccm / cui)	13000 / 793.31
Anzahl der Zylinder	6
Motorschutz	elektronisch
Nenn Drehzahl (U/min)	2100
Kühlsystem	Flüssigkeit
Kühlmittelmenge* (l)	80 - 90
* Das Gesamtvolumina ist als Richtwert zu verstehen. Das vollgefüllte Schauglas an der Maschine ist der einzuhaltende Wert.	
Betriebsstoffe - Füllmenge	
Hydrauliköl Menge	200 l
Hydrauliköl Typ	ENI i-SINT 5W-30
Planetengetriebeöl Menge	20 l
Planetengetriebeöl Typ	AGIP Blasia 220 SX
Schaltgetriebeöl Menge	N/A
Schaltgetriebeöl Typ	N/A
Verteilergetriebeöl Menge	6 l
Verteilergetriebeöl Typ	AGIP Blasia 220 SX

Trommelsieb

Tabelle 13: Datenblatt – Siebmaschine (Komptech, 2018:146).

TRANSPORTABMESSUNGEN	
Länge	12000 mm (472.44 in)
Breite	2550 mm (100.39 in)
Höhe	4000 mm (157.48 in)
TANDEMZENTRALACHSANHÄNGER	
Zulässiges Gesamtgewicht	17 t (37478.56 lbs)
Zul. Achslast je Achse	8 t (17636.97 lbs)
Stützlast	1 t (2204.62 lbs)
Räder	385/65 R 22,5
SIEBTROMMELGRÖSSE	
Länge Siebtrommel	5500 mm (216.54 in)
Durchmesser Siebtrommel	2000 mm (78.74 in)
Effektive Siebfläche	30,0 m ² (322.92 ft ²)
SIEBMATERIAL	
Durchsatzleistung	170 m ³ /h (6003.50 ft ³ /h)
MOTOR (DIESELMOTOR)	
Leistung	74,0 kW
Leistung bei 1.800 min ⁻¹	73,0 kW
Abgasnorm	Richtlinie 97/68 EG Stufe IV EPA TIER 4 Final
Kraftstofftank	ca. 450 l
UMGEBUNGSBEDINGUNG	
Temperaturbereich	-10°C bis +37°C (14°F bis 98,6°F)

Bandwaage

Tabelle 14: Waagdaten – Bandwaage (Kukla, 2019:1).

Waagdaten					
		berechnet	FAT	SAT	
Nennleistung	<i>t/h</i>	100,0	✓		
Minimaler Sollwert	%	5	✓		
Digitaltacho	<i>Type</i>	E17C-DR90	✓		
	<i>Imp/U</i>	24	✓		
Nennfrequenz Digitaltacho	<i>Hz</i>	582	✓		
Nenngeschwindigkeit	<i>mm/s</i>	553	✓		
Bandlänge	<i>mm</i>	13405	✓		
Bandbreite	<i>mm</i>	1400	✓		
Messstrecke	<i>mm</i>	1000	✓		
g3 - Länge	<i>mm</i>	-	✓		
Totstrecke	<i>mm</i>	-	✓		
Einbaulage	<i>Grad / cos</i>	0° / 1	✓		
Integrierbereich	<i>1:</i>	1	✓		

Ballistikseparator

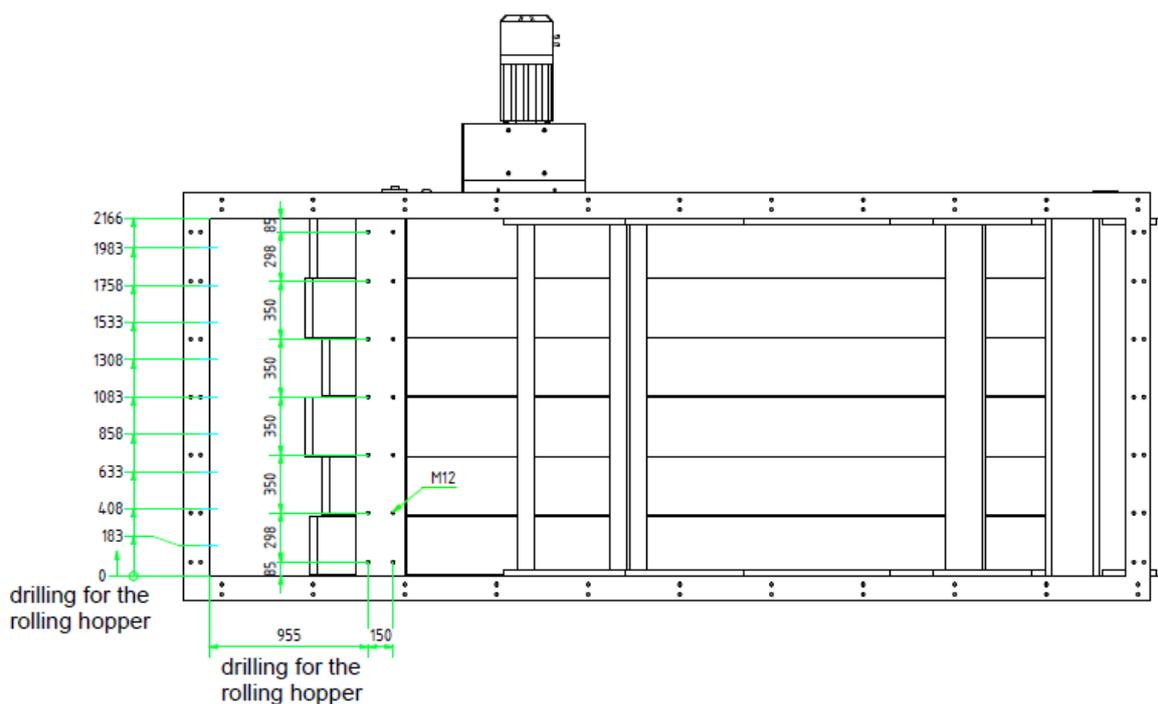


Abbildung 43: Grundriss – Ballistikseparator (Stadler, 2016).

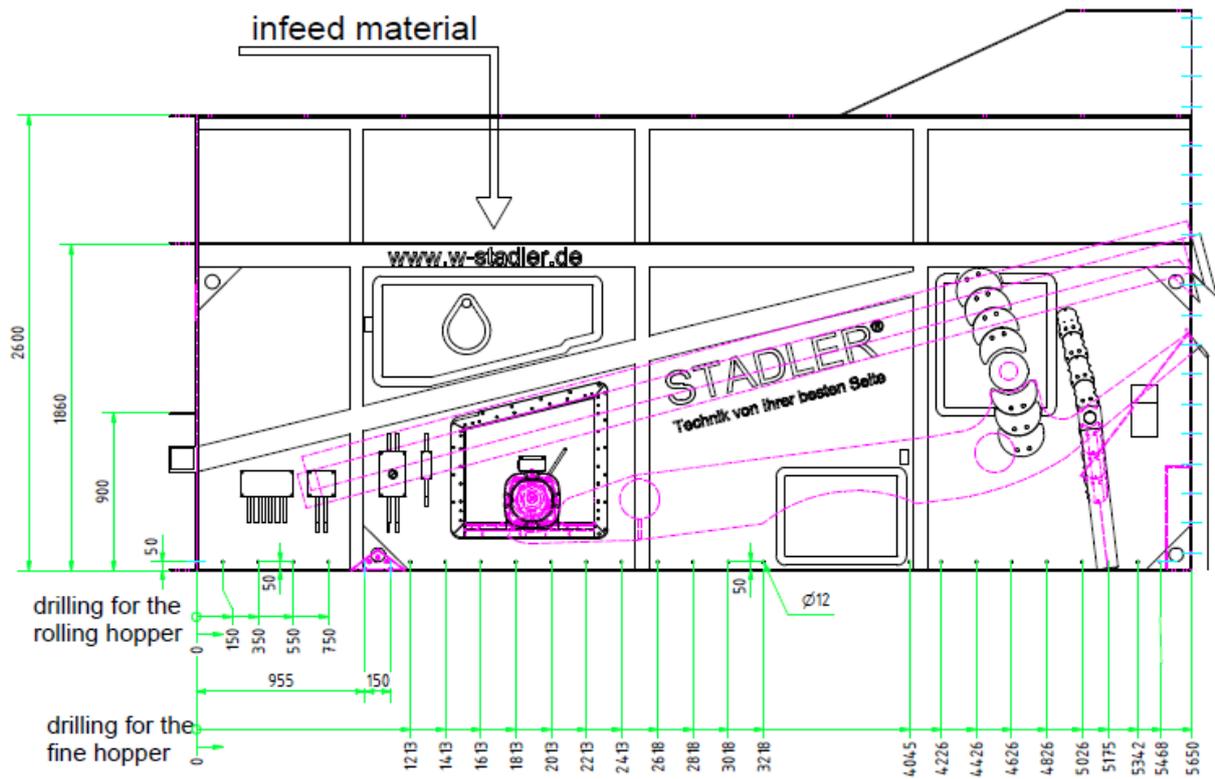


Abbildung 44: Aufriss – Ballistikseparator (Stadler, 2016).

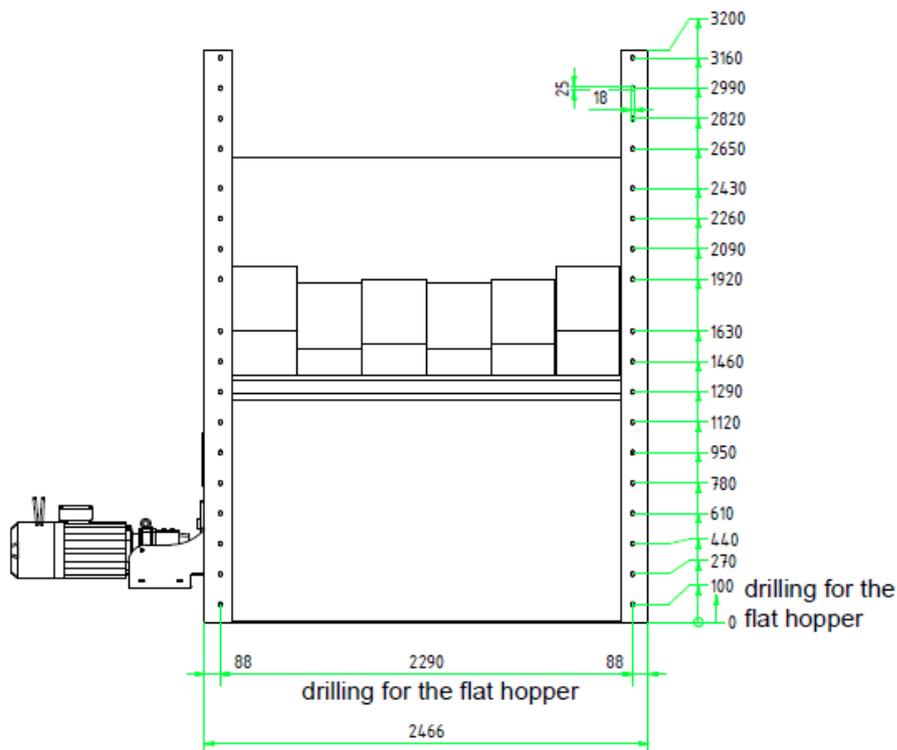


Abbildung 45: Seitenriss – Ballistikseparator (Stadler, 2016).

Tabelle 15: Technische Daten Ballistikseparator (Stadler, 2016).

Technische Daten	
Antrieb:	RAL:7031; 11 kW; 380-400/50 Hz; ISO F; IP54
Bremse:	BE20 380-420 V/50 Hz mit red. 40 Nm
Gesamtgewicht:	Ca. 13 t
Winkleinstellbereich:	7,5° - 25°
Schaltschrank:	380-480V 50/60Hz mit Frequenzumrichter 15 kW

Tabelle 16: Empfohlene Umgebungsbedingungen – Ballistikseparator (Stadler, 2018:25).

Empfohlene Umgebungsbedingungen

Industrieatmosphäre	Korrosivitätsklasse C3m nach DIN EN ISO 12944 (Mäßige SO ₂ -Belastung)
Aufstellungsort	unter Dach, trocken
Umgebungstemperatur	-10 bis +35°C maximal 65% Luftfeuchtigkeit
Aufstellungshöhe	≤ 1000m über NN

Anhang II – Fotodokumentation

Anlagenaufbau und Vorversuchswoche



Abbildung 46: von oben links nach unten rechts (v.o.l.n.u.r.): 1) Aufbau der Kompartimente des Ballistikseparators; 2) Aufbau Anlage 1; 3) Einstellung der Schnittspaltbreite; 4) Wechsel des Trommelsiebs.



Abbildung 47: v.o.l.n.u.r.: 1) Aufgabe von Gewerbemüll des ersten Tests von Anlage 1; 2) FG-Output; 3) 2D-Output; 4) 3D-Output.

Gewerbemüllversuche – Anlage 1



Abbildung 48: v.o.l.n.u.r.: 1) Beschickung des Shredders; 2) Bandwaage und Ballistikseparator während des Versuchs; 3) Störstoffe im Gewerbemüll (vgl. 4.1.1); 4) Störstoff Kunststoffband Nahaufnahme.



Abbildung 49: v.o.l.n.u.r.: 1) 3D-Fraktion; 2) FG_B-Fraktion; 3) 2D-Fraktion.

Gewerbemüllversuche – Anlage 2

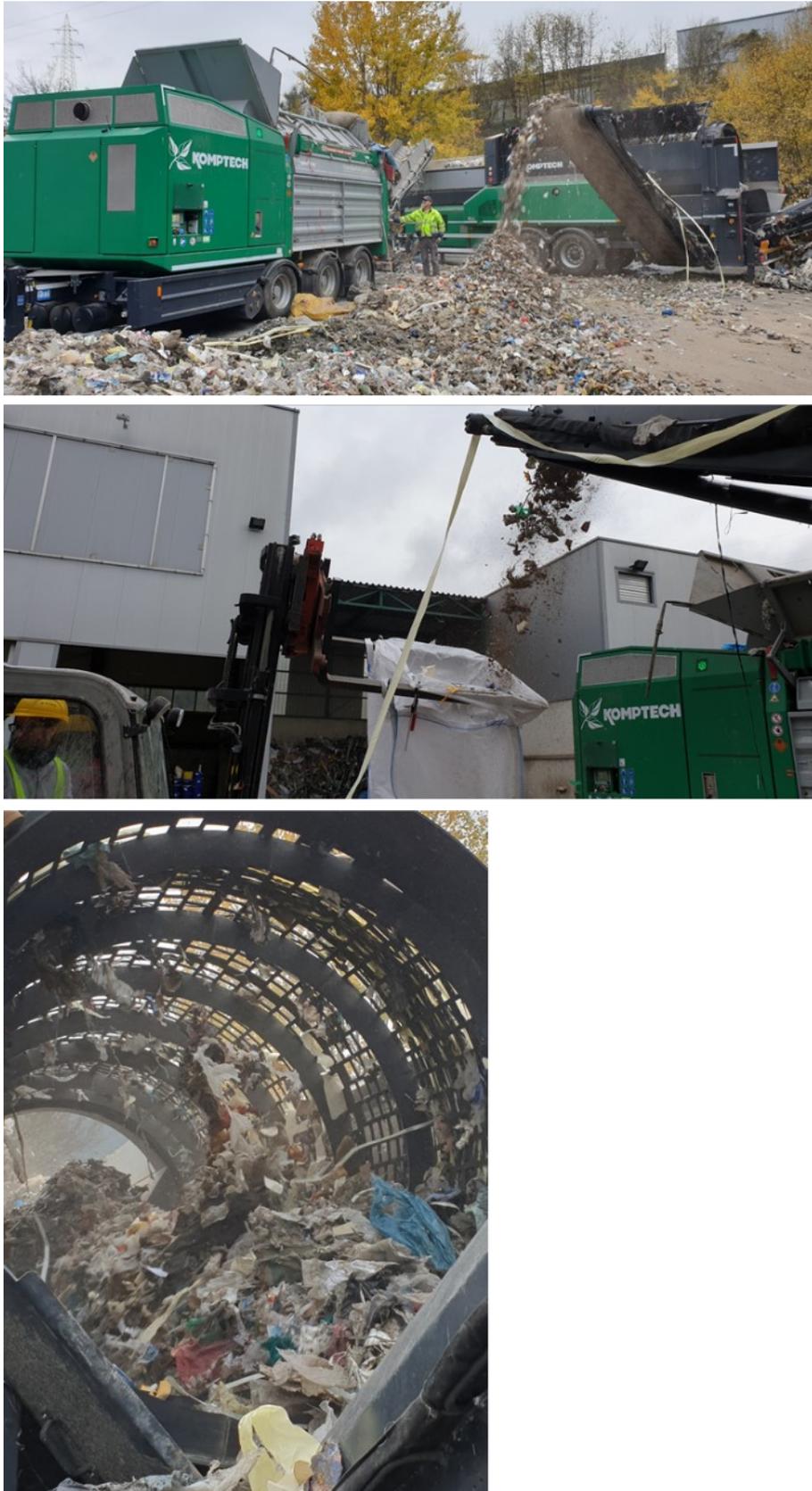


Abbildung 50: von oben nach unten (v.o.n.u.): 1) Austrag FGs; 2) Probenahme FGs; 3) Gewerbemüll im Trommelsieb.

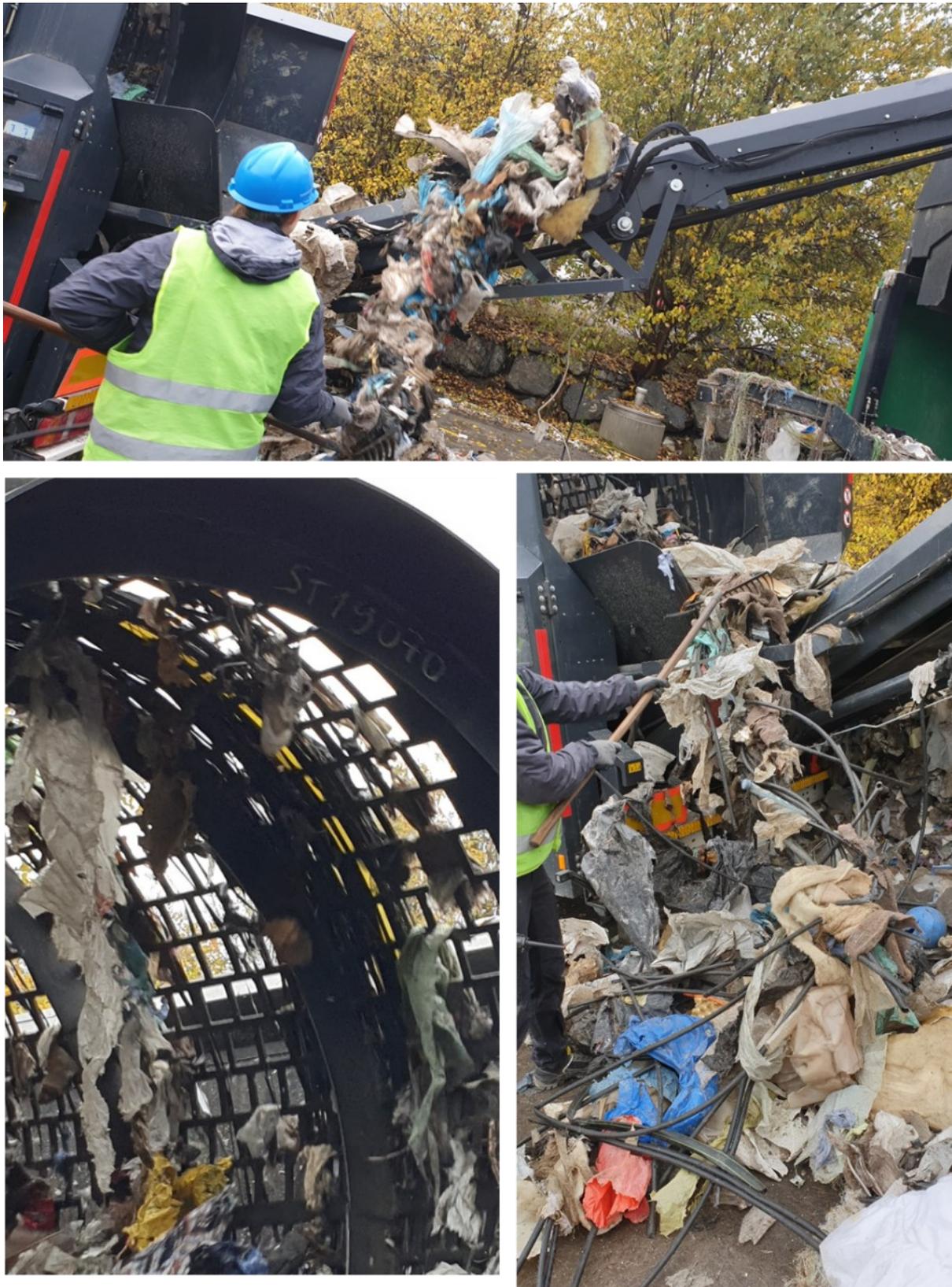


Abbildung 51: Störstoffe im Gewerbemüll – verursachten Umwicklungen am Trommelsieb und Zopfbildung am Austrag.

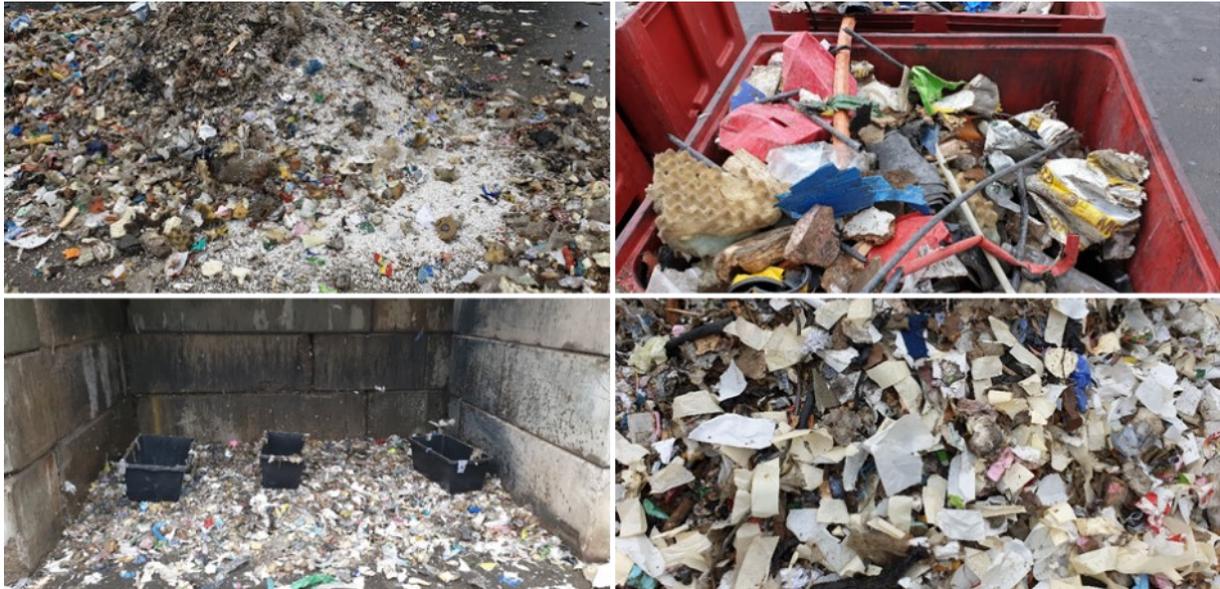


Abbildung 52: v.o.l.n.u.r.: 1) FG_S-Output; 2) 3D-Output; 3) FG_B-Output 4) 2D-Output.

Restmüllversuche – Anlage 1



Abbildung 53: v.o.l.n.u.r.: 1) Kompartimente des Ballistikseparators. Zum Ende der Versuche war der Boden verschlammte; 2) Gesamtanlage während eines Versuchs; 3) Auszugsband der Bandwaage; 4) Beprobung des FG_B.



Abbildung 54: v.o.n.u.: 1) 3D-Output; 2) FG_B-Output; 3) 2D-Output.

Restmüllversuche – Anlage 2



Abbildung 55: von links nach rechts (v.l.n.r.): 1) Restmüll im Trommelsieb; 2) Restmüll am Austrag der Siebmaschine.



Abbildung 56: Probenahme-Big-Bag für FG_S am Gabelstapler.

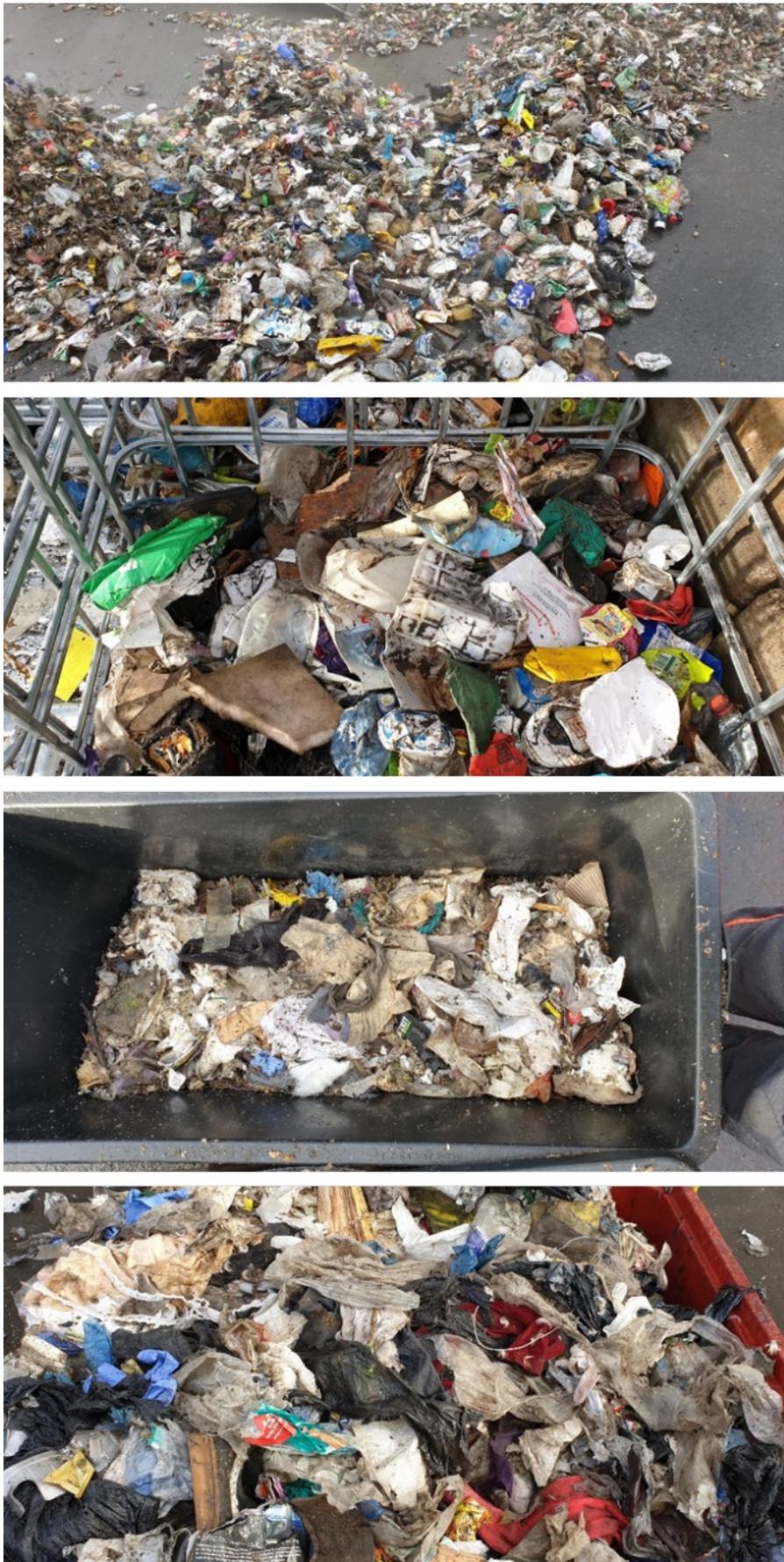


Abbildung 57: v.o.n.u.: 1) FGS-Output; 2) 3D-Output; 3) FG_B-Output; 4) 2D-Output.

FG-Analyse



Abbildung 58: v.o.n.u.: 1) Siebanalyse-Trommel des AVAW; 2) Mitarbeiter während einer Siebanalyse; 3) Herstellung einer Laborprobe für weitere Analysen.

Sortieranalyse der 2D-Fractionen



Abbildung 59: Handsortierung einer Restmüllprobe von Mitarbeitern.

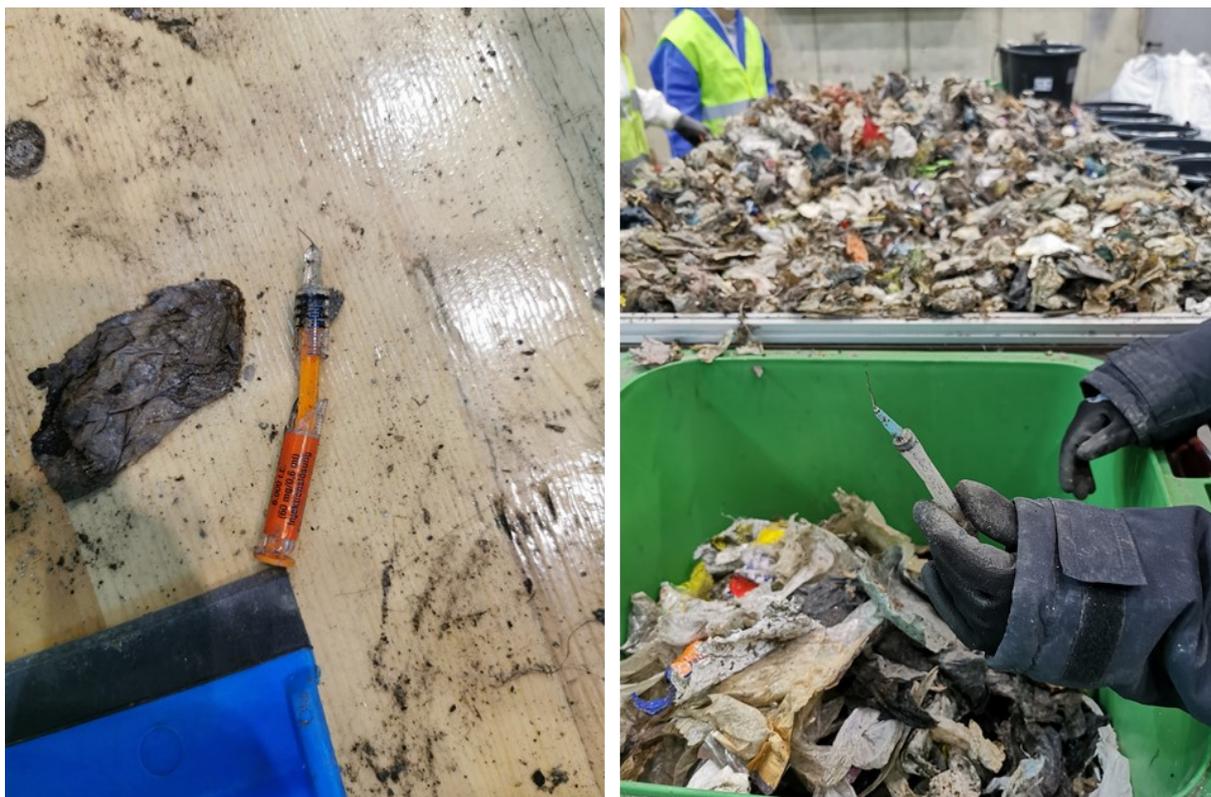


Abbildung 60: Medizinisches Material (Spritze) in verschiedenen Restmüllproben.

2D-Fractionen Gewerbemüll – Anlage 1

Abbildung 61: v.o.l.n.u.r.: 1) 2D-Kunststoff; 2) 3D-Kunststoff; 3) Holz; 4) Textil; 5) PPK; 6) Metall; 7) Schaumstoff; 8) Verbund; 9) Inert; 10) Rest; 11) Heu.

2D-Fractionen Gewerbemüll – Anlage 2

Abbildung 62: v.o.l.n.u.r.: 1) 2D-Kunststoff; 2) 3D-Kunststoff; 3) Holz; 4) Textil; 5) PPK; 6) Metall; 7) Schaumstoff; 8) Verbund; 9) Inert; 10) Rest.

2D-Fractionen Restmüll – Anlage 1



Abbildung 63: v.o.l.n.u.r.: 1) 2D-Kunststoff; 2) 3D-Kunststoff; 3) Holz; 4) Textil; 5) PPK; 6) Metall; 7) Schaumstoff; 8) Verbund; 9) Inert; 10) Rest.

2D-Fractionen Restmüll – Anlage 2



Abbildung 64: v.o.l.n.u.r.: 1) 2D-Kunststoff; 2) 3D-Kunststoff; 3) Holz; 4) Textil; 5) PPK; 6) Metall; 7) Schaumstoff; 8) Verbund; 9) Inert; 10) Rest.

Sensorgestützte Sortierung



Abbildung 65: v.o.l.n.u.r.: 1) Vereinzelung von Aufgabeband zum Beschleunigungsband der Anlage; 2) Schurren von Aufgabeband auf Beschleunigungsband; 3) Sortiergut im Sensorbereich; 4) In-line-Sortierung von Fehlwürfen.



Abbildung 66: v.l.n.r.: Mischkunststofffraktion aus 1) Gewerbemüll und 2) Restmüllversuche.



Abbildung 67: v.l.n.r.: Restfraktion aus 1) Gewerbemüll und 2) Restmüll.



Abbildung 68: v.l.n.r.: Fehlwürfe der Wertstofffraktion (Rest im Wertstoff) von 1) Gewerbemüll und 2) Restmüll.



Abbildung 69: v.l.n.r.: Fehlwürfe der Restfraktion (Wertstoff im Rest) von 1) Gewerbemüll und 2) Restmüll.