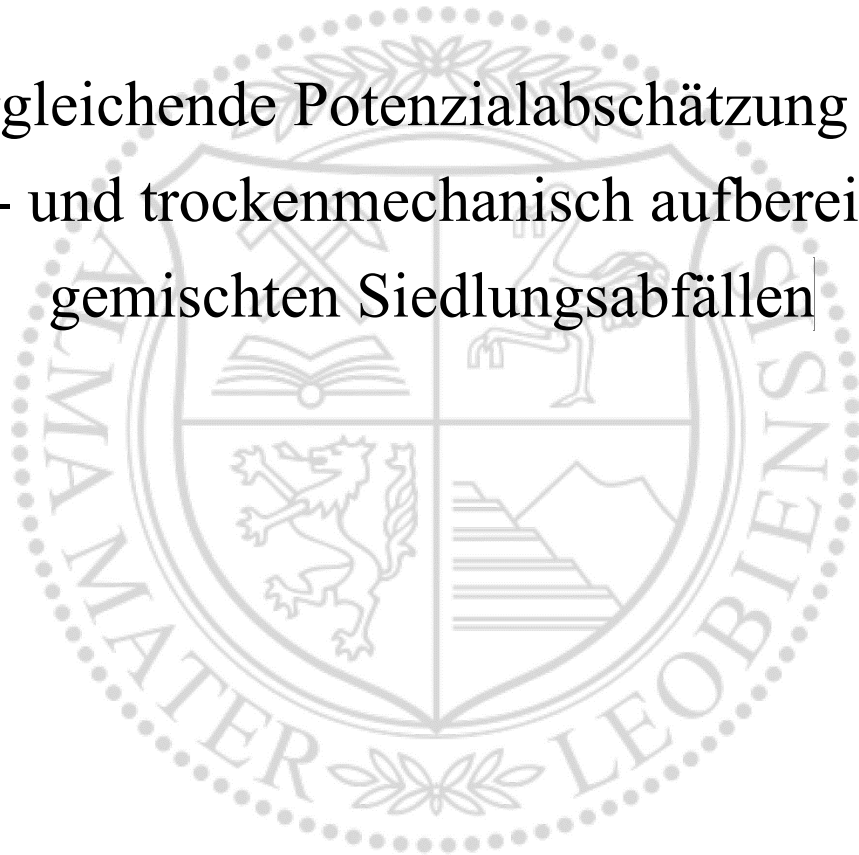




|Lehrstuhl für Abfallverwertungstechnik und Abfallwirtschaft|

Masterarbeit

|Vergleichende Potenzialabschätzung von
nass- und trockenmechanisch aufbereiteten
gemischten Siedlungsabfällen|



|Dunja Füller, BSc.|

|Oktober 2019|



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

Datum 10.10.2019

Unterschrift Verfasser/in
Dunja, Füller
Matrikelnummer: 01035067

Vorgelegt von:

Dunja Füller

01035067

Betreuer:

Univ.-Prof. DI Dr. mont. Roland Pomberger

Bastian Küppers, MSc.

Kurzfassung

Vergleichende Potenzialabschätzung von nass- und trockenmechanisch aufbereiteten gemischten Siedlungsabfällen

Über den gemischten Siedlungsabfall werden weiterhin wertvolle Rohstoffe aus dem Stoffkreislauf ausgeschleust, die es unter den Aspekten der Schonung natürlicher Ressourcen sowie des verfügbaren Deponievolumens zurückzugewinnen gilt. Diese Thematik wurde im Kreislaufwirtschaftspaket der Europäischen Union aus dem Jahr 2015 aufgegriffen, woraufhin zukünftig zu erreichende Recyclingquoten bei der Verwertung von gemischten Siedlungsabfällen festgelegt wurden. Um diese ambitionierten Ziele zu erreichen müssen einerseits herkömmliche Behandlungswege überdacht und andererseits neue Methoden entwickelt werden.

Diese Arbeit vergleicht die aus gemischten Siedlungsabfällen mittels nass- und trockenmechanischer Aufbereitung erzeugten Schwergutfraktionen hinsichtlich ihres Wertstoffpotenzials. Dazu wurden im theoretischen Teil Informationen zur Fraktion der gemischten Siedlungsabfälle in Österreich sowie zu ausgewählten Aufbereitungs- und Sortiertechniken bei der Behandlung von Abfällen zusammengetragen. Im praktischen Teil dieser Arbeit wurden Sortier- und Trennversuche mit den zur Verfügung stehenden Schwergütern durchgeführt. Die erzeugten Wertstofffraktionen wurden anschließend mittels Sortieranalyse untersucht, deren Daten die Basis für die erstellte Massenbilanz sowie für die Bestimmung von Reinheit und Ausbringen der Fraktionen darstellten. Die damit geschaffene quantitative Bewertung ermöglicht somit einen Vergleich der beiden Aufbereitungsverfahren.

Abstract

A Comparison of Wet and Dry Processed Municipal Solid Waste focusing on Potential Evaluations

Via the disposal of mixed municipal solid waste, a considerable amount of valuable resources is still discharged from material cycles. Regarding the protection of natural resources and landfill volume the recovery of those recyclable fractions is essential. Within the scope of the Circular Economy Package this issue was seized by the European Union in 2015, in which prospective targets on the recycling of residual waste are set. On the one hand conventional steps of the European waste management must be reconsidered, on the other hand new methods for recycling must be developed to achieve these ambitious targets.

In this thesis the heavy fractions produced by wet and dry mechanical treatment of residual waste are compared regarding the potential of recyclable fractions. For this purpose, the theoretical part deals with information about residual waste in Austria as well as the theory of selected processing and sorting techniques. In the course of the practical task sorting and separating experiments with the available heavy fractions were conducted. On the basis of the data gained by the sorting analysis of the generated recyclable fractions, a mass flow analysis as well as the determination of yield and purity were made. Finally, the comparison of both methods based on the quantitative evaluation was drawn.

Inhaltsverzeichnis

	Seite
1 EINLEITUNG	3
1.1 Problemstellung	3
1.2 Zielsetzung	4
2 THEORIE 1 – GEMISCHTE SIEDLUNGSABFÄLLE.....	5
2.1 Begriffsbestimmungen	5
2.2 Zusammensetzung	6
2.3 Aufkommen.....	8
2.4 Sammlung und Behandlung.....	9
2.5 Siedlungsabfälle in der Steiermark	11
2.5.1 Zusammensetzung	11
2.5.2 Aufkommen.....	12
2.5.3 Sammlung, Behandlung und Beseitigung	12
2.5.4 Kosten und Umweltfaktoren	16
3 THEORIE 2 – AUFBEREITUNG VON ABFÄLLEN.....	17
3.1 Zerkleinerung.....	17
3.2 Siebung.....	18
3.3 Sortierung	21
3.3.1 Dichtentrennung	22
3.3.2 Nassmechanische Aufbereitung.....	23
3.3.3 Trockenmechanische Aufbereitung.....	24
3.3.4 FE/NE-Scheidung	26
3.3.5 Sensorsortierung	30
3.3.5.1 Wirkprinzip, Voraussetzungen und Vorteile	30
3.3.5.2 Oberflächeneigenschaften	34
3.3.5.3 Innere Korneigenschaften	38
3.4 Datenauswertung.....	41
3.4.1 Ausbringen und Reinheit.....	41
3.4.2 Sortieranalyse.....	42
3.4.3 Qualitätskriterien von Sekundärrohstoffen	44
4 DURCHFÜHRUNG DER AUFBEREITUNGS- UND SORTIERVERSUCHE	47
4.1 Nassmechanische Aufbereitung	50
4.2 Trockenmechanische Aufbereitung.....	52

4.3	Magnetscheidung.....	54
4.3.1	Schwachfeldscheidung	55
4.3.2	Starkfeldscheidung	56
4.4	Sensorsortierung.....	57
4.4.1	Induktionssortierung.....	58
4.4.2	Farbsortierung (VIS)	59
4.4.3	NIR-Sortierung.....	60
4.5	Sortieranalyse.....	64
5	ERGEBNISSE / DISKUSSION	66
5.1	Nass- und trockenmechanische Vorbehandlung.....	68
5.2	FE-Metalle	72
5.2.1	Stark magnetisierbare Eisenprodukte	72
5.2.2	Schwach magnetisierbare Eisenprodukte	74
5.3	NE-Metalle	76
5.4	Altglas	80
5.4.1	Weißglas.....	81
5.4.2	Grünglas	85
5.4.3	Braunglas	88
5.5	Kunststoffe.....	92
5.6	Inertstoffe.....	95
5.7	Restprodukte	97
5.8	Abschätzung des Wertstoffpotenzials in gemischten Siedlungsabfällen.....	99
6	ZUSAMMENFASSUNG	103
7	VERZEICHNISSE	107
7.1	Literatur.....	107
7.2	Abkürzungsverzeichnis	109
7.3	Tabellen.....	109
7.4	Abbildungen.....	110
ANHANG	I

1 Einleitung

Durch die wachsenden Bevölkerungszahlen ist der Durst der Gesellschaft nach Rohstoffen derzeit kaum zu befriedigen. Sowohl in den einzelnen Schritten der Wertschöpfungskette, als auch bei der Konsumation der erzeugten Güter fallen Reste an, die als Abfälle aus der Gesellschaft ausgeschieden werden. Bei wachsender Produktion geht damit nicht nur ein erhöhter Rohstoffverbrauch, sondern auch ein Anstieg der anfallenden Abfallmengen einher.

Gelangen Produkte aus Haushalten und ähnlichen Einrichtungen am Ende ihrer Lebensdauer in die Abfallwirtschaft, werden sie dort unter dem Begriff der Siedlungsabfälle zusammengefasst. Dabei werden jene Abfälle als Altstofffraktionen gesammelt, die dazu bestimmt sind einer Verwertung zugeführt zu werden bzw. deren Verwertungskosten zumindest zum Teil von deren Inverkehrsetzern gedeckt werden. Dazu zählen beispielsweise Glas-, Kunststoff- und Metallverpackungen. Können Abfälle weder einer Altstoff- noch einer übrigen Fraktion zugeordnet werden, gelangen sie als gemischter Siedlungsabfall in die schwarze Tonne. Dessen Inhalt wird aber nicht nur durch die gesetzlichen Rahmenbedingungen, sondern auch maßgeblich vom Trennverhalten der Bevölkerung bestimmt. Dadurch werden beispielsweise stoffgleiche Nichtverpackungen sowie falsch zugeordnete Altstoffe über den Restmüll entsorgt, der überwiegend zum Zweck der Beseitigung behandelt wird. Infolgedessen beinhaltet der gemischte Siedlungsabfall ein ungenutztes Potenzial an Rohstoffen, das durch weitere Aufbereitungsmaßnahmen erschlossen werden kann.

1.1 Problemstellung

Auf Europäischer Ebene wurde das Wertstoffpotenzial der unterschiedlichsten Abfallfraktionen erkannt, weshalb die Europäische Union Bemühungen anstellt die Abfallwirtschaft in eine Kreislaufwirtschaft umzuwandeln. Während in der konventionellen Abfallwirtschaft zunächst eine umweltverträgliche Beseitigung angestrebt wurde, liegt das Ziel der Kreislaufwirtschaft im Schließen von Stoffkreisläufen, um Wertstoffe so lange wie möglich in diesen Kreisläufen zu halten. Mit diesem Konzept werden mehrere Aspekte berücksichtigt, einer davon ist die Schonung natürlicher Ressourcen. Der abfallintensivste Schritt liegt meist am Beginn der Wertschöpfungskette, da zunehmend Lagerstätten mit sinkendem Wertstoffgehalt erschlossen werden Förstner 2012. Im Vergleich dazu sind Wertstoffe in Abfallfraktionen meist um ein Vielfaches höher angereichert. Werden daher diese ungenutzten Potenziale erschlossen, können nicht nur natürliche Ressourcen, sondern auch das zur Verfügung stehende Deponievolumen geschont werden. Der Großteil der Lagerstätten wichtiger Primärrohstoffe liegt außerhalb Europas. Dadurch werden Rohstoffe nicht nur für die Produktion, sondern auch in Form von Gütern importiert, die letztendlich in das abfallwirtschaftliche System gelangen. Das bedeutet, dass Europa durch Nutzung der bereits in Abfällen vorhandenen Wertstoffe an Unabhängigkeit von internationalen Importen gewinnt.

Vor diesem Hintergrund wurden im Rahmen des Kreislaufwirtschaftspakets aus dem Jahr 2015 konkrete Ziele definiert, um dieses Wertstoffpotenzial nutzbar zu machen. Darin ist eine

Anhebung der Recyclingquote für gemischte Siedlungsabfälle von 44 % auf 55 % bis zum Jahr 2025 und auf 65 % bis zum Jahr 2035 geplant. Hand in Hand geht damit eine für das Jahr 2035 geplante maximale Deponierungsquote von 10 %. (Europäisches Parlament 18.04.2018)

Österreich kann bis dato eine Recyclingquote von 59 % aufweisen, die es weiter auszubauen gilt (Europäisches Parlament 18.04.2018). Dazu müssen nicht nur etablierte Wege der Abfallwirtschaft überdacht, sondern auch neue Methoden zur Rückgewinnung von Wertstoffen aus gemischten Siedlungsabfällen entwickelt werden. Eine mögliche Alternative zur herkömmlichen Behandlung von gemischten Siedlungsabfällen stellt die nassmechanische Aufbereitung dar. Um die Eignung dieser Methode bezogen auf die Recyclingfähigkeit erzeugter Outputfraktionen zu untersuchen, beinhaltet diese Arbeit eine erste Abschätzung der Vor- und Nachteile dieser Aufbereitungstechnik sowie deren Quantifizierung.

1.2 Zielsetzung

Im Rahmen dieser Arbeit wird die Recyclingfähigkeit von nass- und trockenmechanisch aufbereiteten gemischten Siedlungsabfälle untersucht.

Der theoretische Teil beleuchtet sowohl die Zusammensetzung und das Aufkommen gemischter Siedlungsabfälle in Österreich, als auch die Grundlagen ausgewählter Aufbereitungstechniken bei der Behandlung von Abfällen.

Durch nass- und trockenmechanische Aufbereitung von gemischten Siedlungsabfällen wurden Schwergutfraktionen generiert, die im Zuge der praktischen Arbeiten als Aufgabematerial in Sortier- und Trennversuchen eingesetzt werden. Dabei sollen Produkte erzeugt werden, die einen möglichst hohen Anteil an stofflich nutzbaren Bestandteilen enthalten.

Die erzeugten Fraktionen werden daraufhin mittels Sortieranalyse ausgewertet und die erhaltenen Daten in einer Massenbilanz dargestellt. Anschließend werden Reinheit und Ausbringen der Wertstofffraktionen ermittelt und bilden als quantitative Bewertung die Basis für einen Vergleich der beiden Aufbereitungsverfahren.

2 Theorie 1 – gemischte Siedlungsabfälle

In folgendem ersten Theorieteil wird auf gemischte Siedlungsabfälle eingegangen um für die Aufbereitung relevante Eigenschaften sowie anfallende Mengen darzustellen. Dazu werden gemischte Siedlungsabfälle zunächst definiert, anschließend die in Österreich und der Steiermark anfallenden Mengen und Behandlungswege beschrieben und die Zusammensetzung dieser Abfallart behandelt.

2.1 Begriffsbestimmungen

Im österreichischen Abfallwirtschaftsgesetz 2002 (AWG 2002) wird der Begriff „Abfall“ durch den subjektiven und objektiven Abfallbegriff definiert. Demnach wird eine bewegliche Sache dann zum Abfall, wenn sich deren Besitzer entledigen will oder bereits entledigt hat. Diese Entledigungsabsicht stellt den subjektiven Abfallbegriff dar. Ist für die Wahrung öffentlicher Interessen die Sammlung, Lagerung, Beförderung und Behandlung als Abfall notwendig, so gilt die Sache laut objektivem Abfallbegriff als Abfall. Dabei sollen durch die Behandlung mögliche Gefahren für Mensch und Umwelt vermieden werden. Treffen einer oder beide Begriffe auf eine Sache zu, so ist sie als Abfall zu betrachten und entsprechend zu behandeln. (BMNT 2017)

Sämtliche Abfälle aus privaten Haushalten werden laut § 2 AWG 2002 idGF. als „Siedlungsabfälle“ bezeichnet, inklusive jener, die in ihren Eigenschaften oder ihrer Zusammensetzung diesen ähnlich sind. Um diese Materialien korrekt einzuteilen wird das Europäische Abfallverzeichnis verwendet, laut dem gemischte Siedlungsabfälle und ähnliche Gewerbeabfälle der Abfallschlüsselnummer 91101 zugeordnet werden (Bundesministerium für Nachhaltigkeit und Tourismus 2016). Auch nach einem Behandlungsverfahren sind gemischte Siedlungsabfälle als solche zu bezeichnen, sofern ihre Eigenschaften nicht wesentlich verändert wurden. (Bundesministerium für Nachhaltigkeit und Tourismus)

Als Anfallstellen können neben Privathaushalten auch öffentliche Einrichtungen wie Krankenhäuser, Schulen, Verwaltungseinrichtungen, Landwirtschaft, sowie Tourismus-, gewerbliche und industrielle Betriebe identifiziert werden. Hauptbedingung dafür ist die Anbindung an die Müllabfuhr der jeweiligen Gemeinde bzw. die Sammlung in deren Auftrag, welche sich in der gesetzlichen Kompetenz der Länder befindet. (BMNT 2017)

Die so erfassten Siedlungsabfälle werden laut Bundesabfallwirtschaftsplan 2017 (BAWPL 2017) in mehrere Fraktionen unterteilt. Dabei werden Biomüll, Sperrmüll, Altstoffe, Altbatterien, Elektroaltgeräte, Problemstoffe und gemischte Siedlungsabfälle gesammelt. Im Folgenden wird kurz auf die einzelnen Fraktionen eingegangen um eine Abgrenzung der gemischten Siedlungsabfälle von den anderen gesammelten Materialien zu erreichen. (BMNT 2017)

Bei Bioabfall handelt es sich um getrennt gesammelte Abfälle, deren organischer und biologisch abbaubarer Anteil so hoch ist, dass sie sich besonders gut für die Kompostierung und Vergärung eignen. Getrennt gesammelter biogener Abfall kann Speiserest und

Küchenabfälle, Baum- und Strauchschnitt, Blumen, Laub sowie pflanzliche Reste aus der Verarbeitung von Nahrungsmitteln enthalten. (BMNT 2017)

Sperrmüll wird allein über dessen Abmessungen definiert, wodurch Abfälle, die durch ihre Form und Größe nicht mithilfe der herkömmlichen Sammelbehälter erfasst werden können, als Sperrmüll bezeichnet werden. Üblicherweise stellen alte Matratzen, Holzmöbel, Sanitäranlagen und andere Einrichtungsgegenstände diese Fraktion dar. (BMNT 2017)

Als Altstoffe werden laut §2 AWG 2002 idGF. grundsätzlich sämtliche Abfälle bezeichnet, die getrennt von anderen gesammelt werden oder durch eine Behandlung aus Abfällen erzeugt werden, um sie anschließend in eine Verwertung zu leiten. Dazu zählen Leichtverpackungen, Altpapier (Papier, Pappe, Kartonagen, kurz PPK), Altglas (Bunt- und Weißglas), Altmetalle, Alttextilien, Altholz und sonstige Altstoffe, die abhängig von der Sammelregion z.B. Frittierfette oder Reifen sein können. (BMNT 2017)

§ 2 des AWG 2002 definiert ebenso Altbatterien und -akkumulatoren sowie Elektro- und Elektronikaltgeräte (kurz EAG) als Abfallfraktionen, sobald sie im Sinne dieses Gesetzes zu Abfall werden. Diese Geräte wie beispielsweise alte Kühlschränke, Fernseher und unterschiedliche Batterien stammen aus Haushalten, Verwaltungs-, Dienstleistungs-, Gewerbe- und Industriebereichen. (BMNT 2017); (BMNT 2017)

Gefährliche Abfälle, die in Privathaushalten anfallen oder in ihrer Menge und Art mit denen aus Haushalten verglichen werden können, werden als sogenannte Problemstoffe erfasst. Dabei handelt es sich z.B. um medizinische Abfälle, Chemikalienreste, Lacke und Farben, Spraydosen und andere unter Druck stehende Behältnisse. (BMNT 2017)

Bei gemischten Siedlungsabfällen handelt es sich um jene Stoffe, die nicht zu den vorhin erwähnten Fraktionen gehören, also weder Bioabfall, Sperrmüll, Altstoffe, Elektronikaltgeräte, Altbatterien, Straßenkehricht noch Problemstoffe sind, und über die Schwarze Tonne erfasst werden. In den Landesabfallwirtschaftsgesetzen werden gemischte Siedlungsabfälle auch „Hausmüll“ oder „Restmüll“ genannt. (BMNT 2017)

2.2 Zusammensetzung

Gemischte Siedlungsabfälle aus Haushalten bestehen im Wesentlichen aus Papier und Kartonagen, Organik und Kunst- und Verbundstoffen (BMNT 2017). Tabelle 1 ist die genaue Zusammensetzung für das Jahr 2014 zu entnehmen, wobei anzumerken ist, dass diese durch mehrere Faktoren beeinflusst wird. So spielen einerseits das vorhandene Sammelsystem und andererseits die sozio-ökonomische Struktur sowie der Unterschied zwischen ländlichen und städtischen Gebieten eine erhebliche Rolle (BMNT 2017).

Tabelle 1: Zusammensetzung von gemischtem Siedlungsabfall in den Jahren 2004 und 2014 (Förstner 2012); (BMNT 2017).

Fraktionen	Anteil	
	2004	2014
Kunststoffe (Verpackungen und Nichtverpackungen)	10 %	18 %

Fraktionen	Anteil	
	2004	2014
Organik (inkl. vermeidbarer und nicht vermeidbarer Lebensmittelabfälle)	37 %	18 %
Papier, Pappe und Karton (Verpackungen und Nichtverpackungen)	11 %	14 %
Hygieneartikel	11 %	9 %
Textilien und Schuhe	6 %	10 %
Inertstoffe	4 %	6 %
Glas (Verpackungen und Nichtverpackungen)	5 %	5 %
Metalle (Verpackungen und Nichtverpackungen)	3 %	5 %
Sonstige Abfälle und Holz-Nichtverpackungen	-	6 %
Elektronikaltgeräte, Altbatterien und Problemstoffe	2 %	1 %
Holz, Leder, Gummi	1 %	-
Fein-/Grobfraktion	2 %	-
Verbundstoffe	8 %	-
Sortierrest	-	8 %
Summe	100 %	100 %

Vergleicht man die Zusammensetzung des Restmülls in den Jahren 2004 und 2014, so sieht man, dass beispielsweise der Anteil der biogenen Stoffe stark gesunken ist. Im Gegensatz dazu sind Kunststoffe in Form von Verpackungen und Nichtverpackungen um über zwei Drittel gestiegen. Bei der Veränderung der Zusammensetzung spielen mehrere Einflussfaktoren eine Rolle, die Kranert und Cord-Landwehr (2010) in vier Hauptgruppen einteilen. Neben den bereits erwähnten Unterschieden durch die abfallwirtschaftliche Situation, die sozio-ökonomische und bauliche Struktur bestimmen gesetzliche Rahmenbedingungen die Zusammensetzung und Menge von Abfällen. Dabei werden die Ziele des europäischen Rechts durch Bundesgesetze, wie z.B. durch die Abfallverzeichnis-, Elektroaltgeräte- und Deponieverordnung, und den neun Landesabfallwirtschaftsgesetzen mit den daran anknüpfenden Verordnungen umgesetzt (BMNT 2017). Betrachtet man die Bebauungsstruktur eines Sammelgebietes, so werden einerseits Unterschiede zwischen ländlichen und städtischen Gebieten mit variierendem Anteil an Grün- und Gartenflächen, andererseits verschieden stark ausgeprägte Wirtschaftsstrukturen deutlich. Maßgeblich für die Zusammensetzung von Abfällen ist die Ausprägung des Sammelsystems hinsichtlich getrennter Sammlung, Rhythmus der Abfuhr, Behältervolumen und -standort sowie Kostengestaltung und Öffentlichkeitsarbeit. Unabhängig von der Trennmoral prägen Konsumverhalten, Lebensstandard, Umweltbewusstsein, Bildung, Alter, Einkommen und Haushaltsgröße der Bevölkerung die Anteile der einzelnen Fraktionen im Abfall. (Kranert und Cord-Landwehr 2010) Weitere wichtige Faktoren sind laut Bilitewski und Härdtle (2013) die schwankende Wirtschaftslage sowie jahreszeitliche Einflüsse, durch die es etwa im Frühling und Herbst zum vermehrten Anfall von Grünschnitt kommt (Bilitewski und Härdtle 2013).

2.3 Aufkommen

In Österreich fielen im Jahr 2015 rund 59,76 Mio. t Abfälle an, deren unterschiedliche Abfallarten in Abbildung 1 ersichtlich sind (BMNT 2017). Siedlungsabfälle aus Haushalten und ähnlichen Einrichtungen machten mit 4,16 Mio. t einen Anteil von ca. 7,0 % am gesamten Abfall aus (BMNT 2017).

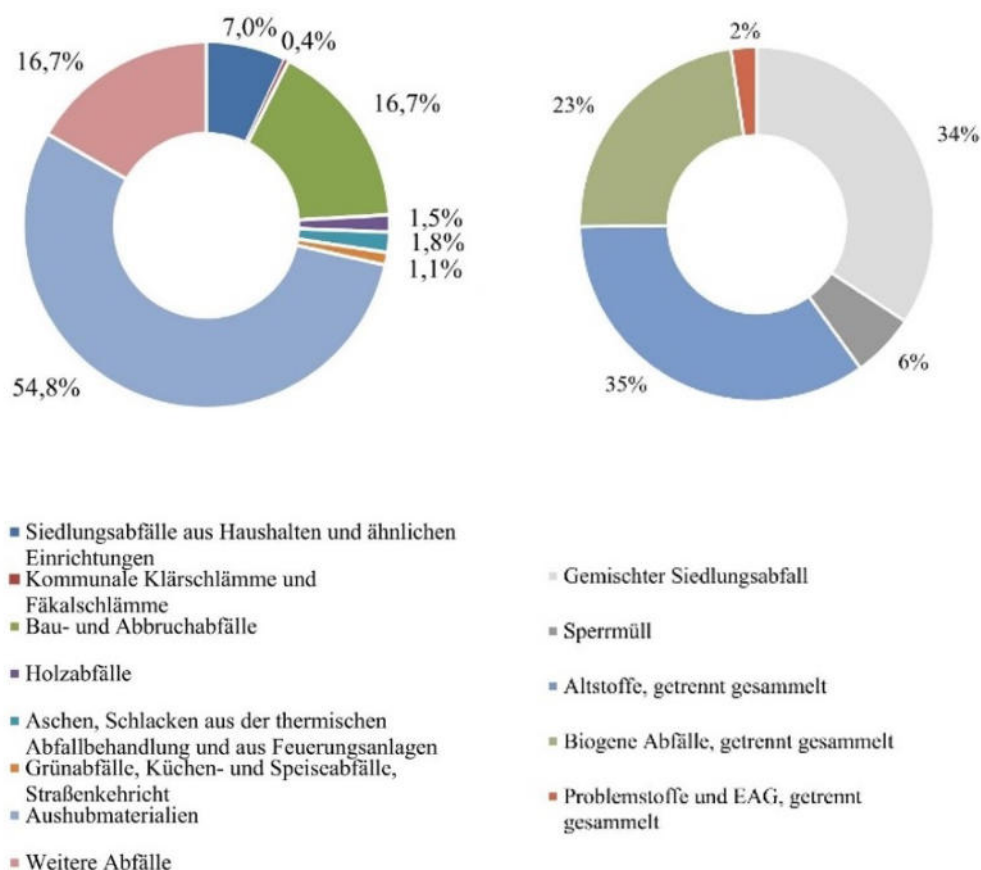


Abbildung 1: Gesamtabfallaufkommen (links) und Zusammensetzung der Siedlungsabfälle (rechts) in Österreich 2015 (Quelle: BMNT 2017; BMNT 2017).

Von diesen 4,16 Mio. t Siedlungsabfall wurden ca. 40 % bzw. 1,66 Mio. t als Rest- und Sperrmüll erfasst. Wie Abbildung 1 zeigt, konnten die übrigen 60 % mittels getrennter Sammlung einer Behandlung zugeführt werden (BMNT 2017). Der in diesem Jahr erfasste gemischte Siedlungsabfall belief sich auf rund 1,43 Mio. t (BMNT 2017). Bei einem Umrechnungsfaktor mit der Dichte von 130 kg/m^3 aus dem Niederösterreichischen Abfallwirtschaftsbericht 2012 entspricht das einem Volumen von ca. $11,01 \text{ Mio. m}^3$ (BMNT 2017; Amt der Niederösterreichischen Landesregierung 2013). Für die Durchschnittsbevölkerung entspricht das einem Pro-Kopf-Aufkommen von 482 kg pro Einwohner (BMNT 2017), was jedoch durch die unterschiedlich ausgeprägten landesrechtlichen Rahmenbedingungen, Sammelsysteme, Zweitwohnsitzanzahl, Tourismusintensität sowie nach Anteil der mitentsorgten gewerblichen gemischte Siedlungsabfälle nach Bundesland stark schwankt. Das wird an den Bundesländern

Vorarlberg und Wien deutlich, wobei Vorarlberg mit 83 kg das geringste und Wien mit 289 kg pro Einwohner das höchste Pro-Kopfaufkommen aufweist. (BMNT 2017)

Von 2009 bis 2015 stieg das Aufkommen an Siedlungsabfällen aus Haushalten und ähnlichen Einrichtungen von 3,90 Mio. t auf 4,16 Mio. t. Das entspricht einer Zunahme von 265 000 t bzw. 6,8 %. Betrachtet man die Menge des Restmülls, gab es einen Anstieg von 30 000 t bzw. 2,1 % von 1,40 Mio. t im Jahr 2009 auf 1,43 Mio. t im Jahr 2015. (BMNT 2017) Die Menge der anfallenden gemischten Siedlungsabfälle wird für das Jahr 2021 auf ca. 1,50 Mio. t geschätzt, was einer Zunahme von rund 7 % entspricht (BMNT 2017).

2.4 Sammlung und Behandlung

Die Verantwortung der ordnungsgemäßen Sammlung und Behandlung von gemischten Siedlungsabfällen tragen die einzelnen Bundesländer. Die Organisation der Sammlung übernehmen die Gemeinden bzw. die entsprechenden Abfallwirtschaftsverbände, die Organisation der Behandlung und Verwertung können entweder von Gemeinde, Verband oder das Land selbst durchgeführt werden. (BMNT 2017)

Sammlung

Abfallwirtschaftsverbände werden auf der Grundlage der Landesabfallwirtschaftsgesetze von den Gemeinden gebildet und übernehmen deren abfallwirtschaftliche Aufgaben. Der Aufgabenbereich der Verbände ist je nach Bundesland unterschiedlich ausgeprägt und kann die Planung der Sammlung inklusive Transport, der Errichtung und dem Betrieb der Behandlungsanlagen und die Gestaltung des Gebührensystems umfassen. (BMNT 2017)

Dabei werden sämtliche Siedlungsabfälle aus Haushalten und zum größten Teil auch haushaltsähnliche Abfälle durch die öffentliche Müllabfuhr meist im Holsystem gesammelt. Haushaltähnliche Abfälle stammen vorwiegend von öffentlichen Einrichtungen, Kleinunternehmen, Dienstleister- und landwirtschaftlichen Betrieben. (BMNT 2017)

Abfallwirtschaftsverbände bzw. Gemeinden können ihre abfallwirtschaftlichen Pflichten an private Unternehmen durch direkte Beauftragung übergeben. Diese Unternehmen besitzen laut AWG 2002 die Genehmigung eines Sammel- und Verwertungssystems und stellen Rechtspersonen dar, die die bundesweite Sammlung und Behandlung inklusive der notwendigen Nachweisführung von bestimmten Abfallarten oder Produkten kostendeckend übernehmen können. Dabei müssen Systeme, die gewerbliche und haushaltsnahe Bereiche betreuen, sicherstellen, dass diese beiden Geschäftsfelder getrennt bedient werden. (BMNT 2017)

Behandlung

Der überwiegende Anteil des österreichischen Restmülls wird entweder direkt oder nach einem ersten Behandlungsschritt thermisch behandelt, der geringere Teil biologisch. Im Jahr 2015 konnten durch Aufbereitung der 1,43 Mio. t gemischten Siedlungsabfälle rund 13 900 t

Altstoffe aussortiert und stofflich verwertet werden. Weitere 1,16 Mio. t wurden der thermischen und 255 600 t der biologischen Behandlung zugeführt. (BMNT 2017)

Mit Stand 2015 wurden in Österreich 11 Anlagen zur Verbrennung und 14 Anlagen zur mechanisch-biologischen Behandlung von Rest- und Sperrmüll betrieben. Zur Ablagerung von Reststoff- und Massenabfällen standen in diesem Jahr 63 Deponien zur Verfügung. Von den 11 Abfallverbrennungsanlagen mit einer jährlichen Gesamtkapazität von 2,55 Mio. t wurden 5 von der öffentlichen Hand betrieben, 4 durch Private-Public-Partnerships, einer Kombination von privatem und öffentlichem Eigentum, und 2 von privaten Unternehmen. Anlagen zur mechanisch-biologischen Behandlung wurden 2015 fast ausschließlich von Ländern, Gemeinden oder deren Abfallwirtschaftsverbänden betrieben. Von 14 in Betrieb befindlichen Anlagen mit 655 000 t Jahresgesamtkapazität waren lediglich 3 in Besitz privater Unternehmen, 2 in Private-Public-Partnerships und der Großteil von 9 Anlagen befand sich im Eigentum der öffentlichen Hand. Bei Anlagen zur Abfallverbrennung und mechanisch-biologischen Behandlung verteilen sich die Kapazitäten zwischen privaten und öffentlichen Betrieben annähernd aliquot auf die Anzahl der Anlagen. Im Gegensatz dazu überwiegen die Restkapazitäten der Deponien für Reststoff- und Massenabfällen der öffentlichen Betreiber. Im Jahr 2015 befanden sich von den auf 63 Standorten verfügbaren 39,1 Mio. m³ Restkapazität 43 Deponien in privatem und 24 in öffentlichem Eigentum. Das freie Deponievolumen der privaten Unternehmen war mit 15,1 Mio. m³ deutlich geringer als die mit 22,5 Mio. m³ zur Verfügung stehenden Kapazitäten der öffentlichen Deponien. 5 Standorte mit 1,5 Mio. m³ Restvolumen wurden über Private-Public-Partnerships betrieben. (BMNT 2017; BMNT 2017)

Kostengestaltung

Die bei der Sammlung und Behandlung von Metall- und Leichtverpackungen entstehenden Kosten werden zu über 80 % durch die Beiträge der Inverkehrsetzer an die Sammelsysteme gedeckt, die restlichen 20 % durch die Erlöse der Altstoffe (BMNT 2017).

Bei Restmüll, Sperrmüll, Problemstoffen, Bioabfall, Altpapier, Altglas und Haushaltsschrott werden diese Kosten teilweise über die Müllgebühren der Haushalte gedeckt. Da wie schon oben erwähnt die Planung und der Betrieb der Sammel- und Verwertungseinrichtungen von den Ländern, Gemeinden oder deren Abfallwirtschaftsverbänden durchgeführt wird, werden auch die Restmüllgebühren von ihnen festgelegt. Daher sind sowohl Sammel-, Verwertungs- als auch Kostengestaltung je nach Gemeinde unterschiedlich ausgeprägt. Die meisten verwendeten Modelle zur Gebührenermittlung beinhalten Intervall der Behälterentleerung und Behältergröße, Länge der Sammelstrecke und das Leistungsangebot der Gemeinde bzw. des Abfallwirtschaftsverbandes. Das können unterschiedliche Öffnungszeiten und Erreichbarkeiten der Altstoffsammelzentren oder zusätzliche Kosten für die Entsorgung einiger Abfälle wie etwa Bauschutt oder Altreifen sein. In einigen Regionen wird die Sammlung und Behandlung des Bioabfalls ebenfalls über die Restmüllgebühren finanziert. (BMNT 2017)

Die Entsorgungskosten von gemischten Siedlungsabfällen werden zu über 95 % von den Restmüllgebühren und zu knapp 5 % von den Verpackungssammelsystemen getragen (BMNT 2017). Die Beiträge von Inverkehrsetzern an das jeweilige Sammel- und Verwertungssystem, die Verrechnung der Kosten an die Betriebe als Abfallerzeuger und die Wertstoff Erlöse der Sammelsysteme und Gemeinden stellen weitere Finanzierungsquellen dar (BMNT 2017).

2.5 Siedlungsabfälle in der Steiermark

Nach dem steiermärkischen Abfallwirtschaftsgesetz 2004 hat das Land Steiermark zur Umsetzung der abfallwirtschaftlichen Grundsätze und Ziele einen Landesabfallwirtschaftsplan zu erstellen (StLAWP 2010). Dieser beinhaltet Ziele für eine nachhaltige Stofffluss- und Abfallwirtschaft, eine Erhebung des Abfallaufkommens inklusive Entwicklungsprognose, eine Beschreibung der Behandlungsanlagen und Strategien zur Vermeidung von Abfällen und deren Behandlung und dient somit als strategisches Planungsinstrument (StLAWP 2010).

2.5.1 Zusammensetzung

Der steirische Restmüll wird im Auftrag des Landes in regelmäßigen Abständen mittels Sortieranalyse untersucht und die Entwicklung der Zusammensetzung über die Jahre diskutiert. Die letzte landesweite Erhebung wurde von Oktober 2012 bis August 2013 durchgeführt und ergab die in Abbildung 2 dargestellten Fraktionen.

Auffällig ist der hohe Anteil an Wertstoffen wie Papier, Karton, Metall, Glas und Kunststoffe, die gesamt rund 34 % ausmachen. Laut Abfallbericht Steiermark würde der Erlös der Altstoffe rund 11 Mio. € betragen und inklusive der verringerten Behandlungskosten rund 20 Mio. € jährlich einsparen. Der Anteil an Verpackungen und Lebensmitteln im Restmüll verursachen einen Wertverlust von ca. 150 Mio. € jährlich und stellen deshalb zukünftig einen wichtigen Bereich der steirischen Abfallwirtschaft dar.

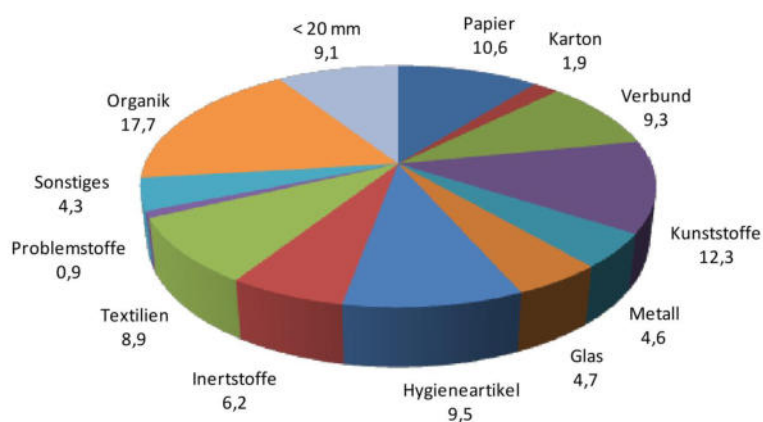


Abbildung 2: Zusammensetzung des steirischen Restmülls 2013 in Prozent (IUT 20.02.2014).

2.5.2 Aufkommen

Im Jahr 2015 wurden in der Steiermark 545 000 t Siedlungsabfälle gesammelt, was einem Pro-Kopf-Aufkommen von ca. 445 kg pro Einwohner entspricht. Der Kommunale Sperr- und Restmüll belief sich dabei auf ca. 197 900 t oder 162 kg pro Einwohner und hatte einen Anteil von 36,3 % am Gesamtabfallaufkommen. Betrachtet man nur die gemischten Siedlungsabfälle, so hatten diese mit 127,2 kg pro Einwohner einen Anteil von 28,6 % am gesamten Abfallaufkommen. (Abfallbericht Steiermark 23.06.2017); (Abfallbericht Steiermark 23.06.2017) Die Veränderungen des Pro-Kopf-Aufkommens des steirischen Restmülls zwischen 1990 und 2015 sind in Abbildung 3 ersichtlich. Zu erkennen ist dabei der starke Rückgang der gesammelten Menge zwischen 1990 und 1994. Seit 2010 hat sich die Restmüllmenge auf ca. 130 kg/EW eingependelt, welche sich für die Jahresdurchschnittsbevölkerung von 1.225.187 Einwohnern auf insgesamt 155 889 t beläuft (Abfallbericht Steiermark 23.06.2017).

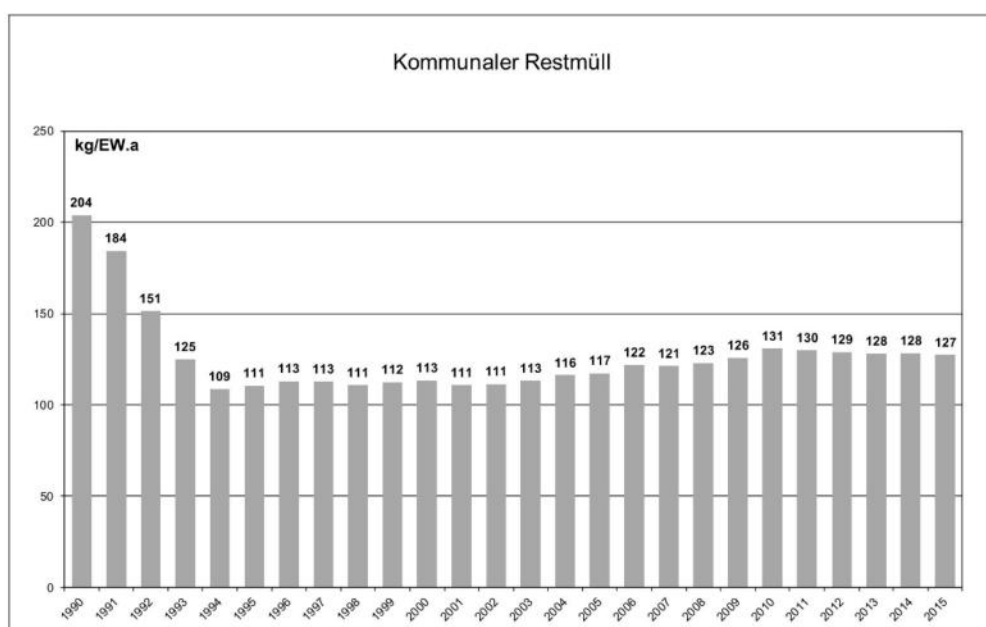


Abbildung 3: Restmüllaufkommen in der Steiermark 1990 - 2015 in kg/EW (Abfallbericht Steiermark 23.06.2017).

Vergleicht man die Menge an Restmüll in der Steiermark mit der in Österreich, so liegt das Pro-Kopf-Aufkommen der Steirer im Jahr 2015 mit den erwähnten 127 kg/EW unter den 166 kg/EW für Österreich. Dabei ist der Anteil des Restmülls am Gesamtaufkommen der aus Haushalten und ähnlichen Einrichtungen gesammelten Siedlungsabfälle in Österreich höher und liegt im Gegensatz zur Steiermark (28,6 %) bei 33,8 %. (Abfallbericht Steiermark 23.06.2017)

2.5.3 Sammlung, Behandlung und Beseitigung

Im steirischen Landesabfallwirtschaftsplan wird festgelegt, dass die Sammlung der Siedlungsabfälle durch eine öffentliche Abholung zu erfolgen hat, welche die Gemeinden zu

organisieren haben. Im Zuge dessen werden z.B. Anzahl und Größe der Behälter, die Gebührengestaltung und Abfuhrordnung durch die Gemeinden festgelegt.

Der Siedlungsabfall geht zu dem Zeitpunkt in das Eigentum der Gemeinde bzw. des Abfallwirtschaftsverbands über, sobald er in ein Sammelfahrzeug verladen wurde. Der Bürger bzw. Grundstückseigentümer ist dabei in der Pflicht, bzw. ist berechtigt, seine Liegenschaft an die öffentliche Abfuhr anzuschließen. Liegt sie außerhalb des Sammelbereich, kann der Abfall auch an festgelegten Sammelstellen abgegeben werden.

Die Behandlung, also Beseitigung bzw. Verwertung, muss durch die Abfallwirtschaftsverbände erfolgen, deren Aufgaben bereits in Kapitel 2.4 erwähnt wurden. Die Rahmenbedingungen dieser Gemeindeverbandsorganisationen werden einerseits im Steiermärkischen Gemeindeverbandsorganisationsgesetz 1997 und andererseits im StAWG 2004 geregelt. (StLAWP 2010)

Sammlung

In der Steiermark werden die gemischten Siedlungsabfälle überwiegend mit Hilfe von Behältern oder Sammelsäcken im Holsystem gesammelt. Die Abholung erfolgt in den meisten Gemeinden in einem vierwöchigen Intervall, teilweise kommt auch ein Ein-, Zwei-, Sechs- oder Acht-Wochen-Rhythmus zur Anwendung. Das Bringsystem für die Restmüllsammlung über beispielsweise Altstoffsammelzentren ist laut StAWG 2004 nicht erlaubt. (StLAWP 2010)

Behandlung

Die Behandlung sämtlicher gemischten Siedlungsabfälle aus Haushalten und dem Gewerbe erfolgt seit dem 1.1.2004 in der Steiermark mechanisch-biologisch. Dabei wird die mechanische Aufbereitung entweder in Anlagen zur mechanisch-biologischen Behandlung (MBA) oder in Restmüll-Splitting-Anlagen durchgeführt werden.

In beiden Anlagentypen werden zuerst durch mechanische oder händische Vorsortierung Störstoffe und verwertbare Altstoffe wie Metalle abgetrennt. Die anschließende Zerkleinerung ermöglicht einerseits das Aufschließen von Materialverbunden und andererseits das Herabsetzen der Korngröße für die nachfolgenden Aufbereitungsschritte. Dabei eingesetzten Aggregate zerkleinern entweder durch Schneid-, Scher-, Druck-, Prall- oder Schlagwirkung. Sie können in schnell oder langsam laufende, robuste oder störstoffempfindliche Zerkleinerer eingeteilt werden. Die Abtrennung von Eisen- und Nichteisenmetallen mittels Magnet- und Wirbelstromscheidern wird nicht nur aufgrund ihres Verwertungspotentials, sondern auch zum Vermindern von übermäßigem Verschleiß in den eingesetzten Aggregaten durchgeführt. Die anschließende Siebung teilt den Materialstrom in eine heizwertreiche Grobfraction (Siebüberlauf) und eine heizwertarme Feinfraction (Siebdurchgang). Die heizwertreiche Fraction wird entweder nach einer weiteren Aufbereitung in der Mitverbrennungsanlage wie der Zementindustrie als Ersatzbrennstoff eingesetzt, in einer Müllverbrennungsanlage direkt verbrannt oder, sofern es sich um

industrielle und gewerbliche Abfälle handelt, innerbetrieblichen Verbrennungs- und Pyrolyseanlagen zugeführt. 2015 konnten 100 000 t in Abfallverbrennungsanlagen und 80 000 t in Mitverbrennungsanlagen behandelt werden. (Abfallbericht Steiermark 23.06.2017; StLAWP 2010; StLAWP 2010)

Anschließend erfolgt die biologische Behandlung der heizwertarmen Fraktion in einer ersten Stufe durch eine zwei bis acht Wochen lange Intensivrotte in geschlossener Verfahrensweise. Die zweite biologische Stufe besteht aus einer sechs- bis zwölfwöchigen Nachrotte in Form von Tafelmieten entweder offen oder überdacht. Dabei werden die enthaltenen organischen Bestandteile durch Mikroorganismen abgebaut um ein deponierfähiges Material zu erzeugen, das die Parameter der Deponieverordnung 2008 erfüllt. In einer letzten Siebung werden verbliebene Störstoffe entfernt und diese als zweite heizwertreiche Fraktion einer thermischen Verwertung zugeführt. (StLAWP 2010)

Im Jahr 2008 standen in der Steiermark insgesamt 6 Anlagen zur mechanisch-biologischen Behandlung mit einer Gesamtkapazität von rund 212 000 t/a zur Verfügung. Weitere 6 Restmüllsplittingsanlagen konnten bis zu 269 000 t/a aufbereiten. (StLAWP 2010) Bis zum Jahr 2014 veränderte sich die Gesamtkapazität der MBAs auf ca. 200 000 t/a in 4 Anlagen, die Kapazität und Anzahl der Restmüllsplittingsanlagen blieb erhalten. (Abfallbericht Steiermark 23.06.2017)

Abbildung 4 zeigt die Behandlungswege der ca. 148 000 t an gemischten Siedlungsabfällen aus Haushalten und zusätzlich ca. 106 000 t an ähnlichen Gewerbeabfällen für das Jahr 2008 in der Steiermark. Dabei gelangten 60 % (ca. 153 000 t) in Restmüllsplittingsanlagen, woraus 5 % Wertstoffe und 44 % heizwertreiche Fraktion erzeugt wurden, der restliche heizwertarme Anteil von 55 % ging in Anlagen zur mechanisch-biologischen Behandlung. 40 % (ca. 100 000 t) des behandelten Restmülls wurden in der mechanischen Aufbereitung der MBAs in ca. 10 % heizwertreiche und 90 % heizwertarme Fraktionen getrennt. Die heizwertreichen Fraktionen der MBAs und Splittingsanlagen von insgesamt rund 169 000 t wurden biologisch behandelt und die nach einem Rotteverlust von ca. 37 % verbliebenen 107 000 t wurden in einer Endabsiebung in rund 40 % heizwertreiches und 60 % stabilisiertes Material für die thermische Verwertung bzw. Deponierung getrennt. Insgesamt wurden somit 46 % (rund 117 000 t) der gemischten Siedlungsabfälle aus Haushalten und ähnliche Gewerbeabfälle thermisch verwertet, 26 % (rund 66 000 t) wurden auf Massenabfalldeponien abgelagert und 4 % (rund 9 000 t) konnten stofflich verwertet werden. (StLAWP 2010)

Im Jahr 2015 stieg die Menge der behandelten Siedlungsabfälle auf rund 198 000 t an, wovon nach einem ersten Aufbereitungsschritt ca. ein Drittel thermisch verwertet und zwei Drittel einer biologischen Behandlung zugeführt wurden. (Abfallbericht Steiermark 23.06.2017)

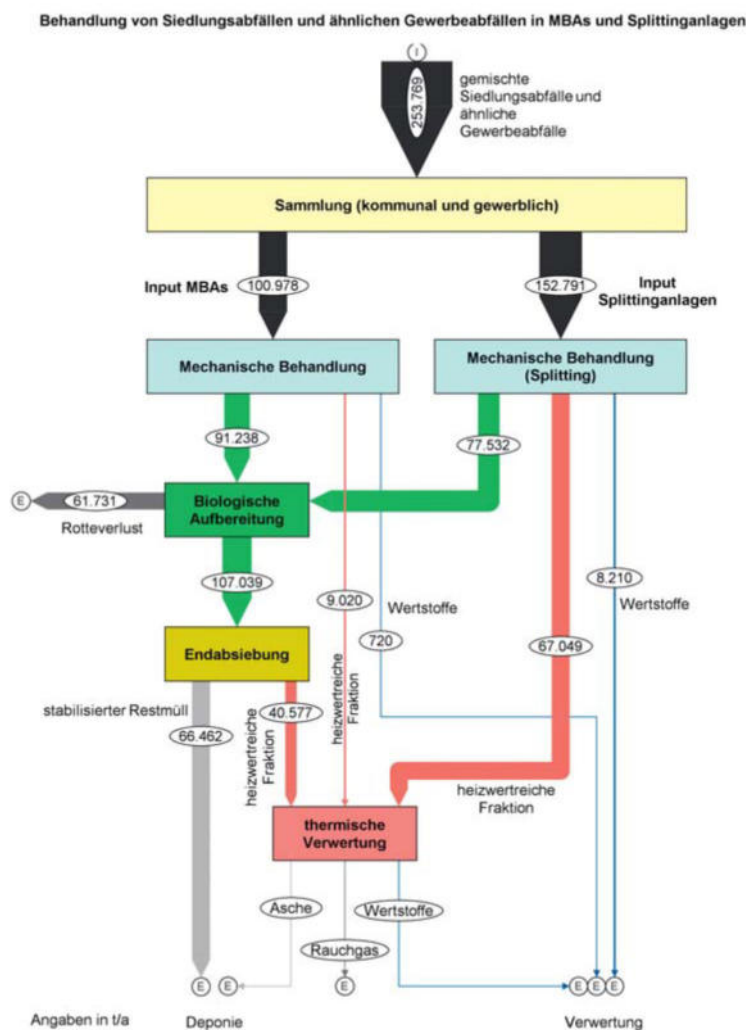


Abbildung 4: Behandlungswege von gemischten Siedlungsabfällen aus Haushalten und ähnlichen Einrichtungen in der Steiermark 2008 (StLAWP 2010).

Beseitigung

Das in Anlagen zur mechanisch-biologischen Behandlung stabilisierte Material wurde im Jahr 2009 auf neun Massenabfalldeponien in der Steiermark abgelagert. Anfang 2009 betrug das zur Verfügung stehende Volumen auf Massenabfalldeponien rund 3,7 Mio. m³, wovon seit 2004 jährlich rund 200 000 m³ durch den Einbau von ca. 250 000 t Massenabfall verbraucht wurden. Mit der Deponieverordnung 2008 wurde die Ablagerung von Rückständen aus Abfallverbrennungsanlagen auf Massenabfalldeponien verboten und diese ausschließlich auf Restabfalldeponien erlaubt. Dadurch wurden an den meisten Standorten abgetrennte Reststoffkompartimente errichtet bzw. als reine Reststoffdeponien betrieben, wodurch das Deponievolumen der Massenabfallkompartimente auf 7 Standorten bis Ende 2015 unter Berücksichtigung der deponierten Mengen auf rund 1,8 Mio. m³ reduziert wurde. Durch den jährlichen Bedarf an Deponievolumen von derzeit 60 000 t bis 80 000 t wird die Restkapazität auf den steirischen Massenabfalldeponien noch ca. 20 Jahre ausreichen. (StLAWP 2010; Abfallbericht Steiermark 23.06.2017)

2.5.4 Kosten und Umweltfaktoren

Durch die Erhebung von Müllgebühren wird der größte Teil der Kosten für die Sammlung und Behandlung von gemischten Siedlungsabfällen abgedeckt, dessen Median 293 €/t bzw. 22,8 €/EW·a im Jahr 2008 ausmachte. Dabei entfielen 125,5 €/t (Median) auf die Sammlung und 164,6 €/t (Median) auf die Behandlung. Den spezifischen Kosten für die Entsorgung des Restmülls stehen durch z.B. die Verwertung von Altpapier erzielte Erlöse und Entgelte in Höhe von 7,7 €/EW·a (Median) gegenüber. (StLAWP 2010) Dabei ist zu erkennen, dass nicht alle Gemeinden die Deckung ihrer abfallwirtschaftlichen Kosten erreichen. Rund 29 % der Gemeinden erheben Müllgebühren, die weniger als 95 % ihrer Kosten abdecken, weitere 21 % der Gemeinden können zwischen 95 % und 100 % decken. (StLAWP 2010)

Um bei einem steigenden Abfallaufkommen nicht nur eine kostendeckende, sondern auch ressourcenschonende Bewirtschaftung des steirischen Restmülls zu betreiben ist es notwendig die stoffliche Verwertung zu steigern. Potential dafür liegt laut (StLAWP 2010) in der Verringerung des zurzeit rund 20 %-igen biogenen Anteils im Restmüll, der Steigerung der Eisen- und Nichteisenmetallabtrennung bei derzeit nicht eingesetzten Sortieraggregaten sowie die Qualitätssteigerung der erzeugten Metallfraktionen. Diese Maßnahmen führen weiters zu einer Schonung von Deponievolumen, das laut (StLAWP 2010) für den Zeitraum bis zur Genehmigung neuer Kapazitäten notwendig ist.

Durch den Anstieg der stofflichen Verwertung ist es der Abfallwirtschaft möglich einen Beitrag zur CO₂-Einsparung zu leisten. Diese wird auf bis zu 65 200 t CO₂-Äquivalente jährlich geschätzt, die hier in erster Linie durch die Verwertung von getrennt gesammelten Wertstoffen erzielt werden. Für Altglas wären das beispielsweise 196 kg CO₂/t (bei einem Rezyklateinsatz von 80 %), für Eisenmetalle 860 kg CO₂/t und für Nichteisenmetalle 3.520 kg CO₂/t. (StLAWP 2010)

3 Theorie 2 – Aufbereitung von Abfällen

Die in der Abfallaufbereitung eingesetzten Aufbereitungsaggregate im Bereich der Zerkleinerung, Klassierung sowie Sortierung beeinflussen maßgeblich die Effizienz der Aufbereitung und werden deshalb im Folgenden in ihrer Funktionsweise vorgestellt. Um den Trennerfolg von Sortiervorgängen quantifizieren zu können und einen in der Praxis relevanten Indikator zu behandeln wird zum Ende des Kapitels auf Ausbringen und Reinheit eingegangen.

3.1 Zerkleinerung

Das Umwandeln des Aufgabeguts in eine feinere Körnung (Bilitewski und Härdtle 2013) dient dabei als Aufschlusszerkleinerung dem Lösen von Materialverbunden, der Herstellung definierter Korngrößenverteilungen sowie der Erhöhung der spezifischen Oberfläche der Einzelkörner (Kranert und Cord-Landwehr 2010). Die durch mechanische Beanspruchung eingestellten äußeren Korneigenschaften, wie unter anderem die Kornform, bestimmen dabei einerseits den Trennerfolg in der anschließenden Sortierung und sind andererseits für den Materialeinsatz in den nachfolgenden Aufbereitungsaggregaten sowie für die Beschickung von Verwertungsanlagen mit den erzeugten Sekundärrohstoffen maßgeblich (Martens 2011).

Bei mechanischer Beanspruchung können Spröd- und Zähbruch unterschieden werden, je nachdem ob das Material verformungsarm bzw. -los oder nach einer plastischen Deformation bricht. Auf diese Weise lassen sich Aufgabegüter in spröde und zähe Materialien einteilen, die wiederum durch unterschiedliche Zerkleinerer optimal aufbereitet werden können (Martens 2011). Diese arbeiten mit Druck-, Reib-, Scher-, Schneid- oder Prallbeanspruchung (Bilitewski und Härdtle 2013). Eine Übersicht der unterschiedlichen Apparate bietet Tabelle 2.

Tabelle 2: Zerkleinerer in der Abfallaufbereitung (Kranert und Cord-Landwehr 2010).

Rohstoff	Material-eigen-schaft	Grob-zerkleinerung	Mittel-zerkleinerung	Fein-zerkleinerung
	Zielkorn-größe	ca. < 150 mm	ca. < 50 mm	ca. < 10 mm
Mineralien Bauschutt	Hart bis mittelhart	Backenbrecher Prallbrecher Schlagwalzen- brecher	Schlagbrecher Prallbrecher	Stab- /Kugelmühle Feinprallmühle Stiftmühle Schlagkreuz- mühle
Metalle/ Schrotte Altkabel	duktil	Schrottschere Shredder Hammer- brecher Rotorschere	Shredder Hammermühle Einwellen- zerkleinerer Schneidmühle	Spänebrecher Schneidmühle

Rohstoff	Material-eigen-schaft	Grob-zerkleinerung	Mittel-zerkleinerung	Fein-zerkleinerung
	Zielkorn-größe	ca. < 150 mm	ca. < 50 mm	ca. < 10 mm
Haus- und Sperrmüll Gewerbe-abfall	Weich, mittelhart, elastisch bis zäh- elastisch	Rotorschere Kammer- walzenzerkl. Schrauben- mühle Autogenmühle	Rotorschere Kammer- walzenzerkl. Hammermühle Einwellen- zerkleinerer	Einwellen- zerkleinerer Hammermühle
Thermo-plaste Elasto- mere	zäh- elastisch	Rotorschere	Einwellen- zerkleinerer Schneidmühle Hammermühle (kryogen)	Schneidmühle Hammermühle (kryogen)

Häufige Verwendung bei der Aufbereitung von Restmüll finden sogenannte Einwellenzerkleinerer, die durch unterschiedlichste Schneidgeometrien vielseitig einsetzbar sind. Dabei sitzen Messer auf einem massiven Rotor, der sich mit einer Umfangsgeschwindigkeit von ca. 5 – 10 m/s in einem Gehäuse aus Stahlblech dreht. Das Aufgabegut wird zwischen Schneidmessern an Rotor und Gehäusewand mit einem Abstand von ca. 0,1 mm schneidend zerkleinert und durch einen Siebkorb, welcher ca. 180° des Umfangs umschließt und durch den die gewünschte Korngröße eingestellt werden kann, ausgetragen. Das Material wird direkt über einen Trichter aufgegeben und mittels zyklisch arbeitendem hydraulischem Schieber in den Rotorbereich gedrückt, der durch eine lastabhängige Vorschubregelung einen konstanten Durchsatz ermöglicht. Kommt es zu einem Störfall, kann durch ausweichbar gelagerte Messer am Stator, Hydrokopplungen und hochklappbarem Siebkorb ein Ausbrechen der Messer vermieden werden. Die Ausführung dieser Zerkleinerer reicht von 0,35 bis 350 kWh Leistung mit einer Arbeitsbreite von bis zu 500 cm. (Kranert und Cord-Landwehr 2010)

3.2 Siebung

Die Siebung, als Klassierverfahren, trennt das Aufgabematerial anhand dessen räumlicher Abmessungen in Siebdurchgang sowie -überlauf. Dabei werden die Partikel über einen Siebboden mit definierten Öffnungen bewegt damit feinere Körner diesen passieren können. Dadurch können Materialien konfektioniert, in Fraktionen angereicherte Stoffgruppen abgetrennt, Störstoffe entfrachtet, grobes Material zur Nachzerkleinerung rückgeführt oder Korngrößenbereiche für die nachgeschaltete Sortierung eingestellt werden. (Kranert und Cord-Landwehr 2010) Siebmaschinen werden die anhand der Eigenschaften des Aufgabematerials (z.B. Kornform, Feuchtigkeitsgehalt, Schüttdichte) ausgewählt, Tabelle 3 liefert dazu einen Überblick. (Kranert und Cord-Landwehr 2010)

Tabelle 3: Siebe in der Abfallaufbereitung (Kranert und Cord-Landwehr 2010).

Siebmaschinen	Anwendungsgebiete	Korngrößenbereiche
Trommelsiebe	Klassierung von Hausmüll, Gewerbeabfall, LVP	40 bis 250 mm
Linearschwingsiebe	Klassierung von Bauschutt, MVA-Asche, Entwässerung	1 bis 80 mm
Kreisschwingsiebe	Klassierung von Bauschutt, MVA-Asche, Entwässerung	1 bis 80 mm
Plansiebe	Schonende Absiebung von zerkleinertem Altholz, Holzmehl	100 µm bis 30 mm
Taumelsiebe	Faserabtrennung in der Papieraufbereitung, Entwässerung	100 µm bis 5 mm
Spannwellensiebe	Für feuchtes und siebschwieriges Gut wie Kompost, MVA-Asche	1 bis 30 mm
Scheibensiebe	Klassierung von Inertstoffen wie Grabenaushub und leittigen Böden	10 bis 30 mm
Sternsiebe	Klassierung von Altpapier, Feinklassierung von Kompost	10 bis 300 mm
Stangensizer	Grobe Vorklassierung von MVA-Asche, Bauschutt, Gewerbeabfall	100 bis 300 mm

Wurfsiebe

Die am weitesten verbreiteten Siebmaschinen sind Wurfsiebe, welche im mittleren Korngrößenbereich den „Standardprozess“ in der Siebung darstellen. (Bunge 2012) Obwohl eine große Zahl an unterschiedlichen Bauarten existiert wird in allen ein Siebbelag mechanisch bewegt und das Siebgut durch die schwingende Bewegung transportiert und aufgelockert. (Kranert und Cord-Landwehr 2010)

Die Einteilung der unterschiedlichen Bauarten kann einerseits danach erfolgen ob der Siebkasten oder lediglich der Siebboden in Schwingung versetzt werden, letzteres wird bei der Fein- und Feinstkornabsiebung eingesetzt. Bei Schwingung des Siebkastens kann weiter nach der Form der Schwingungsbahn unterschieden werden, es gibt Kreisschwinger, Linear- bzw. Bogenschwinger und Ellipsenschwinger. Andererseits kann anhand der Schwingungsbahn unterschieden werden. Diese wird entweder durch eine starre Kopplung des Siebkastens und der fest gelagerten Antriebseinheit (hub- bzw. starrbegrenzt) oder durch eine elastische Kopplung (kraft- bzw. elastisch begrenzt) bestimmt. Weiters können Wurfsiebe in unterkritisch, kritisch oder überkritisch schwingend eingeteilt werden, abhängig davon ob die Erregerfrequenz unter, im oder über dem Resonanzbereich bzw. der Eigenschwingungszahl des Siebkastens liegt. (Schubert 2008)

Der Siebkasten besteht aus Traversen, den Seitenteilen und dem Rahmen, der den Siebbelag trägt und aus unterschiedlichen Werkstoffen gefertigt sein kann. Im Grobkornbereich kommen Lochplatten aus Stahl oder Polyurethan mit runden oder rechteckigen Sieböffnungen zum Einsatz, im Feinkornbereich kleiner 4 mm werden Siebgewebe aus Stahl- oder Kunststoffdrähten verwendet da diese eine größere offene

Siebfläche besitzen. Für die Entwässerung des Aufgabeguts werden Spaltsiebe bevorzugt. (Kranert und Cord-Landwehr 2010)

Grundsätzlich kann mithilfe von Schwingsieben trocken und auch nass gesiebt werden, die Nasssiebung kann entweder mit Bebrausung oder auch zur Entwässerung durchgeführt werden. Um die Siebeläge vor Beschädigung durch schwere Störstoffe zu schützen oder mehrere Fraktionen in einem Prozess zu erzeugen werden mehrere Siebdecks übereinander angeordnet. (Kranert und Cord-Landwehr 2010)

In Linearwurf- oder Linearschwingsieben ist das Siebdeck horizontal oder sogar in Förderrichtung leicht ansteigend angebracht und wird in einem Winkel von $30 - 60^\circ$ diagonal dazu bewegt. Der Siebkasten steht entweder auf Gummipuffern oder Stahlfedern und wird durch zwei gegenläufig rotierende Exzentrerscheiben in freie Schwingung gebracht oder durch eine Schubkurbel zwangserregt. Beim An- und Abfahren wird der Resonanzbereich möglichst zügig durchfahren und die Siebung oberhalb der Eigenresonanz der Lagerfedern durchgeführt. Dabei schwingt das Siebdeck so schnell, dass das Aufgabegut abhebt und sich auf einer Wurfparabel in Förderrichtung bewegt während das Sieb unter dem Material hindurch zurückschwingt, wodurch das Aufgabegut „hüpfend“ über den Siebboden wandert. Der prinzipielle Aufbau eines Linearschwingsiebes ist in Abbildung 5 dargestellt. (Bunge 2012)

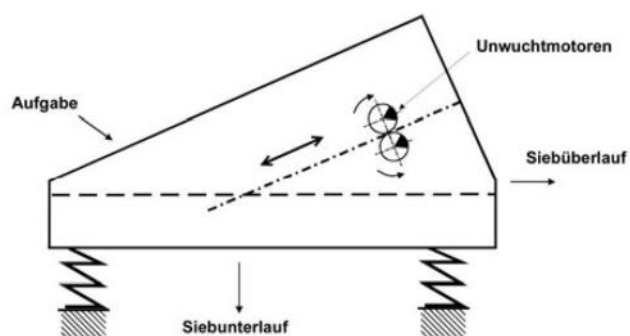


Abbildung 5: Prinzipieller Aufbau eines Linearschwingsiebes (Kranert und Cord-Landwehr 2010).

In der Abfallaufbereitung werden Schwingsiebe vorwiegend für Korngrößen < 80 mm in der Klassierung von Altglas, Elektronikschrott, Schlacken und Bauschutt eingesetzt. Typische Arbeitsbreiten von Linearschwingsieben liegen zwischen 500 mm und 4500 mm bei Längen zwischen 2000 und 7000 mm. Ihre Siebflächen sind horizontal angebracht bzw. bis 5° ansteigend geneigt und beschleunigen das Aufgabematerial mit max. 7 g linear zur Förderrichtung bei Amplituden zwischen 3 mm und 16 mm. Dazu werden Antriebsdrehzahlen zwischen 700 min^{-1} und 1450 min^{-1} benötigt. (Kranert und Cord-Landwehr 2010; Kranert und Cord-Landwehr 2010)

Der Trennerfolg bei der Verwendung von Schwingsieben ist in erster Linie von den Eigenschaften des Aufgabegutes wie der Kornform, Korngrößenverteilung und des Wassergehalts abhängig. Der erreichbare Durchsatz ist grundsätzlich direkt proportional zur Arbeitsbreite, die Güte des Siebprozesses wird durch die Länge des Siebbodens bestimmt. (Kranert und Cord-Landwehr 2010)

3.3 Sortierung

Laut (Martens 2011) versteht man unter Sortierung im engeren Sinn das Einteilen und Trennen makroskopischer Feststoffpartikel anhand ihrer physikalischen Eigenschaften. Diese Trennkriterien können äußere oder innere Korneigenschaften darstellen und in unterschiedlichen Prozessen zur Anwendung kommen. Abbildung 6 enthält eine Übersicht der wichtigsten Trennmerkmale und häufig eingesetzter Sortiermaschinen, im folgenden Kapitel wird auf ausgewählte Prozesse näher eingegangen.

Trennkriterien	Verfahren/Trennmedium	Häufig verwendete Sortiermaschinen	Beispiele für Anwendungen
Magnetische Suszeptibilität, Form, Masse	Magnetscheidung <i>Luft/Suspensionen</i>	Überband-, Trommel- und Bandrollenmagnetscheider	Abtrennung von Fe-Metallen aus Abfallgemischen
Elektrische Leitfähigkeit, Korngröße, Masse	Wirbelstromscheidung <i>Luft</i>	Wirbelstromscheider (NE-Metallscheider)	Abtrennung von NE-Metallen aus Abfallgemischen
Elektrische Leitfähigkeit, Dielektrizitätszahl	Elektrosortierung <i>Luft</i>	(Korona-) Walzenscheider, Freifallscheider	Abtrennung feinkörniger Metalle, Trennung von Kunststoffen
Stoffdichte, Korngröße, Kornform	Windsichtung, Luftherdtrennung <i>Luft</i>	Aufstrom- und Quersstromwindsichter, Luftherde	Abtrennung leicht flugfähiger Stoffe, Sortierung von Elektronikschrott
Stoffdichte, Korngröße, Kornform	nasse Strömungssortierung <i>Wasser</i>	Setzmaschinen, Aufstromsortierer, Nassherde, Wendelscheider	Sortierung von Bauschutt und Kabel-, Elektronikschrott
Stoffdichte, Korngröße, Kornform	stat. Schwimm-Sinktrennung, Trennung im Zentrifugalfeld <i>Wasser/Suspensionen</i>	Trommel- und Trogscheider, Hydro- und Schwert- rübezyklone	Sortierung von Metallen und Kunststoffen untereinander
Stoffdichte	Trennung im Zentrifugalfeld <i>Wasser/Saizlösungen</i>	Sortierzentrifugen, Hydrozyklone	Sortierung unterschiedlicher Kunststoffarten
Farbe, Lichtadsorption, elektrische Leitfähigkeit, Stoffdichte	Sensorgestützte Sortierung <i>Luft</i>	Farbsortierer, Nahinfrarot Trenner, Metalltrenner, Röntgensortierer, LIBS-Trenner	Abtrennung von Altglas, Metallen, Kunststoffen, Getränkekartons, Holz, Papier
Sprödigkeit, Duktilität, Korngröße	selektive Zerkleinerung und Siebklassierung <i>Luft</i>	Hammer- oder Prallmühlen und Siebe	Trennung von Kunststofffolien und Papier
Stofflösevermögen	Stofflösung <i>Wasser</i>	Pulper, Lösetrommeln	Rückgewinnung von Papierfasern aus Altpapier

Abbildung 6: Trennkriterien und Sortiermaschinentypen (Kranert und Cord-Landwehr 2010).

3.3.1 Dichtentrennung

Bei Sortierprozessen werden Feststoffgemische anhand von stofflichen Eigenschaften, welche als Trennmerkmale bezeichnet werden, getrennt. Dabei müssen sich die zu trennenden Partikel hinsichtlich des gewählten physikalischen Merkmals stark genug unterscheiden. (Schubert 2008) Da unterschiedliche Stoffe gewöhnlich unterschiedliche Dichten besitzen, stellt diese das wohl wichtigste Trennmerkmal in der Sortierung dar. In realen Prozessen wird der Einfluss der Dichte jedoch von weiteren Einflussfaktoren überlagert, beispielsweise Wirbelströmungen, Turbulenzen, Sinkgeschwindigkeiten, Formeinflüssen oder der Partikelgröße (Schubert 2008). Der Trennvorgang besteht aus der Entmischung und der Schichtung der spezifisch leichteren und schwereren Teilchen eines Feststoffgemischs. Um die Separation unter realen Bedingungen durchführen zu können, müssen Hindernisse wie Haftreibung unter den Partikeln sowie zwischen Partikeln und Behälterwand überwunden werden. Die erforderliche verbesserte Beweglichkeit und Verschiebbarkeit der Partikel zueinander kann in einem Fluid erreicht werden. Dabei gewährleisten die gewählte Dichte des Fluids sowie der Ruhe- bzw. Bewegungszustand einen Auftrieb der spezifisch leichten Teilchen, der groß genug ist, um sie in Richtung Fluidoberfläche zu transportieren. Je nachdem ob Luft oder Wasser bzw. Schwerertrüben als Trennmedium verwendet werden unterscheidet man Trocken- und Nassverfahren. Abbildung 7 bietet eine Übersicht einiger Dichtesortierapparate inklusive ihrer Wirkungsbereiche. (Bunge 2012)

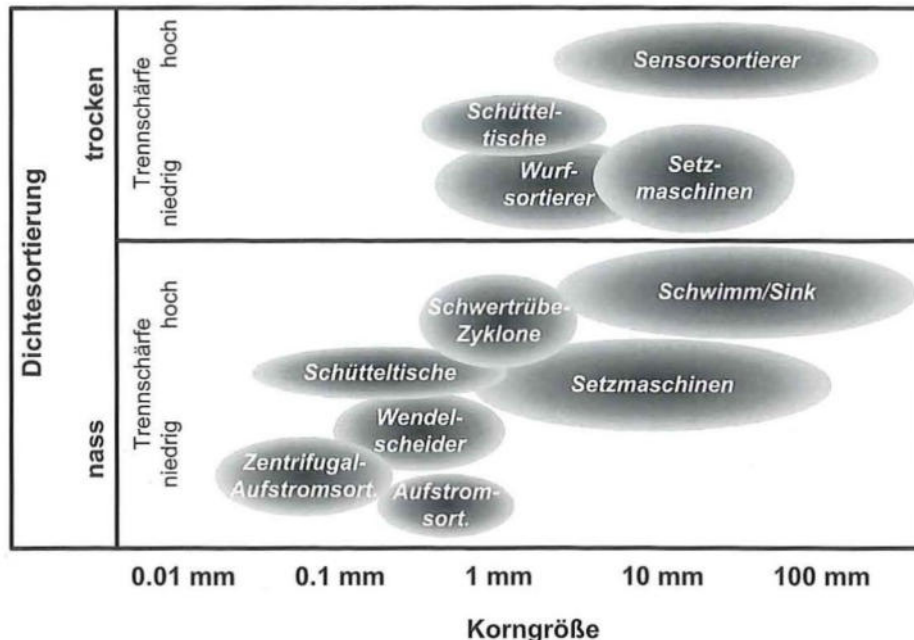


Abbildung 7: Übersicht trockener und nasser Dichtesortierverfahren (Bunge 2012).

Die Verfahren werden weiter in Quer- und Gegenstromtrennung eingeteilt, abhängig davon ob der Fluidstrom quer oder in entgegengesetzter Richtung auf den Partikelstrom trifft. In rotierenden Strömungen werden zusätzlich zur Gewichtskraft Fliehkräfte erzeugt, die die Gewichtskraft um ein Vielfaches übersteigen und dadurch kleinere Trennkorngrößen

ermöglichen. Daher kann weiters die Trennung im Schwerkraft- und Zentrifugalkraftfeld unterschieden werden. (Schubert 2008)

3.3.2 Nassmechanische Aufbereitung

Bei der Hydrosortierung im Schwerkraftfeld werden die Verfahren weiter in Horizontalstromklassierer (laminare Querstromtrennung), mechanische Klassierer (Grobguttransport mittels z.B. Rechen oder Schrauben, turbulente Querstromtrennung) und Aufstromklassierer (Gegenstromtrennung) untergliedert. (Schubert 2008)

Zentrifugalkraftscheider sind durch die Prozessintensivierung mittels Fliehkraft insbesondere für die Fein- und Feinstkorntrennung geeignet. Dabei können zwei Gruppen unterschieden werden, einerseits Zyklone und andererseits Zentrifugen. Erstere besitzen einen meist zylindrischkonischen, statischen Behälter, in den das Fluid durch eine tangential angebrachte Einlaufdüse unter Druck auf eine Umlaufströmung gezwungen wird. Bei Zentrifugen rotiert der zylindrischkonische Behälter und überträgt die Drehbewegung durch Flüssigkeits- und Wandreibung auf das Fluid. (Schubert 2008)

Im Laufe der Zeit wurden etliche Aggregate bzw. Verfahren entwickelt, dazu zählen beispielsweise Schwimm/Sink-Sortierung, Aufstromsortierung, Wendelscheider, Schütteltische, Hydrozyklon und Wurfsortierer. Deren Aufbau und Funktionsweise sowie weitere Prozesse sind (Bunge 2012), (Schubert 2008) und (Martens 2011) zu entnehmen.

Auf die Trennung in Setzmaschinen wird im Folgenden näher eingegangen.

Setzmaschine

Der Setzprozess ist die Bezeichnung für ein Trennverfahren, bei dem Partikel unterschiedlicher Dichte in einem der Schwerkraft entgegen gerichteten Fluidstrom entmischt werden. Das Aufgabegut wird auf einem Setzgutträger in Form eines Sieb- oder Rostbodens aufgebracht, durch dessen Öffnungen das Fluid auf und ab strömt. Dabei wird die zuerst ruhende Partikelschicht durch den periodisch erzeugten Aufstrom gelockert, wodurch sich die Körner nach abnehmender Dichte von unten nach oben schichten und von unterschiedlich ausgeführten Austragsvorrichtungen abgeführt werden. (Schubert 2008)

Die periodische Anströmung der Partikel wird entweder durch das Heben und Senken des Setzgutträgers im ruhenden Fluid (z.B. Stauchsetzmaschine), durch die Bewegung von Kolben bei statischem Setzgutträger (z.B. Kolbensetzmaschine), durch Druckluft (z.B. druckluftgepulste Setzmaschine) oder auf anderem Weg erzeugt. Bei der Hydrosortierung wird durch den Wasserzusatz unterhalb des Setzbetts eine weitere stationäre Strömung mit max. 0,6 cm/s Aufstromgeschwindigkeit erzeugt, die die pulsierende Strömung überlagert. (Schubert 2008) Dabei wird Luft im Gegensatz zu Wasser selten als Fluid eingesetzt, da homogene Auflockerungszustände auf diese Weise nur sehr schwer realisierbar sind (Schubert 2008). Das Wirkprinzip eines Setzprozesses mit ruhendem Setzgutträger ist in Abbildung 8 anhand einer Kolbensetzmaschine schematisch dargestellt.

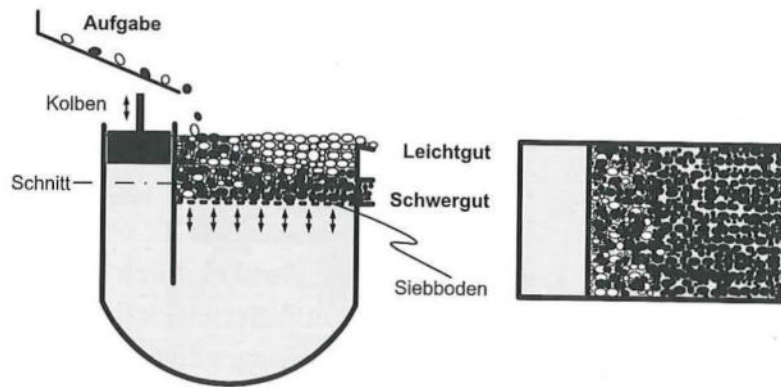


Abbildung 8: Setzprozesses in einer Kolben-setzmaschine (rechts: von oben) (Bunge 2012).

Kolben-setzmaschinen erzeugen die Anströmung durch einen Kolben, der an einem Ende eines mit Wasser gefüllten „U-Kanals“ angebracht ist. Dieser bewegt eine flexible Membran, die wiederum den Wasserspiegel periodisch hebt und senkt. Das erzeugte Leichtgut wird meist über ein Wehr, das Schwergut beispielsweise mittels Zellenradschleuse oder Förderschnecke ausgetragen. (Bunge 2012)

Um wenig verunreinigte Produkte zu erhalten ist es notwendig, dass die mittlere Dichte des Leichtguts geringer als die des Schwergutbetts ist. Eine weitere Verbesserung des Trennergebnisses kann der Einsatz eines asymmetrischen Setzhubdiagramms im Vergleich zum sinusförmigen bringen. Dabei wird die Setzgutschicht schneller angeströmt als abgesetzt und zusätzlich Aufstromwasser in den Setzbehälter eingebracht um die Fluidisierungsphase zu verlängern. Mit Siebböden ausgestattete Setzmaschinen können durch eine Maschenweite von ca. 2 mm ausschließlich Materialien mit Korngrößen über 4 mm trennen. (Bunge 2012)

3.3.3 Trockenmechanische Aufbereitung

In der trockenmechanischen Aufbereitung spielt die Windsichtung eine zentrale Rolle. Sie gehört zu den Verfahren der Stromklassierung und trennt nach der Sinkgeschwindigkeit, welche durch die Dichte der Teilchen sowie deren Kornform und -größe beeinflusst wird. Dabei wird ein Feststoffgemisch in einen Kanal eingebracht, der von einem Luftstrom mit definierter Geschwindigkeit durchströmt wird. Die leicht flugfähigen Partikel werden abgelenkt und vom Luftstrom mitgerissen, die schweren Teilchen fallen durch den Sichtraum und werden getrennt ausgetragen. (Bilitewski und Härdtle 2013; Kranert und Cord-Landwehr 2010)

Wie bei der nassmechanischen Aufbereitung kann die Windsichtung im Schwerkraft- oder Zentrifugalkraftfeld sowie im Gegenstrom- oder Querstrom-Betrieb durchgeführt werden. (Neubauer und Öhlinger 2006) In sämtlichen Ausführungen ist jedoch wichtig, dass Kraft- und Strömungsfeld möglichst übersichtlich und einfach, sowie zeitlich konstant sind. Das sorgfältige Abstimmen der vor- und nachgeschalteten Prozesse auf die Sichtung beeinflussen maßgeblich den Trennerfolg. Dazu sollte beispielsweise die Beschickung des

Sichters so gleichmäßig wie möglich erfolgen und das Verhältnis von unterer und oberer Korngröße 0,3 nicht übersteigen. (Stieß 2009; Kranert und Cord-Landwehr 2010) Um bei der Aufbereitung von Abfällen möglichst reine Fraktionen zu erhalten sollten auch die Korngröße durch vorherige Zerkleinerung, Feuchte, Schüttgewicht und Abfallzusammensetzung auf den Prozess abgestimmt werden (Bilitewski und Härdtle 2013).

In der Aufbereitung von Haus- und Gewerbemüll sowie in Kompostierungsanlagen kommen vorwiegend Rotationswindsichter und Zick-Zack-Sichter zum Einsatz, letzterer wird im folgenden Kapitel näher beschrieben. Weitere Bauarten sind beispielsweise Impulssichter und Flugbettsichter. (Bilitewski und Härdtle 2013; Bilitewski und Härdtle 2013)

Zick-Zack-Sichter

Ein Zick-Zack-Sichter besteht aus einem Kanal mit rechteckigem Querschnitt, der abwechselnd im Zickzack unter einem Winkel gegeneinander versetzt angeordnet ist. Die von unten nach oben strömende Luft erzeugt eine turbulente Rohrströmung und trennt das Material nach dem Schwerkraft-Gegenstrom-Prinzip. Das Aufgabegut wird im mittleren Teil des Aggregates zugeführt, welches an der Kanalwand nach unten rutscht. An der Kante bildet das frei fallende Material einen Feststoffvorhang, der durch die quer anströmende Luft aufgetrennt wird. Durch die plötzliche Richtungsänderung hinter der Kante kommt es zur Bildung von Wirbelströmungen und Wirbelwalzen an trennkornnahem Gut. Da das Schwergut quer zur Hauptströmung in die Trennzone eintritt erhält der Zick-Zack-Sichter eine zusätzliche Querstrom-Charakteristik und kann daher auch als Kombination von Quer- und Gegenstromsichtung gesehen werden. In jedem Teilstück des Sichters erfolgt eine stufenweise Nachklassierung von nach unten fallendem Schwergut. Das Leichtgut wird durch den Luftstrom nach oben mitgerissen und ebenfalls nachklassiert (siehe Abbildung 9). Die einzelnen Stufen trennen zwar unscharf, durch die Schaltung mehrerer Stufen hintereinander kann aber insgesamt eine gute Trennschärfe erzielt werden. (Bunge 2012; Schubert 2008; Stieß 2009)

Der Zick-Zack-Sichter kommt somit ohne bewegliche Bauteile aus und benötigt lediglich eine externe Luftzufuhr sowie eine Abscheidevorrichtung für das Leichtgut, die meist als Aerozyklon ausgeführt ist. Der Abtransport des Schwergutes erfolgt meist über Förderbänder oder Zellenradschleusen. Durch Parallelschaltung zahlreicher Kanäle zu Mehrkanalsichtern können hohe Durchsätze erreicht werden und was den Einsatz unter anderem zur Wertstofftrennung von Materialien wie Folien, Fasern und Textilien von z.B. Metallen, Glas und Steinen ermöglicht. (Bunge 2012; Schubert 2008; Stieß 2009; Neubauer und Öhlinger 2006)

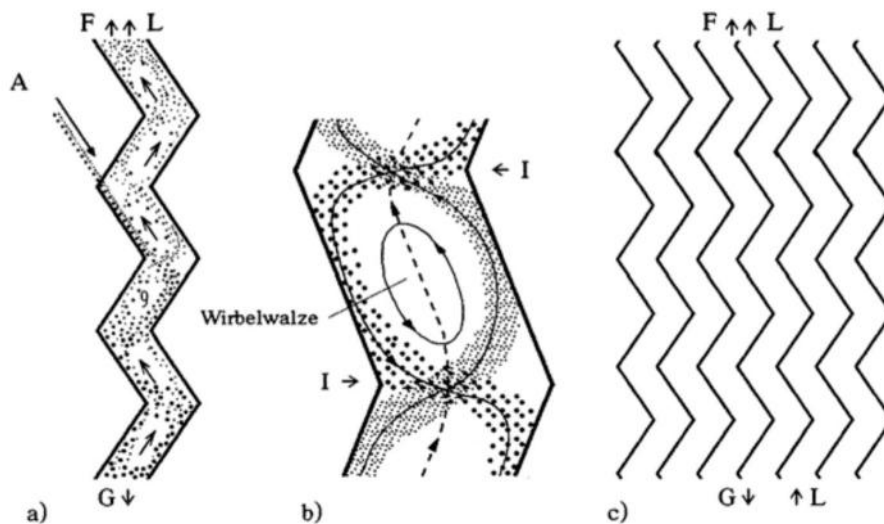


Abbildung 9: Trennung in einem Zick-Zack-Sichter (a) Aufbau, (b) Trennprinzip im Einkanalsichter, (c) Mehrkanalsichter (Stieß 2009).

3.3.4 FE/NE-Scheidung

Die Abtrennung von magnetisierbaren Materialien bzw. Eisen-Metallen kommt sowohl in der Gewinnung von Rohstoffen, wie beispielsweise der Erzaufbereitung, als auch in der Aufbereitung von Abfällen zum Einsatz. Dabei werden entweder Wertstoffe angereichert oder Schadstoffe abgereichert. Gleiches gilt für die Abtrennung von nicht magnetisierbaren Metallen, den Nichteisen-Metallen. Dazu wird die elektrische Leitfähigkeit als Trennmerkmal ausgenutzt. Im Folgenden sollen diese zwei Prozesse vorgestellt werden. (Bunge 2012)

Magnetscheidung

Bei der Magnetscheidung werden Stoffe anhand ihrer unterschiedlichen magnetischen Suszeptibilität voneinander getrennt, da sie durch verschieden große magnetische Kräfte in inhomogenen Magnetfeldern unterschiedliche Bewegungsbahnen beschreiben. (Schubert 2008)

Die verwendeten Magnete werden entweder in einer „geschlossenen“ oder in einer „offenen“ Anordnung verwendet. Bei der geschlossenen Bauweise befinden sich die zwei Pole gegenüber voneinander und das Aufgabegut wandert zwischen den Polen hindurch, weshalb sie für kleinere Korngrößen besser geeignet ist. Bei der offenen Anordnung liegen die Pole annähernd in einer Ebene und das Material bewegt sich darüber oder darunter. Diese Bauart wird für die Trennung größerer Partikel verwendet und findet in vielen Bereichen Anwendung. (Bunge 2012)

Zur offenen Bauweise zählen der Trommelscheider und der Überbandmagnetscheider, von denen mehrere Ausführungen entwickelt wurden.

Beim Trommelscheider wird zwischen Aushebe- und Ablenkscheider unterschieden. Der Aushebescheider besitzt eine unmagnetisierbare Fördertrommel, die um einen ruhenden Magneten entgegen der Materialförderrichtung rotiert. Das Aufgabegut wird in den meisten Fällen über einen Gurtförderer unterhalb der Fördertrommel in den Bereich des Magnetfeldes transportiert, wobei magnetisierbare Partikel vom Magneten angezogen und aus dem Gutbett ausgehoben werden. Diese haften an der Fördertrommel bis sie den Bereich des Magnetfeldes verlassen und schließlich getrennt aufgefangen werden. Beim Ablenkscheider gelangt das Aufgabegut durch eine Schurre oder einen Gurtförderer oben auf die Trommel, die ebenfalls um einen ruhenden Magneten rotiert. Die magnetisierbaren Partikel werden abgelenkt und fallen hinter einer Trennschneide in einen separaten Behälter. Da der Ablenkscheider ein hohes Ausbringen und der Aushebescheider eine hohe Reinheit erzielen werden beide auch in Kombination eingesetzt. Trommelscheider sind meist mit keramischen Ferrit-Permanentmagneten ausgestattet, die in Vertikal- oder Horizontalanordnung ausgeführt sein können. Die Horizontalanordnung ermöglicht hohe Reinheiten des Eisenproduktes da die Partikel durch mehrmaliges ummagnetisieren auf der Fördertrommel umklappen und so eingeklemmtes Material freigeben. Vertikalpolanordnungen werden vorzugsweise dort eingesetzt wo große, vereinzelt vorliegende Stücke abgetrennt werden sollen. (Bunge 2012)

Überbandmagnetscheider bestehen aus einem Permanent- oder Elektromagneten, um das ein mit Stollen versehenes Förderband läuft. Das Aufgabegut wird mittels Gurtförderer von unten in den Wirkungsbereich des Magneten eingebracht und die magnetisierbaren Teile im Flug aus dem Materialstrom ausgehoben. Das Förderband um den Magnet transportiert das Material aus dem Magnetfeld hinaus, an dessen Ende es getrennt vom restlichen Material aufgefangen wird. Das kann entweder quer zum oder in Richtung des Gutstromes erfolgen, wobei die Anordnung quer zur Förderrichtung ausschließlich bei Platzmangel am Bandabwurf eingesetzt wird. (Bunge 2012)

Weiters kann je nach Stärke des verwendeten Magneten zwischen Schwach- und Starkfeldscheider unterschieden werden. Starkfeldscheider sind dazu fast ausschließlich mit Elektromagnetsystemen ausgestattet. Schwachfeldscheider verfügen über ein Permanentmagnetsystem aus hartmagnetischen Werkstoffen, deren Magnetfelder in der Trockensortierung meist über 180 ° des Trommelumfangs wirken. Sie sind bei trockener Sortierung als Trommelablenkscheider und bei nasser Sortierung als Trommelaushebescheider ausgeführt und werden für die Abtrennung von starkmagnetischen Bestandteilen wie Eisenschrotten oder magnetischen Eisenerzen verwendet. (Schubert 2008; Schubert 2008)

Bei der Magnetscheidung können Art der Materialzuführung, Korngrößenbereich, Bauart und Magnetstärke unterschiedlich kombiniert werden, wodurch sich eine Vielzahl an Einsatzbereichen ergibt. Eine Übersicht der unterschiedlichen Aggregate liefert die nachfolgende Abbildung 10.

Tab. 7-8. Einteilung der Magnetscheider

Merkmale	Schwachfeldscheider					Starkfeldscheider						
	Feldstärke H	<100 bis 240 kA/m					0,5 bis 2 MA/m, mit supraleitenden Spulen bis 6,5 MA/m					
$\mu_0 H \text{grad } H $	$3 \cdot 10^5$ bis $1,5 \cdot 10^6 \text{ N/m}^3$					10^7 bis 19^9 N/m^3 , in Matrixscheidern bis etwa 10^{11} N/m^3						
Magnetsystem	offenes					vorwiegend geschlossenes Magnetsystem, in Sonderfällen offenes						
Fluid	Luft		Wasser			Luft		Wasser			Luft oder Wasser	
Art der Aufgabe	von oben		von unten			von oben	von unten		von oben			
Wirkprinzip	Ablenkscheider		Aushebescheider			Ablenkscheider	Aushebescheider		Ablenkscheider	Zurückhalte-scheider	Ablenkscheider	
Förderrichtung der Produkte bezüglich der Aufgaberichtung	Gleichlauf		Gleichlauf	Gegenlauf	Halbgegenlauf	Gleichlauf oder mit Abförderung des magnetischen Produkts quer zur Laufrichtung			Gleichlauf			
magnetische Durcharbeitung	ohne	mit	mit			ohne						
Bauarten	Trommel-scheider, langsam-laufend	Trommel-scheider, schnell-laufend, mit Wech-selpolan-ordnung	Trommel-scheider	Trommel-scheider	Trommel-scheider	Induktions-walzen-scheider, Trommel-u. Walzen-scheider mit offenem Magnet-system	Kreuz-band-, Bandring-scheider	Induktions-walzen-scheider	Induktions-walzen-scheider	Matrix-scheider (Kanister-u. Karussell-scheider)	Durchfluss-u. Freifall-Ablenk-scheider mit supra-leitenden Spulen	
Anwendungsbereich	stark-magne-tisches Gut < 100 mm	stark-magne-tisches Gut < 5 mm	stark- bis mittel-magne-tisches Gut < 6 mm	stark- magne-tisches Gut < 2 mm	stark- magne-tisches Gut < 0,3 mm	schwach-bis mittelmagne-tisches Gut < 10 mm	schwach-magne-tisches Gut < 5 mm	schwach-bis mittel-magne-tisches Gut < 5 mm	schwach-magne-tisches Gut < 5 mm	schwach-magne-tisches Gut < 1 mm	schwach-magne-tisches Feinstkorn	

Abbildung 10: Einteilung und Übersicht unterschiedlicher Magnetscheider (Schubert 2008).

Um zufriedenstellende Trenngrade zu erreichen ist es notwendig, das Inputmaterial durch Zerkleinerung aufzuschließen und von Anhaftungen zu befreien. Dadurch kann auch die für die Magnetscheidung günstigste Korngröße von 10 mm bis 100 mm erreicht werden.

Wirbelstromscheider

Die Wirbelstromscheider zählt in etlichen europäischen Staaten zur Grundausstattung in der Abfallaufbereitung (Kohaupt 2009). Sie ist ein Verfahren zur Trennung eines Gemisches aus NE-Metallen und Stoffen gleicher Dichte im magnetischen Wechselfeld. Dabei wird als Trennkriterium die elektrische Leitfähigkeit herangezogen, weiters bestimmen Form und Lage der Teilchen im Magnetfeld das Trennverhalten. (Bilitewski und Härdtle 2013)

Das Prinzip der Wirbelstromscheider beruht darauf, dass in elektrisch leitenden Partikeln durch ein äußeres Magnetfeld Wirbelströme induziert werden und durch die dabei entstehende abstoßende Kraft aus dem Magnetfeld hinaus transportiert werden. Diese Wirbelströme entstehen, wenn sich ein Leiter in einem räumlich oder zeitlich veränderlichen Magnetfeld bewegt oder sich darin befindet und erzeugen ein dem Primärfeld entgegengerichtetes Feld. Dadurch wirkt auf den Leiter eine Kraft, die ihn aus dem Primärfeld hinaus beschleunigt. Mit steigender Leitfähigkeit erhöht sich auch die wirkende Kraft, wodurch gute Leiter daher höhere Beschleunigung bzw. Ablenkung erfahren. (Bilitewski und Härdtle 2013; Schubert 2008; Schubert 2008)

Feine NE-Partikel benötigen deutlich größere Feldfrequenzen als grobe Partikel. Diese lösen sich früher, bereits beim ersten Abknicken des Gurtes, vom Förderband ab als kleine, welche dem Gurtverlauf wesentlich länger folgen. Daher ist ein kurzer, kräftiger Kraftimpuls exakt zum Ablösezeitpunkt wichtig um das Teilchen bis über das Scheitelblech zu transportieren. Der Einwirkungspunkt der Kraft muss demnach für grobe Partikel weiter oben als für feine eingestellt werden, weshalb zwei Bauarten entstanden sind. (Kohaupt 2009)

Bei diesen zwei Konstruktionsarten unterscheidet man Scheider mit zentrisch und exzentrisch angeordnetem Polrad, das mit Hochleistungspermanentmagneten in Wechselfolge am Umfang ausgestattet ist. Das Polrad rotiert mit einer höheren Geschwindigkeit als die Fördertrommel und ist unabhängig von ihr einstellbar um dadurch die Frequenz des Wechselfeldes einzustellen. Wirbelstromscheider mit zentrischem Polrad sind zwar günstiger, die Flugbahn bzw. der Abhebezeitpunkt lassen sich aber lediglich über das Verändern der Wechselfeldfrequenz durch die Drehzahl, die Bewegungsrichtung des Polrads und minimal über die Veränderung der Förderbandgeschwindigkeit einstellen. Bei der exzentrischen Polradanordnung können zusätzlich die Winkellage des Polrads zur Trommel, die Anzahl der Polpaare und die Umfangsgeschwindigkeit kontinuierlich variiert werden. Die Trennschärfe dieser Aggregate ist somit höher und durch die zusätzlich höhere Betriebssicherheit werden sie bevorzugt eingesetzt. Die Arbeitsweise dieser Wirbelstromscheider ist in Abbildung 11 dargestellt. (Schubert 2008; Schubert 2008; Bunge 2012)

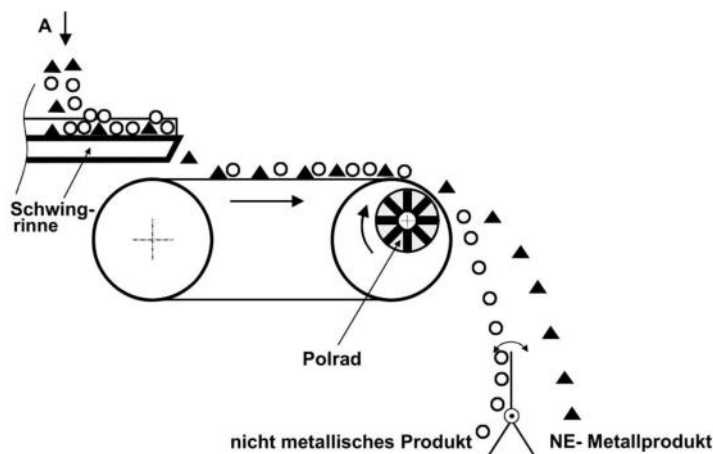


Abbildung 11: Aufbau und Funktionsweise eines Wirbelstromscheiders (Kranert und Cord-Landwehr 2010).

Magnetisierbare Teilchen sollten vor der Wirbelstromscheidung aus dem Aufgabegut entfernt werden, da sie vom Polrad stärker angezogen werden als vom Wirbelstrom abgestoßen. Verbleiben sie zu lange im Bereich des Magnetfeldes können sie sich stark erhitzen und den Fördergurt beschädigen indem sie sich in ihn hineinschmelzen. (Bunge 2012)

Um eine zufriedenstellende Trennung zu erreichen sollte das Aufgabegut möglichst stark vereinzelt vorliegen. So kann die induzierte Kraft, welche ca. in der gleichen Größenordnung

wie die Schwerkraft liegt, auch Partikel weiter unten im Gutbett austragen. Grundsätzlich lassen sich längliche Stücke wie Drähte schwerer abtrennen als flächige, weil sich in ihnen kaum Wirbelströme ausbilden können. Dem kann jedoch durch Verkuglung in Prallmühlen, bei der sich kompakte Knäuel bilden, leicht entgegengewirkt werden. Mit Wirbelstromscheidern lassen sich Partikel mit einer Korngröße ab 2 mm abtrennen, wobei für den Austrag feiner Teilchen das Polrad gegen den Drehsinn der Fördertrommel gewählt wird. Dabei wird zusätzlich die Umfangsgeschwindigkeit so hoch wie möglich eingestellt und die Polmittenabstände der Magnete verringert. (Bunge 2012)

Edelstähle können mithilfe dieser Sortierung kaum ausgetragen werden da sie trotz elektrischer Leitfähigkeit meist so stark magnetisierbar sind, dass die magnetische Anziehung größer ist als die Abstoßung durch die Wirbelströme. Dieser Effekt wird durch die meist zuvor geschaltene Zerkleinerung zusätzlich verstärkt, da die Magnetisierbarkeit durch Verformung erhöht wird. (Bunge 2012)

3.3.5 Sensorsortierung

Die fortschreitende Digitalisierung, die immer höhere Leistung von Rechnern sowie die Weiterentwicklung von Sensoren, deren Kombination und Vernetzung machen die sensorgestützte Sortierung in einer Vielzahl an Anwendungen einsetzbar. Dadurch stellt sie im Recycling einen bereits fest integrierten Aufbereitungsprozess dar und soll auf den folgenden Seiten vorgestellt werden. (Wotruba 2008)

3.3.5.1 Wirkprinzip, Voraussetzungen und Vorteile

Bei der Sensorsortierung handelt es sich um eine Einzelkorntrennung, die das gewählte Trennmerkmal durch berührungslose Sensorik erfasst. Als Trennmerkmal können beispielsweise Farbe, Form, Glanz, molekulare Zusammensetzung, elektrische Leitfähigkeit oder Dichte herangezogen werden. (Pretz und Julius 2008)

Grundsätzlich besteht eine sensorgestützte Sortiermaschine aus einer Fördereinrichtung zur Materialzuführung, einer Sensoreinheit, einem Rechner zur Datenauswertung, einer Düsenleiste für den Materialaustrag sowie getrennte Auffangbehälter für die einzelnen Fraktionen, wie Abbildung 12 zeigt. (Beel 2017)

Laut Martens 2011 lässt sich der Sortierprozess in folgende sechs verfahrenstechnische Arbeitsschritte gliedern:

1. Oberflächensäuberung (wenn nötig durch Waschen oder Entstauben),
2. Vereinzelung der Körner,
3. Erfassung der Position des Einzelkorns,
4. Analytische Identifizierung,
5. Auswertung und Ansteuerung der Austragsvorrichtung und
6. Austrag des Einzelkorns durch Druckluftpuls, mechanische Stößel oder Klappen.

Bei der Auswertung der Sensordaten werden die einzelnen Partikel einer von zwei Klassen zugeordnet, entweder Durchgang oder Austrag. Nach dieser Entscheidung werden jene Teilchen, die als „Austrag“ klassifiziert wurden, fast ausschließlich mittels Druckluftdüsen über die Trennscheide transportiert. (van de Winkel et al.)

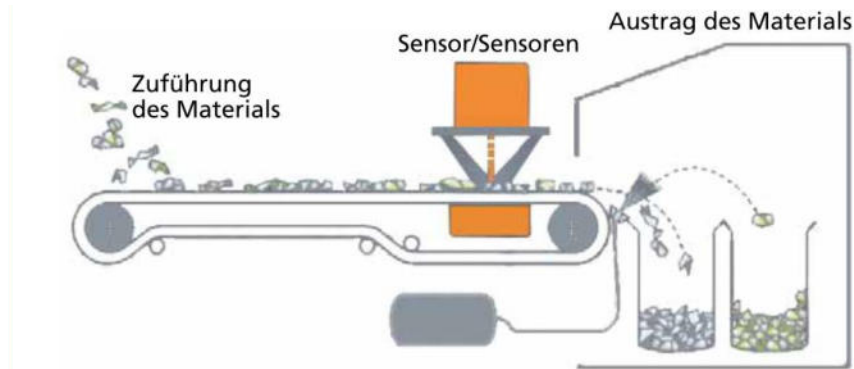


Abbildung 12: Grundprinzip eines Sensorsortierers (van de Winkel et al.).

Im Gegensatz zu herkömmlichen Sortierverfahren ist bei der Sensorsortierung das Trennmerkmal von der trennenden Kraft, beispielsweise der Auftriebskraft bei der Dichtentrennung, entkoppelt. Bei der Datenverarbeitung kann nach frei wählbaren Evaluationsschritten entschieden werden, welche gemessenen Eigenschaften zur Entscheidungsfindung herangezogen werden. Hierbei können nicht nur absolute und statistische Daten verwendet, sondern auch Daten mehrerer Sensoren in der Auswertung miteinander verknüpft werden. Um die enorme Menge an Rohdaten bei minimalen Auswertzeiten verarbeiten zu können und maximale Durchsätze zu erzielen sind digitale Filter notwendig. (Wotruba 2008)

Die Durchsätze von optischen Sensorsortierern liegen zurzeit bei ca. 2 000 Einzelstücken pro Sekunde und Meter Arbeitsbreite. Obwohl von den Sensoren ca. 40 000 Einzelstücken je Sekunde und Meter Arbeitsbreite erkannt und ausgewertet werden limitiert die Ausblasvorrichtung den Durchsatz erheblich. (Wotruba 2008) Der Korngrößenbereich, in dem üblicherweise sortiert wird, liegt zwischen 10 und 250 mm, wobei ein optimaler Betrieb bei einem Verhältnis von oberer zu unterer Klassengrenze von 1 : 4 (beispielsweise 10 – 100 mm) sichergestellt wird. Die minimale verarbeitbare Partikelgröße beträgt 4 mm, ein wirtschaftlicher Betrieb ist in diesem Bereich durch unzureichende Trennschärfe und geringen Durchsatz nicht möglich. (Bunge 2012)

Bei der Ausführung von Sensorsortierern kann zwischen den zwei Grundtypen Bandsortierer und Rutschensortierer unterschieden werden, die in Abbildung 13 zu sehen sind (Wotruba 2008). Beim Bandsortierer wird das Aufgabematerial durch eine Schwingförderrinne auf das Förderband aufgebracht. Durch die steigende Transportgeschwindigkeit von der Förderrinne auf den mit bis zu 3 m/s schnelleren Gurt kann die notwendige Vereinzelung erreicht werden (Wens et al. 2011). Die Eigenschaften eines Partikels werden von der Sensoreinheit, die sich bei einer optischen Sortierung über dem Förderband befindet, analysiert und vom Rechner mit den Spektren in einer Datenbank abgeglichen.

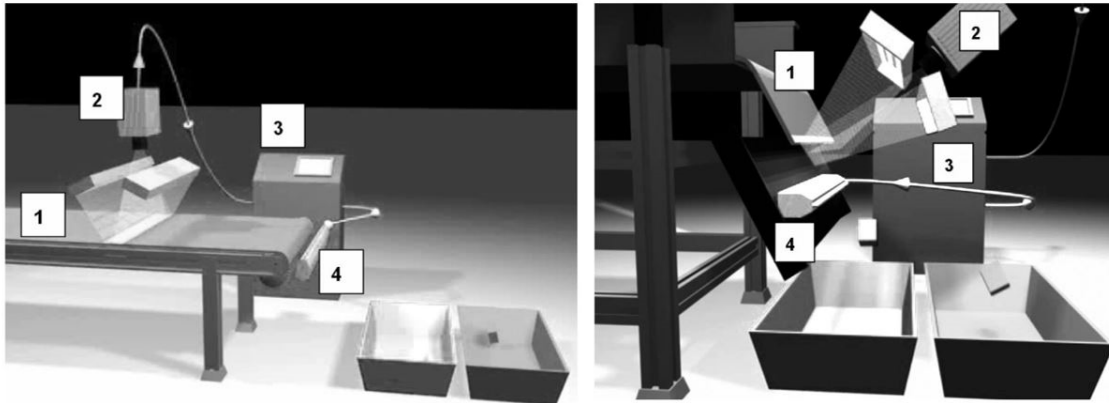


Abbildung 13: Sensortrierer mit Förderband (1) links und mit Rutsche (1) rechts (2 Sensoreinheit, 3 Datenverarbeitung, 4 Düsenleiste) (Wotruba 2008; Wotruba 2008).

Anschließend erfolgt der Austrag durch eine Düsenleiste, die vor der Abwurftrammel angebracht ist. Der Rechner steuert je nach Partikelgröße eine oder mehrere Düsen im Abstand von 10 mm und 30 mm an um das klassifizierte Korn abzutrennen. Werden zwei Düsenleisten sowie zwei Trennscheitel verwendet, kann das Aufgabegut in drei Fraktionen geteilt werden. (Pretz und Julius 2008)

Beim Rutschensortierer erfolgt die Materialabgabe über eine Vibrationsrinne, die das Material vorvereinzelt. Von dort gelangt das Material auf eine geneigte Rutsche, wo es beschleunigt und weiter vereinzelt. Während des Fallens werden die spezifischen Eigenschaften von Sensoreinheiten vor und hinter der Schurre analysiert und die Partikel durch die vom Rechner angesteuerte Düsenleiste ausgetragen. (Pretz und Julius 2008)

Durch die Klassifizierung der Partikel in „Austrag“ und „Nicht-Austrag“ kann die Trennung als Positiv- oder Negativsortierung durchgeführt werden. Bei der Positivsortierung werden Wertstoffe ausgetragen und ein wertstoffangereichertes Produkt erzeugt, mit der Negativsortierung lassen sich Störstoffe aus Aufgabematerialien entfernen um gezielte Reinheiten zu erreichen. (Kranert und Cord-Landwehr 2010)

Die verwendeten Sensoreinheiten bestehen aus mindestens einem Detektor und einem Emitter, welcher elektromagnetische Strahlung in Richtung Materialstrom sendet. Die Partikel verändern selektiv die auftreffende Strahlung in Bezug auf Amplitude, Ausbreitungsrichtung, zeitlichem Verlauf sowie Spektrum. Die zurückgeworfene Strahlung wird vom Detektor aufgenommen, gemessen und im Rechner verarbeitet. Grundsätzlich wird zwischen Reflektions-, Transmissionsmessung und angeregter Eigenemission unterschieden, wobei Emitter und Detektor jeweils räumlich unterschiedlich angeordnet sind. Bei der Reflektionsmessung befinden sich Emitter und Detektor auf derselben Seite des Materialstroms, was vor allem in der Farbsortierung Anwendung findet. Für die Transmissionsmessung werden Emitter und Detektor einander gegenüber angebracht, womit die Absorption von Röntgenstrahlen messbar ist. Durch den Einsatz von Strahlung mit hoher

Energiedichte kann Materie zur Eigenemission angeregt und beispielsweise die selektive Fluoreszenz als Trennmerkmal verwendet werden. (Pretz und Julius 2008)

Die Detektoren einer Sensoreinheit können weiter hinsichtlich des messbaren Spektralbereichs sowie ihrer Dimension unterschieden werden. Es gibt Punkt-, Zeilen- und Flächensensoren, bei denen der Punktsensor lediglich eine Stelle des Materialstroms zu einem Zeitpunkt erfassen kann. Um den gesamten Förderstrom aufzunehmen können schnell arbeitende Spiegelsysteme verwendet werden, die durch ihre Taktrate und die Ungenauigkeit der Mechanik begrenzt sind, wodurch Punktsensoren lediglich als Unterstützung von Liniensensoren eingesetzt werden. Liniensensoren bestehen aus nebeneinander angebrachten Sensorzellen, die den Materialstrom zeilenweise abtasten, wodurch zu einem Zeitpunkt ein schmaler Abschnitt vermessen wird. Sie können entweder wenige Millimeter breit sein und über eine Optik gespeist werden, oder sie sind mehrere Meter breit sein und befinden sich ohne Optik unterhalb des Fördergurtes. Werden Punktsensoren in Form einer Matrix eingesetzt spricht man von Flächensensoren. Diese ermöglichen die Aufnahme von räumlich unabhängigen Informationen in zwei Raumrichtungen je Messzeitpunkt. Dadurch können zu einem Zeitpunkt pro Messpunkt mehrdimensionale Informationen gewonnen werden. (Pretz und Julius 2008)

Um die gewonnene Datenmenge soweit zu reduzieren, dass die Austragsvorrichtung eindeutig angesteuert werden kann, kann diese entweder messpunktbasiert oder objektbasiert verarbeitet werden. Dazu stehen bei einem Bandsortierer mit 3 m/s Fördergeschwindigkeit ca. 300 ms, bei einem Rutschensortierer nur wenige Millisekunden zur Verfügung. Die messpunktbasierte Verarbeitung klassifiziert jeden einzelnen Messpunkt und steuert nach der Entscheidung zum Austrag jede Austrageinheit getrennt an. Das ermöglicht zwar eine sehr schnelle Arbeitsweise, dabei können jedoch Form, Breite und Länge des Partikels nicht erfasst werden da die einzelnen Messpunkte getrennt, ohne Bezug zueinander verarbeitet werden. Der erste Schritt bei der objektbasierten Datenverarbeitung ist die Aufnahme und das Zwischenspeichern der Messpunkte eines Förderbandabschnitts. Unter den mehreren hundert zwischengespeicherten Bildzeilen werden dann zusammenhängende Punktmengen gesucht und weiter zwischengespeichert, wenn sie durch eine Objekterkennung einem Einzelstück im Materialstrom zugeordnet werden können. Die so zusammengefassten Daten werden mithilfe von Klassifikatoren, beispielsweise geometrische Abmessungen oder Materialklassenverhältnissen, auf eine Sortierentscheidung reduziert. Da den Partikeln durch die Objekterkennung Koordinatenpunkte zugeordnet werden können auch ergänzende Punktmessungen des Partikels vorgenommen werden. Eine zweite wichtige Aufgabe der Datenverarbeitung besteht in der Abgrenzung des Hintergrundes von den Partikeln und der Bestimmung der Objektgrenzen. Dazu wird mittels Schwellenwertfilter ein Großteil des Hintergrundes, der möglichst unterschiedliche Eigenschaften im Trennmerkmal als das Aufgabematerial besitzt, entfernt. Danach werden Störungen mittels Dilatations- und Erosionsfilter reduziert, die Objektgrenzen eindeutig festgelegt und das Sensorbild in seiner Datengröße herabgesetzt. (Pretz und Julius 2008)

Mit Sensorsortierung können nicht nur zuvor händisch durchgeführte Sortieraufgaben durch objektive Trennkriterien, sondern auch traditionelle Trenntechniken verbessert werden, wodurch beispielsweise bei der Dichtesortierung eine trockene Arbeitsweise möglich ist. Dabei sind die notwendigen Anlagen sehr kompakt und können gut in engen Räumen oder auch Containern als mobile Anlagen eingesetzt werden. Ein weiterer Vorteil ist die Kombination beliebiger Trennkriterien in einem einzigen Prozessschritt. (Wotruba 2008) Die Lernfähigkeit der digitalen Datenverarbeitung ermöglicht weiters eine gute Anpassungsfähigkeit des Sortierprozesses auf veränderte Materialzusammensetzung oder Verfahrenstechnik und die Anpassung der Produktqualitäten je nach Anforderung. (Pretz und Julius 2008)

Eine weitere Unterscheidung der Sensoren kann anhand der detektierten Stoffeigenschaften getroffen werden, diese erkennen entweder oberflächliche oder innere Korneigenschaften. Anhand dieser Einteilung werden in den folgenden Kapiteln eine Auswahl an Sensoren vorgestellt, eine erste Übersicht bietet Tabelle 4. (Wotruba 2008)

Tabelle 4: Anwendungsgebiete von Sensorsortierern in der Abfallaufbereitung (Kranert und Cord-Landwehr 2010).

Sortiermaschinen	Sensorik	Trennkriterien	Beispiele für Einsatzgebiete
Farbsortierer	Farbzeilenkamera	Farbe, Transparenz, Glanz, geom. Abmessungen	Sortierung von Altglas, Keramik, Steinen, Porzellan, Kunststoffen, PET, Altpapier
Nahinfrarot-sortierer	NIR-Sensor	Lichtabsorption, spektrale Verteilung	Sortierung von Getränkekartons, Kunststoffen, PVC, Papier, Holz
Metall-sortierer	Induktiver Sensor (Spulensystem)	Elektrische Leitfähigkeit	Abtrennung aller Metalle, selektive Sortierung von Edelstahl
Röntgen-sortierer	Röntgenzeilen-sensor	Stoffdichte, geom. Abmessungen	Abtrennung von Steinen, Glas, Metallen, Holz, PVC, Elastomeren

3.3.5.2 Oberflächeneigenschaften

Zu den Oberflächeneigenschaften eines Partikels gehören Farbe, Transparenz, Helligkeit, Reflexion, Form, Fluoreszenz und Materialart, die durch unterschiedliche Sensoren aufgenommen werden können. Farbzeilenkameras messen die ersten vier der genannten Eigenschaften, durch Anregung mit UV-Strahlung können Zeilenkameras Fluoreszenz detektieren, 3D-Kameras vermessen die Form eines Partikels und NIR-Sensoreinheiten ermitteln die Materialart. Grundvoraussetzung für die Detektion von äußeren Korneigenschaften ist allerdings eine saubere Oberfläche. Im Folgenden werden die bei der

Sortierung verwendeten Sensoren im Bereich der visuell sichtbaren und der nah-infraroten Strahlung sowie der 3D-Vermessung von Partikeln kurz vorgestellt. (Wotruba 2008)

Farbsortierung im sichtbaren Bereich des Lichts (VIS)

Für die Sortierung anhand von farblichen Kriterien werden Sensoren im visuell sichtbaren Bereich der elektromagnetischen Strahlung verwendet. Als Leuchtmittel kommen dafür Halogenlampen, Leuchtstoffröhren oder Leuchtdiodenleisten zum Einsatz, deren emittiertes „weißes“ Licht eine Mischung unterschiedlicher Farbtöne ist, die je nach Partikeloberfläche unterschiedlich stark reflektiert und absorbiert werden. Die am Detektor eintreffende Strahlung wird zuerst spektral in Blau-, Grün- und Rot-Anteil getrennt und danach mittels CMOS- (Complementary Metal Oxide Semiconductor) oder CCD- (Charge-coupled Device) Sensoren aufgenommen. (Pretz und Julius 2008) Bei der Sortierung mit Farbkameras können die Reflexion, Transmission und Absorption der Strahlung durch ein Partikel gemessen werden (Wotruba et al. 2014). Dadurch können beispielsweise opake Teilchen anhand der Transmission und Glasscherben unterschiedlicher Farbe mittels Reflexionsmessung vor einem weißen Hintergrund sortiert werden (Pretz und Julius 2008). Die Messung erfolgt dabei im Auflicht- bzw. Durchlichtverfahren, bei dem die vom Partikel reflektierte Strahlung bzw. die das Partikel durchdringende Strahlung detektiert wird. (Bilitewski und Härdtle 2013) In nachfolgender Abbildung 14 ist die grundsätzliche Anordnung der VIS-Sensoren in einem Sortierer sowie ein Beispiel einer Farbaufnahme dargestellt.

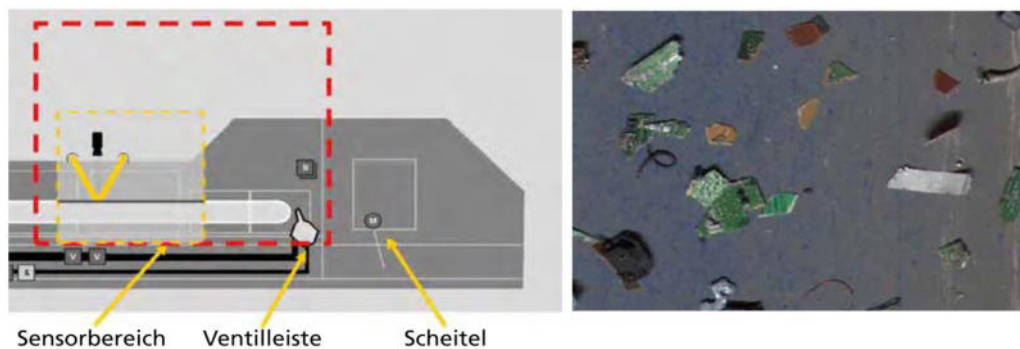


Abbildung 14: VIS-Sortierer mit Sensorbild (Quelle: Beel 2017).

Nah-Infrarot

Der spektrale Bereich des Nah-Infrarots umfasst die Wellenlängen zwischen 800 nm und 2500 nm und wird bei der sensorgestützten Sortierung meist von Halogenlampen bereitgestellt. Trifft diese Strahlung auf ein Partikel, dringt sie ca. 3 mm bis 4 mm in das Material ein und wird von den NIR-aktiven Molekülen in charakteristischen Wellenlängenbereichen absorbiert. Durch die Eindringtiefe der NIR-Strahlung können auch dünn-schichtige Materialverbunde wie Multi-Layer-Verpackungs-Folien bestimmt werden. Der Scanvorgang erfolgt zeilenförmig und normal zur Förderrichtung, moderne Sensoren führen dabei mehr als 40 000 Messungen pro Sekunde durch. (Bilitewski und Härdtle 2013) NIR-

Sortierer verwenden ein Punkt-zu-Punkt Scanprinzip, auch whiskbroom scanning genannt, bei dem ein einziger Scanpunkt mithilfe mechanischer Bauteile, wie beispielsweise Spiegel, über die Förderbandfläche bewegt wird. Dabei wird in den gescannten Punkten zeitgleich ein Spektrum aufgenommen. Die örtliche optische Auflösung wird daher von den Scanpunkten und die spektrale Auflösung von den diskreten Punkten im Spektrum, welche für die Identifikation des Materials verwendet werden, bestimmt. (Beel 2017) Anschließend erfasst die Detektoreinheit die Intensität des reflektierten Spektrums, welche dann als Funktion des Wellenlängenbereiches dargestellt wird, wie exemplarisch in Abbildung 15 zu sehen ist. Die aufgenommenen Absorptionsspektren werden anschließend mit den hinterlegten Referenzspektren abgeglichen um das Material zu identifizieren. Soll das Partikel ausgetragen werden, steuert der Rechner wie oben erwähnt die entsprechenden Düsen an und transportiert das Teilchen über die Trennschneide. Üblicherweise kommen dafür Luftstöße mit einem Druck von 8 bar bis 10 bar zum Einsatz. (Bilitewski und Härdtle 2013)

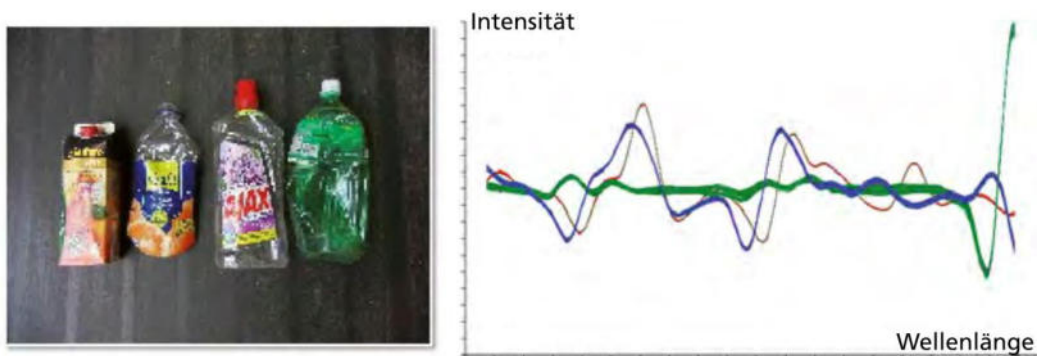


Abbildung 15: Kunststoffe mit spektraler Intensität (erste Ableitung) im NIR-Bereich (Beel 2017).

Mithilfe der NIR-Sortierung ist es möglich Papier, Pappe und Kartonagen, Getränkekartons, Holz, Windeln, einzelne Kunststoffsorten wie beispielsweise PET, PP, PE, PS, EPS, PA, PVC sowie chlorhaltige Mischkunststoffe selektiv abgetrennt werden. (Kranert und Cord-Landwehr 2010) Weitere Einsatzgebiete sind die Sortierung von Leichtverpackungen und die Erzeugung von Ersatzbrennstoffen aus Haus- und Gewerbeabfällen. Dabei wird die gemischte Hochkalorik entweder vom PVC-haltigen Anteile befreit oder eine schadstoffarme Brennstofffraktionen erzeugt. (Bilitewski und Härdtle 2013)

Die üblichen Arbeitsbreiten liegen zwischen 600 mm und 2 800 mm und ermöglichen Durchsätze zwischen 5 t/h und 10 t/h mit Wertstoffausbringen von 85 - 95 % und Wertstoffreinheiten von bis zu 95 %. Diese Sortierer nehmen dabei zwischen 5 kW und 10 kW Leistung auf. (Bilitewski und Härdtle 2013)

Problematisch ist die Abscheidung von wehenden oder rollenden Teilchen, da diese mit hoher Wahrscheinlichkeit nicht der errechneten Flugbahn folgen und dadurch falsch oder nicht ausgetragen werden. Weiters ist die Sortierung im NIR-Bereich für die Identifikation von stark gefärbten und schwarzen Partikeln nicht geeignet da die reflektierte Strahlung eine zu geringe Intensität aufweist. Um eine genaue Bestimmung des Materials zu ermöglichen

sollte die Bandbelegung 30 % nicht überschreiten damit Überlappungen vermieden werden. (Bilitewski und Härdtle 2013)

Hyper-Spectral-Imaging

Die Hyper-Spectral-Imaging-Technologie, kurz HSI, verzichtet im Gegensatz zu anderen NIR-Sensoren auf bewegliche Bauteile. Dabei wird mit einer hochauflösenden Zeilenkamera die vollständige Breite des Fördergurtes gescannt, wodurch eine hohe örtliche Auflösung erreicht werden kann. Weiters stellt die HSI-Technologie einen sehr hohen Informationsgehalt durch hochaufgelöste und fein gerastete Spektren zur Verfügung, wodurch mehrere Millionen Messinformationen pro Sekunde ausgewertet werden können. In Abbildung 16 ist der prinzipielle Aufbau einer Sortiermaschine mit HSI-Technologie und ein damit erzeugtes Spektrum zu sehen. (Beel 2017)

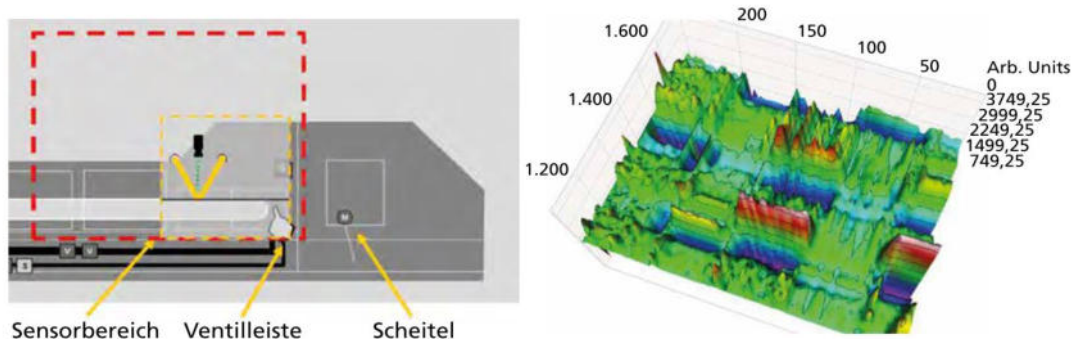


Abbildung 16: Aufbau und Spektrum eines HSI-Sensors (Beel 2017).

Laser-Triangulation

Eine weitere Technologie in der sensorgestützten Sortierung ist die Laser-Triangulation. Mit ihrer Hilfe können Form und Struktur von Materialien ermittelt werden um einen weiteren Klassifikator bei der Sortierentscheidung verwenden zu können. In Abbildung 17 ist der grundsätzliche Aufbau einer solchen Sensoreinheit mit einem 3D-Bild eines gescannten Partikels zu sehen. (Beel 2017)

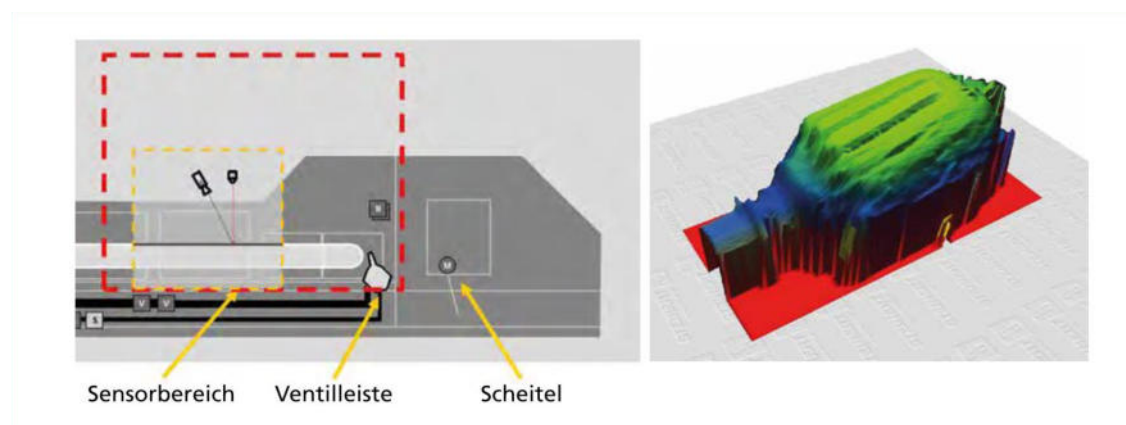


Abbildung 17: Lasertriangulation mit 3D-Bild (Beel 2017).

3.3.5.3 Innere Korneigenschaften

Im Gegensatz zur Sortierung anhand von Oberflächeneigenschaften wird die Detektion von inneren Korneigenschaften weniger stark von Verschmutzungen beeinflusst. Dazu zählen Metalldetektoren (induktive Sensoren) zur Messung der Leitfähigkeit, Röntgentransmission bzw. -fluoreszenz zur Bestimmung der Stoffdichte bzw. der stofflichen Zusammensetzung, Laser Induced Breakdown Spectroscopy, kurz LIBS, zur Identifizierung von Legierungen und thermische Infrarotkameras. Auf den folgenden Seiten wird auf induktive Sensoren sowie Röntgentransmission und -fluoreszenz näher eingegangen. (Wotruba 2008)

Induktion

Elektronische Bauteile wie Kabel oder Leiterplatten können wegen ihrer Größe und Form wie bereits erwähnt nur geringe Wirbelströme ausbilden und sind deshalb mittels Wirbelstromscheidung meist nicht abtrennbar. Auch Edelstähle und Verbundmaterialien gehen in der Wirbelstromtrennung zum größten Teil verloren, weshalb für deren Abtrennung Metalldetektoren eingesetzt werden. (Bilitewski und Härdtle 2013; Beel 2017)

Mithilfe eines Induktions-Sortiersystems (ISS) gelingt die Unterscheidung von elektrisch leitenden von nichtleitenden Materialien auch bei geringem Massenanteil durch die induktive Messung von geringen Leitfähigkeitsverlusten. Dazu wird der langwellige Bereich der Radiofrequenzen verwendet. Eine Erregerspule baut ein magnetisches Wechselfeld auf, welches von den Partikeln des Aufgabeguts beeinflusst wird. Die Empfängerspule detektiert das veränderte Feld und gleicht es hinsichtlich Phasenlage und Amplitude mit dem Feld der Erregerspule ab. Die Spulen sitzen in Form kleiner Einzelsensoren auf einer Sensorleiste, die unterhalb des Förderbandes nahe dem Abwurfbereich angebracht ist. Nimmt der Induktionssensor Signalschwankungen wahr kann das entsprechende Teilchen als Metall aussortiert werden. (Beel 2017; Pretz und Julius 2008)

Der zusätzliche Einsatz von CCR-Farbkameras verbessert die Bestimmung von Form, Lage und Größe der Partikel. Durch die Farberkennung kann die NE-Fraktion je nach Kombination der Klassifikationskriterien in Metallgruppen beliebiger Farbe wie „rote“ (Kupfer), „weiße“ (Aluminium) und „grüne“ (Leiterplatten) Metalle weiter aufgetrennt werden. (Pretz und Julius 2008; Bilitewski und Härdtle 2013)

In Abbildung 18 ist eine Sortiermaschine mit Induktions- und Farbsensor dargestellt. Anders als bei den übrigen in dieser Arbeit vorgestellten Sensorsortierern wird das auszutragende Material entgegen der Wurfrichtung ausgeblasen. Wie oben beschrieben sitzt der Induktionssensor unter dem Fördergurt, die Farbkamera darüber. Wird ein Metallpartikel aufgrund seiner elektrischen Leitfähigkeit erkannt, nimmt der zweite Sensor Merkmale wie Größe, Farbe und Lage im freien Flug auf und steuert die entsprechenden Druckventile. Der Druckluftstoß transportiert das Teilchen über den Trennscheitel. (Kranert und Cord-Landwehr 2010)

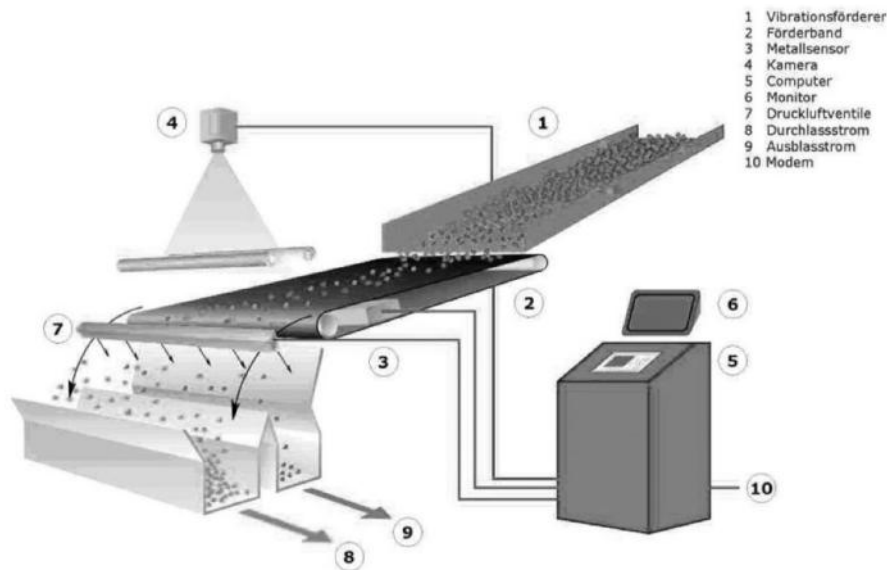


Abbildung 18: Sortierer mit Induktionssensor (Kranert und Cord-Landwehr 2010).

Ein wie in Abbildung 18 dargestellter Sortierer kann bei Korngrößen > 5 mm bis zu 10 000 Teilchen pro Sekunde detektieren, in einem Korngrößenbereich von 50 – 100 mm können Durchsätze von bis zu 15 t/h erreicht werden. (Kranert und Cord-Landwehr 2010)

Werden Induktionssensoren mit NIR-Detektoren kombiniert, können gezielt organische Störstoff und Verbundmaterialien mit hohen Organikgehalten wie Getränkeverbundkartons aus Metallvorprodukten abgetrennt werden. Die NIR-Einheit identifiziert dazu das Trägermaterial, das meist aus Zellstoff besteht. Gleichzeitig detektiert der Induktionssensor die nur ca. 7 μ m dicke Aluminium-Folie. (Wens et al. 2011)

Röntgentransmission

Sortiermaschinen, die mit Röntgentransmission arbeiten, ermöglichen die sensorgestützte Sortierung von Partikeln anhand ihrer atomaren Dichte. Dazu ist über dem Fördergurt eine Röntgenröhre angebracht, deren Strahlung durch die Partikel und den Fördergurt dringt. Das Material absorbiert je nach Art und Dicke einen gewissen Anteil der Strahlung, wobei umso mehr absorbiert wird je höher die Atommasse und je dicker das Partikel ist. Die Reststrahlung trifft anschließend auf zwei Zeilensensoren bzw. eine Röntgenzeilenkamera mit zwei Sensorkanälen unterhalb des Gurtförderers. Im Dual-Energy-Verfahren werden die Intensitäten der Reststrahlung in zwei unterschiedlichen Wellenlängenbereichen gleichzeitig gemessen. Durch die Verknüpfung der beiden Messungen kann der Einfluss der Dicke auf die Absorption der Röntgenstrahlung rechnerisch entfernt werden. (Pretz und Julius 2008; van de Winkel et al.; Beel 2017) Der prinzipielle Aufbau eines solchen Sortierers und ein damit aufgenommenes Röntgenbild sind in Abbildung 19 zu sehen.

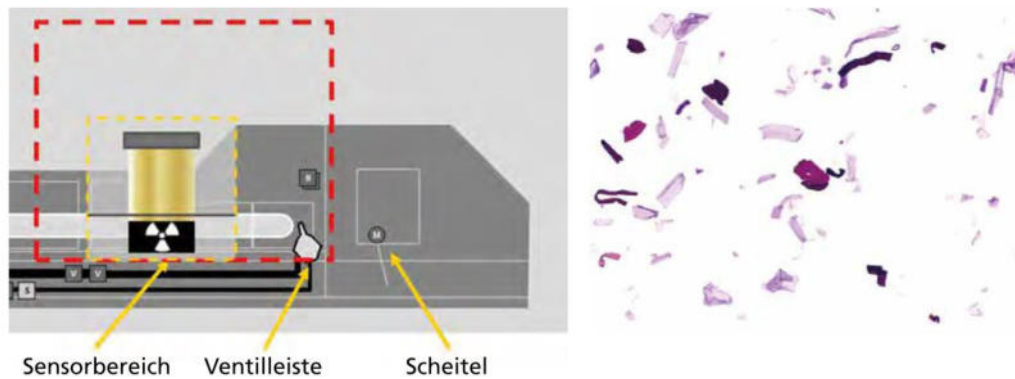


Abbildung 19: Sortierer mit Röntgentransmissions-Sensor und Röntgenbild (Beel 2017).

Die Sortierung mittels Röntgentransmission wird beispielsweise in der Aufbereitung von Metallen eingesetzt, wo Magnesium und Aluminium von Schwermetallen abgetrennt werden. Weiters können aus Leichtverpackungsabfällen Elektronikschrotte entfernt und aus Shredderleichtfraktionen Kunststoffe wie PVC und Elastomere sowie Metalle aussortiert werden. (Pretz und Julius 2008)

Röntgenfluoreszenz

Die Röntgenfluoreszenz wird zur Bestimmung der atomaren Zusammensetzung verwendet. Dazu wird das Aufgabegut in ein niederenergetisches Röntgenfeld eingebracht, wodurch die chemischen Elemente zu Schalenübergängen angeregt werden. Dabei emittieren sie eine elementspezifische Energie, die von den Sensoren erfasst wird und nach der Auswertung als Energiespektren zur Materialklassifizierung verwendet werden (siehe Abbildung 20). Im Gegensatz zur Röntgentransmission befinden sich Röntgenquelle und Sensor oberhalb, auf der gleichen Seite des Förderstromes, wie in Abbildung 20 zu erkennen ist. (Beel 2017)

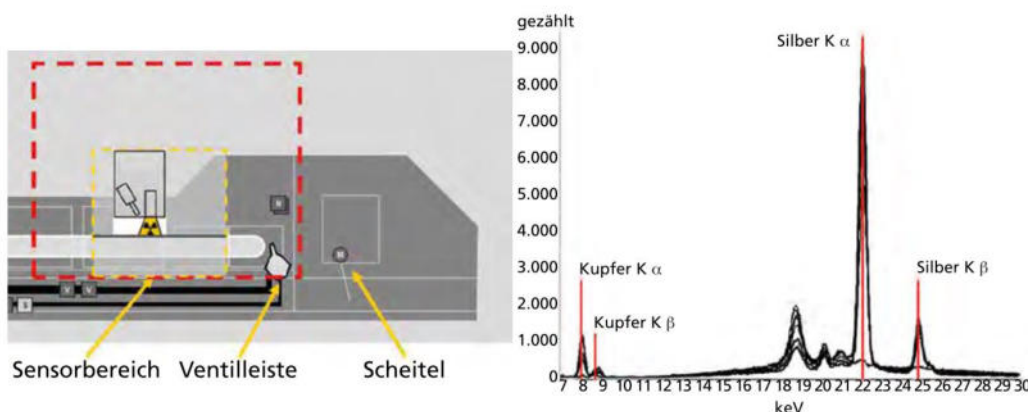


Abbildung 20: Sortierer mit Röntgenfluoreszenz-Sensor und Energiespektrum (Beel 2017).

3.4 Datenauswertung

Um den Erfolg von Aufbereitungsschritten quantifizieren zu können werden unterschiedliche Kennzahlen verwendet. Bezogen auf die Qualität der erzeugten Fraktionen werden zumeist Wertstoffausbringen und Reinheit ermittelt. Dazu wird die Zusammensetzung der jeweiligen Fraktion im Rahmen einer Sortieranalyse bestimmt, mithilfe derer auch der Abgleich mit den Qualitätsanforderungen für den Wiedereinsatz getroffen werden kann. Diese Methoden werden im folgenden Kapitel behandelt.

3.4.1 Ausbringen und Reinheit

Bei der Aufbereitung von Abfällen bzw. den dabei angewandten Trenntechniken wird der Inputstrom in unterschiedliche Outputströme separiert, in der Abfallaufbereitung sind das üblicherweise zwei. Wie in den vorigen Kapiteln erläutert, wird beispielsweise die Aufgabe einer Magnetscheidung in eine Eisenmetall-Fraktion und eine Restfraktion aufgetrennt. (Bilitewski und Härdtle 2013)

In der Praxis werden zur Bestimmung des Trennerfolges repräsentative Proben aus den erzeugten Produkten gezogen und mittels Handsortierung in definierte Stoffgruppen aufgetrennt um anschließend deren Gewicht für die rechnerische Auswertung zu bestimmen. Dabei werden zwei in der Regel voneinander abhängige Kenngrößen ermittelt. Die erste ist der sogenannte Wertstoffgehalt des Wertstoffproduktes bzw. die Reinheit, welche angibt wie hoch der Massenanteil des Wertstoffes im Endprodukt ist. Die zweite Kenngröße ist das Wertstoff- oder Inhalts-Ausbringen des Wertstoffproduktes, welches kennzeichnet wie erfolgreich der Wertstoff aus dem Inputstrom in den Produktstrom überführt werden konnte. (Kranert und Cord-Landwehr 2010) Diese zwei Kennzahlen werden mithilfe der folgenden zwei Formeln berechnet.

$$g_{i,j} = \frac{m_{i,j}}{m_{j,ges}} \quad (1)$$

$$r_{i,j} = \frac{m_{i,j}}{m_{i,G}} \quad (2)$$

Darin stehen $g_{i,j}$ für den Wertstoffgehalt (Reinheit, in kg/kg in %), $r_{i,j}$ für das Ausbringen (in kg/kg in %), $m_{i,j}$ für die Masse des Wertstoffes i im Strom j (in kg), $m_{j,ges}$ für die Masse des Stromes j (in kg) und $m_{i,G}$ für die Masse des Wertstoffes i im Aufgabegut (in kg) (Bauer et al. 2017).

Im Beispiel der Magnetscheidung besteht das Aufgabegut aus einem Stoffgemisch an Eisen- ($m_{Fe,G}$) und Nichteisen-Komponenten ($m_{Rest,G}$). Durch den Sortierprozess werden zwei Fraktionen erzeugt, ein mit Wertstoff angereichertes Eisenprodukt ($m_{FE,ges}$) mit einem gewissen Anteil an Rest ($m_{Rest,FE}$) und ein Restprodukt ($m_{Rest,ges}$), welches noch Eisenmetalle ($m_{FE,Rest}$) enthält. Ziel ist es die Komponenten so gut zu trennen, dass Ausbringen und Reinheit des Wertstoffproduktes möglichst nahe an 100 % herankommen. (Bilitewski und

Härdtle 2013; Kranert und Cord-Landwehr 2010) Für einstufige Trennprozesse in der Aufbereitung liegt das Wertstoffausbringen meist bei 60 – 90 M-%. (Bunge 2012)

Ausbringen und Reinheit stehen in der Regel in unmittelbarem Zusammenhang mit dem finanziellen Erfolg, da die am Markt erzielbaren Preise der Sekundärrohstoffe höher sind je reiner diese aufbereitet werden konnten (Kohaupt 2009). Um einen Sortierprozess sowohl ökonomisch als auch trenntechnisch gänzlich beschreiben zu können sind diese zwei Kenngrößen essentiell.

3.4.2 Sortieranalyse

Eine Sortieranalyse von Restmüll ist eine quantitative und qualitative Erhebung einzelner Abfallfraktionen, beispielsweise des Altpapieranteils, durch die Sortierung von Einzelproben. S 2097-1 (01.04.2005) Sie ist notwendig um die Zusammensetzung von Input- und Outputströmen von Aufbereitungsprozessen untersuchen zu können.

Um die Ergebnisse einer Sortieranalyse vergleichen zu können ist die Durchführung nach vereinheitlichten Schritten erforderlich. Dazu kann die ÖNORM S 2097 herangezogen werden, in der neben Begriffsbestimmungen auch die Planung und Durchführung der Sortierarbeiten sowie die Datenaufbereitung enthalten sind.

Der genaue Ablauf der Sortierarbeiten und der Datenauswertung sind Abbildung 21 zu entnehmen. Nach der Vorbereitung durch Festlegung des Zieles sowie der Aufstellung des Probenahmeplans und der Durchführung der Probenahme wird das Material sortiert, also mittels rein mechanischer Trennung in definierte Fraktionen unterteilt S 2097-1 (01.04.2005). Diese Fraktionen sind im sogenannten Sortierkatalog gelistet und umfassen laut Norm die folgenden Hauptfraktionen, welche weiter in Einzelfraktionen unterteilt werden können:

- Biogene Abfälle,
- Holz,
- Papier und Kartonagen,
- Kunststoffe,
- Glas,
- Textilien,
- Metalle,
- Problemstoffe bzw. gefährliche Abfälle,
- Materialverbunde,
- Elektro- und Elektronikaltgeräte,
- Inertstoffe,
- Andere Abfälle und
- Sortierrest.

Partikel, die keiner Sortiergruppe zugeordnet werden können, bilden den Sortierrest, dessen Zusammensetzung unbekannt bleibt und zumeist eine Feinfraktion enthält. S 2097-1

(01.04.2005). Werden Fraktionen bzw. Hauptgruppen in der durchgeführten Analyse nicht untersucht, werden diese der Fraktion „andere Abfälle“ zugeordnet S 2097-3 (01.04.2005). Je nach Zielsetzung und Beschaffenheit der Grundgesamtheit kann eine Probenvorbereitung notwendig sein. Diese umfasst ausschließlich physikalische Verfahren wie beispielsweise Waschen und Trocknung oder Abtrennung einer Feinfraktion S 2097-3 (01.04.2005).

Vor der Sortierung muss die Gesamtmasse der Probe aufgenommen werden, da die Summe der Einzelfraktionen nach der Sortierung max. 3 % von der Gesamtmasse abweichen darf. Ist es durch eine zu große Gesamtmasse technisch nicht möglich diese zu bestimmen, darf die Wägung entfallen. Anschließend werden sämtliche Einzelbestandteile der Probe den zuvor definierten Fraktionen zugeordnet. Nach der Sortierung werden die Fraktionen gewogen, wobei darauf zu achten ist, dass die Masse der Fraktion mindestens dem Zwanzigfachen der Waagenteilung entspricht. Wird das Volumen der Fraktion bestimmt, muss ein Messgefäß mit zuvor definiertem Volumen verwendet werden, welches maximal das Vierfache des Probenvolumens besitzen darf. S 2097-3 (01.04.2005)

Für die Dokumentation steht ein im Anhang der Norm befindliches Muster zur Verfügung, in dem zumindest Sortierleiter, -ort, -zeit, Probenbezeichnung, Masse bzw. Volumina der Probe und der Fraktionen sowie deren Summen, Abweichungen zwischen den Massen und Plausibilitätsprüfung, Besonderheiten der Probe und besondere Vorkenntnisse sowie eine Fotodokumentation und die Unterschrift des Sortierleiters enthalten sein muss. S 2097-3 (01.04.2005)

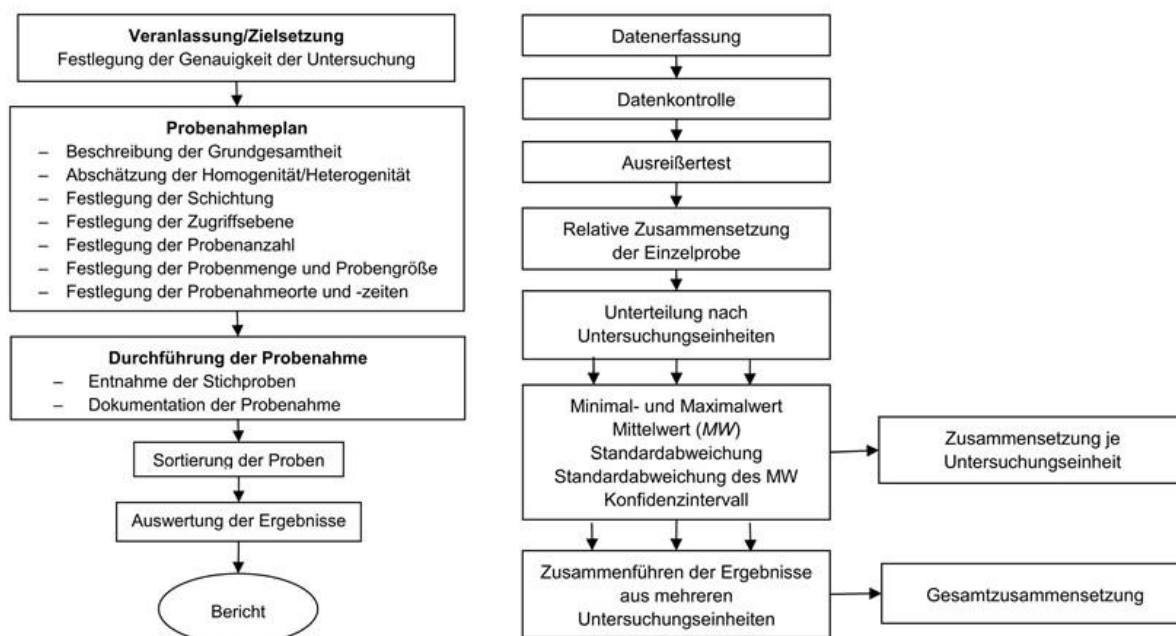


Abbildung 21: Ablauf einer Sortieranalyse (links) und Analyseauswertung (rechts) nach ÖNORM S 2097 (Quelle: S 2097-2 (01.04.2005); S 2097-4 (01.07.2011)).

Wurden die erhobenen Daten digitalisiert und auf Ausreißer überprüft, wird zunächst der Anteil der Einzelfraktion an der Gesamtmasse nachstehender Formel berechnet, in der A_F

der Anteil der Einzelfraktion in Prozent und m_F die Masse der Einzelfraktion in kg ist. Anschließend werden die Einzelfraktionen zu den Hauptfraktionen aufsummiert. S 2097-4 (01.07.2011)

$$A_F = \frac{m_F}{\sum m_F} \cdot 100 \quad (3)$$

Wurde die Probenahme in Hinblick auf ein statistisch-mathematisch Ergebnis geplant und durchgeführt, werden die in Abbildung 21 gelisteten statistischen Kennzahlen berechnet. Diese können mit den Ergebnissen mehrerer Untersuchungen zusammengeführt werden, auf deren Basis schließlich der Analysenbericht erstellt wird. S 2097-4 (01.07.2011)

3.4.3 Qualitätskriterien von Sekundärrohstoffen

Im Folgenden wird ein kurzer Überblick über die wichtigsten Qualitätskriterien von Sekundärrohstoffen gegeben.

Eisenmetalle

Nach Bilitewski und Härdtle 2013 werden an die Recyclingmaterialien Vorgaben bezüglich des Gehaltes an Störstoffen wie Papier, Kunststoff, Lack, Farbe, Gummi, Speisereste, NE-Metalle und Legierungen gestellt. Der geschredderter Stahlschrott aus der Aufbereitung von getrennt gesammelten Dosen muss einen minimalen Gehalt an metallischem Eisen von 92 % und maximal 5 % Feinanteil < 5 mm enthalten. Das Schüttgewicht muss mindestens $0,9 \text{ t/m}^3$ betragen und die Korngröße darf die Obergrenze von 50 – 70 mm nicht überschreiten.

Nicht-Eisen-Metalle

Bei der Abtrennung von NE-Metallen aus Restmüll werden in einem ersten Schritt Produkte erzeugt, die Mischungen unterschiedlicher Metalle darstellen. Im Recycling werden jedoch sortenreine Fraktionen eingesetzt, wodurch die generierten Produkte nicht direkt mit den Spezifikationen der Sortenlisten vergleichbar sind. Um wiedereinsatzfähige Materialien zu erzeugen sind deshalb weitere Aufbereitungsschritte notwendig, die durch mehrere Gründe wirtschaftlich durchführbar sind. Einerseits ist nach Wens et al. 2011 der Einsatz von Sekundärmetallen fast unbegrenzt und mit geringem Qualitätsverlust möglich. Andererseits ist es notwendig die in Europa nicht ausreichend verfügbaren Primärrohstoffe zu ersetzen um die Abhängigkeit von Importen zu verringern. Ein weiterer Faktor sind die stark schwankenden Preise der Altmetalle, da diese wie Produkte am Markt gehandelt werden (Martens 2011). Das macht nicht nur mehrstufige, komplexe Aufbereitungsverfahren wie beispielsweise bei der Veredelung der Shredderschwerfraktion, sondern auch die Abtrennung von NE-Metallen aus Hausmüll wirtschaftlich (Wens et al. 2011). Kohaupt 2009 zeigt an einem Beispiel, dass bei der Produktion eines Ersatzbrennstoffproduktes aus Hausmüll die NE-Metalle mit einem Anteil von 4 % sämtliche Kosten decken und die „Cash-Cow“ des Prozesses darstellen.

Weißglas

Glas lässt sich durch die Stabilität der Silikate annähernd verlustfrei in Bezug auf die Qualität recyceln. Um eine hohe Wiedereinsatzquote zu erzielen müssen aber die Annahmespezifikationen der Glashütten eingehalten werden, die den maximalen Fremdstoff- und Fehlfarbanteil bestimmen (Bilitewski und Härdtle 2013). Laut Bilitewski und Härdtle 2013 werden Weißglasscherben ab einem Fehlfarbanteil von 0,4 % Grünglas, 0,3 % Braunglas und 0,2 % anderen Gläsern abgelehnt. Der erlaubte Mittelwert des Fehlfarbanteils an Grünglas darf 0,2 % nicht überschreiten. In Martens 2011 ist ein Mindestgehalt an Weißglas von 97 % mit max. 1 % Fremdstoffen und 2 % Fremdgläser, ein gesamter Fehlfarbanteil von max. 3 % und davon max. 1 % Grünglas und max. 2 % Braunglas zu finden, was für Hohlgläser aus der getrennten Sammlung gilt.

Grünglas

Grünglas darf laut Martens 2011 max. 1 % Fremdstoffe, 2 % und einen Fehlfarbanteil von max. 15 % enthalten, der Anteil an Grünglas muss min. 97 % betragen. Bilitewski und Härdtle 2013 geben einen Mindestfarbanteil von Grünglas mit 75 % an, wobei der Mittelwert des Braunfarbanteils unter 10 % liegen muss.

Braunglas

Die Anforderungen der Glasindustrie an Braunglasscherben sind laut Martens 2011 ein maximaler Fremdstoffanteil von 1 %, ein Fehlfarbanteil von max. 8 % und ein Fremdglasanteil von 2 % bei min. 97 % Braunglas. Bilitewski und Härdtle 2013 geben einen minimalen Farbanteil an Braunglas von 80 % an, bei maximal 15 % Grünglas, dessen Durchschnittswert 10 % nicht überschritten werden darf. Bei der Färbung von Gläsern kommen verschiedenste Metalloxide zum Einsatz, die nicht gemischt eingeschmolzen werden können (Martens 2011).

Kunststoffe

Die Anforderungen an recycelte Kunststoffe orientieren sich an den daraus erzeugten Produkten. Die Preise der Sekundärkunststoffe sind ähnlich wie Schrotte und Altpapier von der Situation am Markt abhängig. Durch niedrige Erdöl- und Neuwarenpreise ist die rohstoffliche Verwertung meist günstiger als die werkstoffliche. Sortenreine Kunststoffe homogener Qualität sind gut vermarktbar, Absatzschwierigkeiten gibt es bei vermischten Kunststoffen wie sie z.B. im Haushalt anfallen, für sie sind am Markt keine Erlöse für die werkstoffliche Verwertung zu erzielen. (Bilitewski und Härdtle 2013)

Inertstoffe – mineralische Baustoffe

Mineralische Baustoffe bestehen aus 3 Gruppen, den Keramiken, natürlich ungebundenen Gesteinen und den Bindebaustoffen (Martens 2011). Sie wurden im Rahmen dieser Arbeit als Inertstoffe zusammengefasst. Die Sekundärbaustoffe werden nach einer Prüfung wie

Primärmaterial eingesetzt, erzielen aber bis zu 40 % geringere Erlöse (Bilitewski und Härdtle 2013). Das liegt vor allem daran, dass die Einsparung natürlicher Ressourcen und der Eingriff in die Natur durch den Tagebau nur zweitrangig ist. Der Hauptantrieb für das Recycling liegt in der Verminderung des Schadstoffeintrags in Böden und in der Reduzierung des Deponievolumens (Martens 2011). Ist das untersuchte Material nach Recycling-Baustoffverordnung 2015 nicht für den Wiedereinsatz geeignet, muss die Ablagerungsfähigkeit nach Deponieverordnung 2008 geprüft werden. Dabei richten sich die Kosten der Ablagerung nach den Kompartimenten der Deponie, wobei für die Beseitigung auf einem Baurestmassenkompartiment geringere ALSAG-Beiträge zu entrichten sind als auf einem Massenabfallkompartiment. (Altlastensanierungsgesetz 07.06.1989)

4 Durchführung der Aufbereitungs- und Sortierversuche

Im folgenden Kapitel wird der Versuchsaufbau des praktischen Teils dieser Arbeit behandelt. Dazu wird zunächst auf den Aufbau der Versuche eingegangen, anschließend werden die eingesetzten Aggregate sowie Verfahrensparameter beschrieben.

Bei der Aufbereitung von festen Abfällen wird meist nach dem in Abbildung 22 dargestellten Schema vorgegangen, worin zum jeweiligen Sortierverfahren Aggregate sowie Anwendungsgebiete dargestellt sind. Die im Rahmen dieser Arbeit durchgeführten Aufbereitungsschritte wurden ebenfalls in dieser Reihenfolge mit vergleichbaren Verfahren durchgeführt. Dabei wurde das Inputmaterial in einem ersten Schritt zerkleinert und danach in zwei parallelen Linien behandelt. Die eine Hälfte des Materials wurde in einer nassen Dichtentrennung mittels Setzmaschine, Zentrifugalkraftscheider und Entwässerungssieb in 3 Fraktionen aufgeteilt, die andere Hälfte durchlief eine trockene Dichtentrennung im Zick-Zack-Sichter, in der 2 Fraktionen erzeugt wurden. Anschließend wurden die Schwergutfractionen der zwei Linien mittels Magnetscheidung und Sensorsortierung mit Metalldetektoren, Farbkameras und NIR-Sensoren weiter aufbereitet.

Sortierverfahren	Apparate	Anwendungsgebiet, Sortieraufgabe
Dichtesortieren		
1. Schwimm-Sink-Verfahren		
1.1. Schwerkraft	Schwimm-Sink-Scheider, Schwertrübescheider	Kunststoffe verschiedener Dichte, Kunststoffe von Metallen, Metalle, Legierungen verschiedener Dichte
1.2. Zentrifugalkraft	Sortierzentrifuge, Sortierzyklon	Kunststoffe von Metallen, Kunststoffe verschiedener Dichte
2. Setzprozesse		NE-Metall-Schrott
3. Herdsortierung	Stoßherd	Kunststoffe von Metallen, Kunststoff, Papier
4. Windsichten	Zick-Zack-Sichter, Querstromsichter	Kabelisolierung von Kupferdraht
Magnetsortieren	Trommelmagnetscheider, Überbandmagnetscheider	Ferromagnetische Metalle, Legierungen (Eisenwerkstoffe, Nickelwerkstoffe) von Metallen, Kunststoff, Papier u. a.
Wirbelstromsortieren	Wirbelstromscheider	Aluminium, Magnesium von Papier, Folien, Kunststoffen, Glas, nichtmagnetischen Metallen
Elektrosortieren	Elektrostatische Scheider, Koronawalzenscheider	Kunststoffarten
Sortieren nach mechanischen Eigenschaften	Siebbandscheider, ballistischer Separator	Folien von Kompaktmaterial, Verpackungen, Bau- und Gewerbeabfälle, Sperrmüll
Flotation	Flotationszelle	Deinking von Papierpulpen
Sensorgestützte Sortierung	Förderband mit NIR-Sensor, optoelektronischer Sensor, Metalldetektor, Röntgensensor, Multisensorik	Kunststoffarten, Glassorten, Kunststoffe von Metallen, Metallmonofractionen, Leiterplatten, PVC, Papier, Papiersorten, Holz, Baumischabfälle

Abbildung 22: Ablauf bei der Aufbereitung von Abfällen (Martens 2011).

Bei dem eingesetzten Material handelte es sich um gemischten Siedlungsabfall aus Haushalten (ohne Gewerbeabfall) aus dem Raum Leoben, der im Rahmen des Projekts „Plastic Reborn“ auf dessen Polyolefingehalt untersucht wurde. Auf die Zusammensetzung des Originalmaterials wird in Kapitel 5 eingegangen.

Der Aufbau der Aufbereitungsversuche ist in den nachfolgenden Fließbildern dargestellt, Abbildung 23 bietet einen Gesamtüberblick und Abbildung 24 zeigt die einzelnen Schritte der Sortierung im Detail. Darin stehen SGf und SGt für nassmechanisch und trockenmechanisch generiertes Schwergut, die im Folgenden mit den Abkürzungen bezeichnet werden. MGf steht für das Mittelgut aus der nassmechanischen Aufbereitung, FGt und LGt für das Feingut und Leichtgut in der trockenmechanischen Aufbereitungslinie. Sämtliche Prozentangaben in den folgenden Kapiteln stellen, falls nicht anders erwähnt, Massenanteile dar. Die eingesetzten Aggregate sowie Verfahrensparameter werden in den folgenden Kapiteln behandelt.

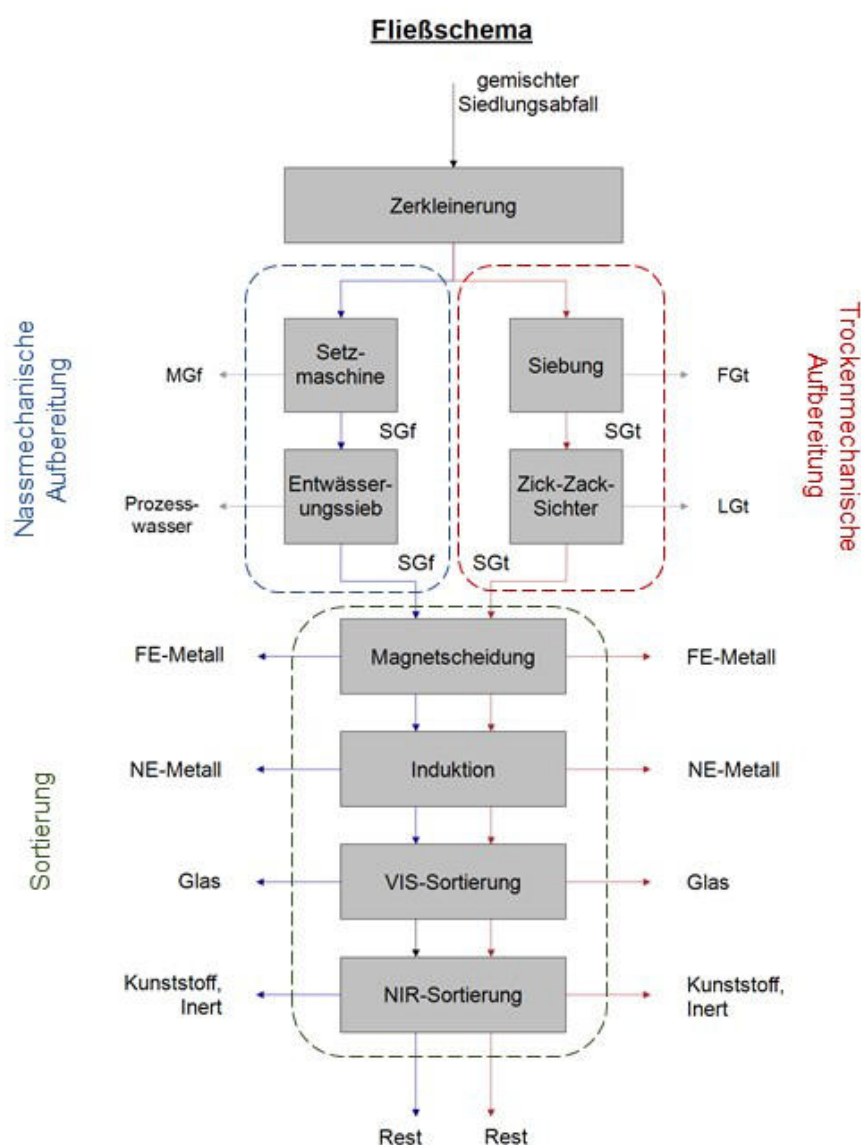


Abbildung 23: Fließschema der Aufbereitung (eigene Darstellung).

Der Restmüll wurde über die schwarze Tonne gesammelt und von einem Aufbereiter auf < 20 mm zerkleinert. Dabei kam ein Einwellenzerkleinerer zum Einsatz, der insgesamt 300 kg Restmüll behandelte.

150 kg des zerkleinerten Materials wurden in der Pilotanlage von Projekt „Plastic Reborn“ nassmechanisch aufbereitet und in 3 Teilströme getrennt. Dabei wurde mittels Setzmaschine und Entwässerungssieb, die in Abbildung 23 die nassmechanische Aufbereitungslinie darstellen, eine Schwergutfraktion (SGf) erzeugt. (Auf die Anlage von „Plastic Reborn“ wird im folgenden Kapitel näher eingegangen.) Die trockenmechanische Aufbereitungslinie bildeten händische Siebung und ein Zick-Zack-Sichter, in dem ebenfalls ein Schwergut (SGt) erzeugt wurde. Die in den beiden Aufbereitungslinien generierten Materialströme (SGf und SGt) wurden anschließend mithilfe derselben Sortierschritte weiter aufbereitet, vgl. Abbildung 24. Den ersten Sortierschritt bildete eine zweistufige Magnetscheidung, bei der durch einen Schwachfeldscheider als erste Stufe ein stark magnetisierbares Eisenprodukt und durch einen Starkfeldscheider als zweite Stufe ein schwach magnetisierbares Eisenprodukt generiert wurde. Im zweiten Sortierschritt wurden an einem sensorgestützten Sortierstand mithilfe eines Metalldetektors Nicht-Eisen-Metalle abgetrennt. Den dritten Sortierschritt bildete eine Farbsortierung, in der in drei aufeinanderfolgenden Stufen Weiß-, Grün- und Braunglasfraktionen erzeugt wurden. Der vierte und letzte Sortierschritt besteht aus einer Sensorsortierung im NIR-Bereich, in dessen erster Stufe eine Kunststofffraktion und in zweiter Stufe eine Inertfraktion, bestehend aus Ziegeln, Keramiken und Steinen, generiert wurde.

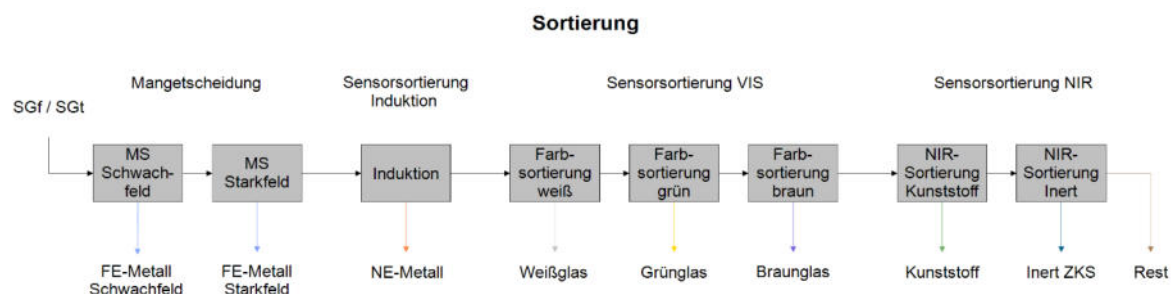


Abbildung 24: Fließschema der Sortierung im Detail (eigene Darstellung).

Die eingesetzten Aggregate sowie Verfahrensparameter werden in den nachfolgenden Unterkapiteln dargestellt.

Sämtliche erhaltenen Fraktionen, sowie die Reste der einzelnen Sortierschritte, wurden per Hand sortiert und gewogen um anschließend die Reinheit und das Ausbringen des jeweiligen Sortierschritts rechnerisch zu ermitteln.

4.1 Nassmechanische Aufbereitung

In der Pilotanlage des Projekts „Plastic Reborn“ wurden unterschiedliche Abfallströme, u.a. gemischte Siedlungsabfälle, behandelt, mit dem Ziel, diese in die drei Fraktionen Schwergutfraktion (SGF), Mittelgutfraktion (MGF) und Leichtgutfraktion (LGF) zu trennen. Mit der erzeugten SGF sollen Inertstoffe bzw. anorganische Komponenten abgetrennt werden, welche aus Stoffen wie Metallen, Glas und Steinen bestehen. (Bauer et al. 2017)

Die Zerkleinerung erfolgte mittels Einwellenzerkleinerer auf < 20 mm in erster Linie für einen hinreichenden Aufschluss und um den Einfluss von Partikelform sowie -größe bei der Dichtentrennung in Grenzen zu halten. Die Zerkleinerung war nicht Teil der Versuchsanlage, welche aus den Kernelementen einer Setzmaschine und eines Zentrifugalkraftscheiders besteht und in Abbildung 25 zu sehen ist. (Bauer et al. 2017)

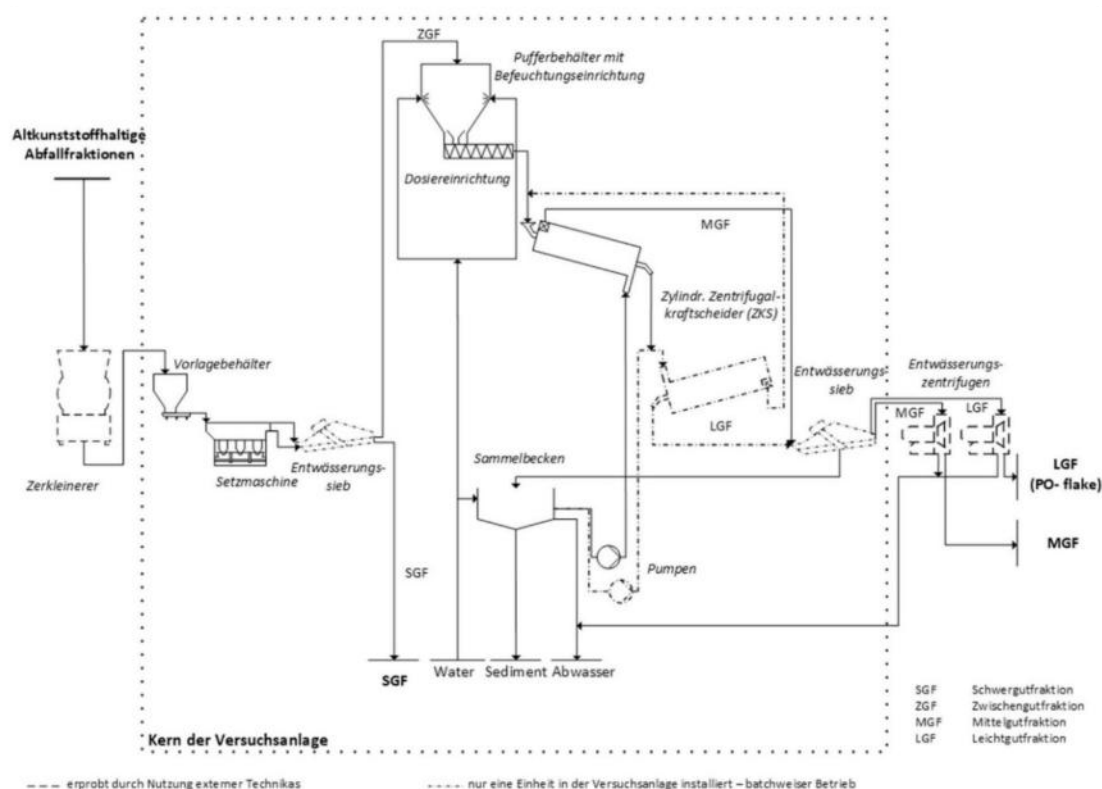


Abbildung 25: Fließschema der Pilotanlage Plastic Reborn (Bauer et al. 2017).

Das Aufgabegut gelangt aus einem Vorlagebehälter in die Setzmaschine, wo sich dessen Partikel durch die induzierten Hubfrequenzen in einem Setzbett nach deren Dichte schichten. Störstoffe wie Glas-, Metall- oder Inertpartikel reichern sich im unteren Bereich des Setzbettes an und werden mithilfe von Leitblechen als Schwergutfraktion (SGF) vom übrigen Material abgetrennt. (Kranzinger et al. 2017) Die Schwergutfraktion wurde auf einem Linearschwingsieb vom Prozesswasser befreit und aus der Anlage ausgeschleust. Die spezifisch leichteren Teilchen schwimmen an der Wasseroberfläche auf und werden durch die Leitbleche als Zwischengutfraktion (ZGF) über ein sich periodisch öffnendes Wehr ausgetragen. Die ZGF wird in einem Pufferbehälter gesammelt und mithilfe eines

Schneckenförderers in den Zentrifugalkraftscheider eingebracht. Die Aufgabe erfolgt direkt in den Vortex des Trennapparates über eine Öffnung im Deckel. Partikel mit einer geringeren Dichte als Wasser, vor allem Polyolefine, reichern sich an der Grenzfläche zwischen Wasser- und Luftwirbel an, der sich mittig entlang der Achse des Aggregates ausbildet. Diese Teilchen bilden die Leichtgutfraktion (LGF), die durch die Schwerkraft ausgetragen wird. Schwerere Teilchen werden nach außen an die Behälterwand gedrückt und verlassen den Zentrifugalkraftscheider als Mittelgutfraktion (MGF) gemeinsam mit dem Trennmedium tangential zum Apparat. Um eine möglichst effiziente Trennung zu erreichen kann das erzeugte Leichtgut der ersten Stufe erneut dem Zentrifugalkraftscheider zugeführt werden. Abbildung 26 zeigt die reale Anlage mit den Kernelementen Setzmaschine, Zentrifugalkraftscheider und Linearschwingsieb. (Bauer et al. 2017; Kranzinger et al. 2017)



Abbildung 26: Aufnahme der Anlage aus dem Projekt „Plastic Reborn“ (Schwabl 14.09.2019).

Auf diese Weise werden die drei Fraktionen SGF, MGF und LGF erzeugt, wodurch 11,15 kg Schwergut für die im Rahmen dieser Arbeit durchgeführten Sortiersversuche zur Verfügung standen. Auf die Zusammensetzung der SGF sowie deren Anteil am Originalmaterial wird in Kapitel 5 eingegangen. Um die nassmechanische Aufbereitung und rohstoffliche Verwertung der LGF sinnvoll einsetzen zu können sollten auch SGF und MGF ökonomisch vorteilhaft verarbeitet werden können, weshalb im Zuge dieser Arbeit die Verwertung der SGF mithilfe weiterer Sortierschritte untersucht wurde. (Kranzinger et al. 2017)

4.2 Trockenmechanische Aufbereitung

Das Ziel der trockenmechanischen Aufbereitung ist die Erzeugung einer Schwerfraktion, deren Zusammensetzung und Produkte aus den weiteren Sortierschritten mit jener aus der Nassmechanischen Aufbereitung vergleichbar ist. Dazu soll ein Zick-Zack-Sichter verwendet werden, da dieser in der Aufbereitung von Abfällen zur trockenen Dichtentrennung häufig Anwendung findet.

Der eingesetzte Zick-Zack-Sichter des Lehrstuhls für Verfahrenstechnik des Industriellen Umweltschutzes (siehe Abbildung 28) besteht aus einem Sichtraum rechteckigen Querschnitts mit einer Fläche von 10 000 mm² und einer Gesamthöhe von 1390 mm. Der Sichtraum wird von unten mit Druckluft aus einem Kompressor angeströmt, die Prozessluft durchwandert den Sichtraum nach oben, wird dort in einen Zyklonabscheider gelenkt und in einem Gewebefilter von Feinkorn befreit und tritt schließlich über eine Rohrleitung aus der Anlagenhalle ins Freie.

Dabei wird das Aufgabegut über eine Zelle per Hand aufgegeben, deren zwei Hebel im Wechsel geöffnet werden, um einen Druckabfall im Sichter zu verhindern. Durch das Öffnen der unteren Schleuse rieselt das Material über ein rundes Rohr in den Sichtraum. Dort werden die Partikel vom aufwärtsgerichteten Luftstrom erfasst, wobei die spezifisch schwereren Partikel nach unten wandern und in einen per Spannriemen befestigten Behälter fallen. Die spezifisch leichteren Teilchen werden nach oben mitgenommen, aus dem Sichtraum ausgetragen und durch einen Zyklon in einen ebenfalls per Spannring befestigten Behälter aus dem Luftstrom abgeschieden. Die Prozessluft verlässt den Zyklon, wird im Gewebefilter von Feinkorn befreit und gelangt ins Freie.

Durch die Zerkleinerung und anschließende Lagerung des gemischten Siedlungsabfalles kam es zur Agglomeration von Material und der Bildung größerer Brocken mit Korngrößen von bis zu über 105 mm, wie in Abbildung 27 zu sehen ist. Diese konnten zum Großteil nicht über die Schleuse in den Sichter eingebracht werden und wurden daher vor der Sichtung per Hand zerkleinert.



Abbildung 27: Teile des Inputmaterials vor der Teilung (eigene Aufnahme).

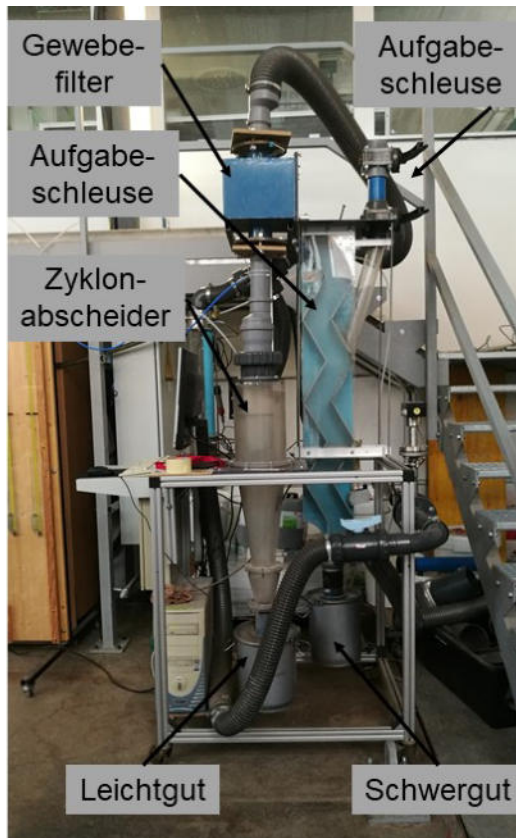


Abbildung 28: Eingesetzter Zick-Zack-Sichter (eigene Aufnahme).

Der im Originalmaterial enthaltene Feinkornanteil führte zum Zusetzen des Gewebefilters, wodurch der Betrieb gestoppt werden musste. Daher wurde für sämtliche weitere Versuche das Feinkorn des Inputmaterials entfernt und daher insgesamt 14,15 kg Aufgabegut vor der Sichtung per Hand gesiebt. Dabei kam ein Siebbelag mit einer Maschenweite von 2 mm zum Einsatz (siehe Abbildung 29). Dazu wurden je „Durchgang“ zwei Handschaufeln an Aufgabegut auf den Siebbelag aufgebracht und durch Schwenken jeweils 5 min gesiebt. Der Anteil an Feingut wurde für eine Teilmenge des eingesetzten Materials bestimmt und wird in Kapitel 5 diskutiert.



Abbildung 29: Handsiebung, links: zerkleinertes Inputmaterial, rechts: verwendetes Werkzeug (eigene Aufnahme).

Die Sichtung von 10,73 kg ungesiebt Material wurde bei einem Luft-Volumenstrom von 210 Nm³/h im Windsichter durchgeführt. Um eine weitere Gefährdung der Anlage zu

reduzieren wurde neben der zusätzlichen Siebung auch der Volumenstrom angepasst und das gesiebte Material bei 180 Nm³/h gesichtet.

Durch den begrenzten Durchsatz von durchschnittlich 1,64 kg/h konnten im Rahmen der für diese Arbeit zur Verfügung stehenden Stunden nicht die gesamten 150 kg gemischte Siedlungsabfälle am Siebter aufbereitet werden. Es wurden daher insgesamt 24,88 kg dem Siebter zugeführt und somit 8,48 kg Schwergut erzeugt, die anschließend mittels Viertelungsmethode (Mischkreuzverfahren) auf 4,76 kg (Input MS1) verjüngt wurden um somit ein Probenvolumen zu erhalten, das jenem aus der nassmechanischen Aufbereitung gleicht (Institut für nachhaltige Abfallwirtschaft und Entsorgungstechnik (IAE) 2004).

4.3 Magnetscheidung

Ziel der Magnetscheidung ist die Rückgewinnung von Eisen-Metallen und Erzeugung eines magnetischen Produkts mit ausreichender Reinheit zum Einsatz als Sekundärrohstoff.

Die Sortierung erfolgte zweistufig mittels überlaufend betriebener Schwach- und Starkfeldscheider am Lehrstuhl für Aufbereitung und Veredelung. Grund für die zweistufige Ausführung ist zum einen das unterschiedlich stark magnetisierbare Material im Aufgabegut. Die anziehende Kraft auf stark magnetisierbare Metallteile ist bei hohen magnetischen Feldstärken so stark, dass dieses nicht am Ende des magnetischen Bereiches von der Trommel gelöst und somit zu Problemen bei der Sortierung führen können. Zum anderen können durch zwei getrennte Stufen auch zwei Produkte mit unterschiedlichen Einsatzmöglichkeiten im Recycling erzeugt werden.

Das Aufgabematerial wird der ersten Magnetscheidung (Schwachfeldscheider) zugeführt, wo ein starkmagnetisierbares Produkt (FE1) erzeugt wird. Das Material, das nicht in das Produkt der ersten Stufe ausgetragen wird, gelangt in die zweite Magnetscheidung (Starkfeldscheider), in der es in ein schwach magnetisierbares Produkt (FE2) und eine Restfraktion (Rest MS) getrennt wird (siehe Abbildung 30). Diese zwei Teilschritte werden als ein Prozess betrachtet, weshalb das Ausbringen der Eisen-Produkte bezogen auf den Rest nach der zweiten Magnetscheidung bestimmt wird. Zur Berechnung von Reinheit und Ausbringen der Produkte wurden die magnetischen Bestandteile mittels Handmagnet aus den jeweiligen Fraktionen ausgehoben und von den Störstoffen getrennt gewogen.

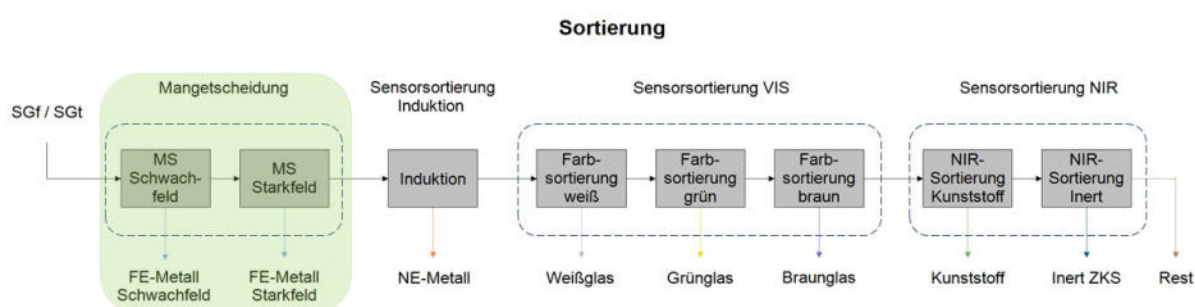


Abbildung 30: Erster Sortierschritt – Abtrennung von Eisen-Metallen (eigene Darstellung).

Auf die Aggregate sowie Durchführung der Aufbereitung wird im Folgenden eingegangen.

4.3.1 Schwachfeldscheidung

Die erste Stufe der Magnetscheidung bildet ein Schwachfeldscheider, der als Ablenktrommelscheider ausgeführt ist und in Abbildung 31 zu sehen ist.

Das Aufgabematerial gelangt über einen Trichter auf eine Vibrorinne von 49 mm Breite, die das Material von oben auf den Scheitelpunkt der Magnettrommel aufbringt. Diese Messingtrommel mit Gusseisen-Leitplatten ist mit Spulen aus Stahl-Stiften in Wechselepolanordnung ausgestattet. Sie sind über einen Bereich von 150 – 160 ° angebracht und erzeugen mithilfe der variablen Stromstärke eine magnetische Flussdichte von ca. 0,05 T. Die Trommel hat einen Durchmesser von 374 mm und kann über einen Motor in Rotation versetzt werden. Die Drehzahl wird auf rund $1,35 \text{ s}^{-1}$ eingestellt. Gelangt das Sortiergut auf die Magnettrommel, werden die starkmagnetischen Partikel von der Trommel bis zum Ende des magnetischen Bereichs mitgenommen, bis sie schließlich hinter dem Trennscheitel in einen unter dem Tisch montierten Behälter fallen. Das nichtmagnetische Produkt folgt der Flugparabel und fällt ebenfalls in einen Auffangbehälter unter dem Tisch.



Abbildung 31: Eingesetzter Schwachfeldmagnetscheider (eigene Aufnahme).

Da die sortierbare Menge durch das Volumen der Auffangbehälter begrenzt ist, wurde das Aufgabegut im Batch-Betrieb aufbereitet. Dabei waren bei der Behandlung des Schwergutes aus der Nassmechanischen Aufbereitung (SGf) insgesamt vier „Batches“ notwendig, da der Input hoch an Eisen-Metallen angereichert war und sich der Auffangbehälter dadurch mehrmals vollständig füllte. Der Durchsatz bei der Sortierung der SGf am

Schwachfeldscheider betrug 620 kg/h·m. Die einzelnen Chargen der Outputfraktionen wurden gesammelt und gemeinsam sortiert bzw. weiter behandelt. Die Magnetscheidung des Schwergutes aus der trockenmechanischen Aufbereitung (SGt) konnte in einem Batch durchgeführt. Dabei war ein Durchsatz von 512 kg/h·m möglich.

Die Eisen-Produkte der nass- und trockenmechanisch aufbereiteten Schwerfraktion wurden mithilfe eines Handmagneten in magnetisierbares Material und Störstoffe getrennt und nach Wägung die Reinheit bestimmt. Das Ausbringen wurde bezogen auf den Rest der nächsten Magnetscheiderstufe bestimmt.

4.3.2 Starkfeldscheidung

Der Starkfeldscheider der zweiten Stufe der Magnetscheidung ist ein Trommelablenkscheider des Typs STKHP 1-40 S der Firma IFE Aufbereitungstechnik GmbH und ist in Abbildung 32 zu erkennen.

Das Aufgabegut der Starkfeldscheidung besteht aus dem „nichtmagnetisierbaren“ Material der Schwachfeldscheidung. Dieses wird ebenfalls in einen Trichter aufgegeben wird mit einer 210 mm breiten Vibrorinne transportiert, die das Material auf den Scheitelpunkt der Magnettrommel aufbringt. Die Trommel hat einen Durchmesser von 309 mm und rotiert in Förderrichtung mit einer kontinuierlich einstellbaren Drehzahl. Die Drehzahl wurde mit $1,18 \text{ s}^{-1}$ gewählt, was der Einstellung 3,5 auf der eingebauten Skala entspricht. Die magnetisierbaren Partikel werden von einem Permanentmagnet in Wechsellinienanordnung an der Trommel gehalten bis sie den magnetischen Bereich verlassen. Dort fallen sie hinter der Trennschneide in einen separaten Auffangbehälter bzw. werden stark haftende Teilchen mithilfe einer Bürste von der Magnettrommel entfernt. Nicht magnetisierbare Partikel werden durch den Magnet nicht von ihrer Flugbahn abgelenkt und fallen ebenfalls in einen Auffangbehälter. Um die Verunreinigung des Magnetproduktes minimal zu halten wurde die Einstellung der Trennschneide mit 20 mm möglichst nahe an der Trommel gewählt.

Der Durchsatz bei der Sortierung des nass- bzw. trockenmechanisch aufbereiteten Materials betrug 765 kg/h·m bzw. 247 kg/h·m.

In dieser Sortierstufe wurden die Produkte FE2 und Rest FE generiert. Die Bestimmung der Reinheit für das schwach magnetisierbare Eisenprodukt erfolgte in gleicher Weise wie für das stark magnetisierbare Eisenprodukt der ersten Magnetscheidung. Nach Trennung von Störstoffen und Metallpartikeln mittels Handmagnet und Wägung wird die Reinheit berechnet. Die Rest-Fraktion wird mittels Handmagnet auf magnetisierbare Partikel überprüft und nach deren Wägung das Ausbringen bestimmt.



Abbildung 32: Eingesetzter Starkfeldmagnetscheider (eigene Aufnahme).

4.4 Sensorsortierung

Nach der Magnetscheidung erfolgte die Sortierung am sensorgestützten Sortierstand (siehe Abbildung 33). Zuerst wurden Metalle mithilfe eines Induktionssensors abgetrennt, danach wurden Weiß-, Grün- und Braunglasprodukte mithilfe eines Farbsensors generiert. Anschließend wurden Kunststoff- sowie Inertfraktionen mittels NIR-Sensor erzeugt.

Das Aufgabematerial wird in einen Trichter eingefüllt, durch den es auf eine Vibratorrinne gelangt. Diese wird über einen Linearschwinger in Vibration versetzt, dessen Schwingungsfrequenz über ein Potentiometer einstellbar ist. Die Vibratorrinne hat eine Arbeitsbreite von 480 mm und fördert das Material in den Sensorbereich. Dort werden die als Trennkriterium dienenden Materialeigenschaften vom jeweiligen Sensor aufgenommen und vom angeschlossenen Computer verarbeitet. Dieser steuert eine Düsenleiste unterhalb der Schurre an, die mithilfe von Luftdruckstößen das entsprechende Partikel in das Produkt austrägt. Die übrigen Partikel rutschen die Schurre abwärts und fallen in das Restprodukt. Die zwei erzeugten Fraktionen werden dann mittels Handsortierung auf den jeweiligen Wertstoff untersucht und nach dessen Wägung Ausbringen und Reinheit berechnet. Um den Probenumfang einzugrenzen wurde der Feinanteil kleiner 4 mm vor der Handsortierung abgetrennt. Der Siebelag für die Handsiebung wurde bei 4 mm gewählt, da dies die vom Sortierer untere verarbeitbare Korngröße darstellt.

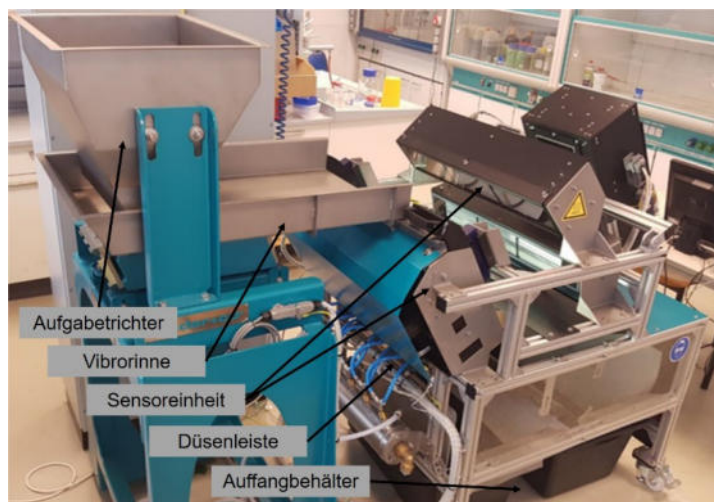


Abbildung 33: Eingesetzter sensorgestützter Sortierer (eigene Aufnahme).

4.4.1 Induktionssortierung

Im zweiten Sortierschritt wurden Nicht-Eisen-Metalle bzw. nicht magnetisierbare Metalle mithilfe eines Metalldetektors abgetrennt. Dieser besteht aus einer Spulenleiste mit einer Auflösung von 20 mm, die Empfindlichkeit wurde entsprechend dem Aufgabegut auf Stufe 5 eingestellt. Das Material wurde wie beschrieben aufgegeben und nach den in Kapitel 3.3.50 beschriebenen Prinzipien getrennt. Die zwei erzeugten Fraktionen NE-Metalle und Rest NE wurden wie oben beschrieben handsortiert um Ausbringen und Reinheit zu berechnen.

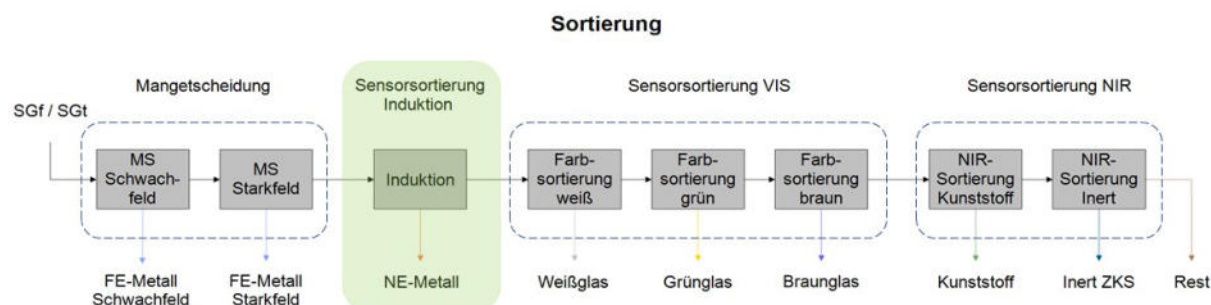


Abbildung 34: Zweiter Sortierschritt - Abtrennung Nicht-Eisen-Metalle (eigene Darstellung).

Bei der Sortierung des Materials aus der Nassmechanischen Aufbereitung wurde ein Luftdruck von 3,5 bar, eine minimale Ausblaszeit von 25 ms und eine Verzögerungszeit von 95 ms gewählt, die einen Durchsatz von 52,8 kg/h·m ermöglichen. Bei der Sortierung des trockenmechanisch aufbereiteten Materials wurden ebenfalls 3,5 bar Luftdruck eingestellt, die minimale Ausblaszeit sowie die Verzögerungszeit betragen 20 ms bzw. 65 ms und ermöglichen einen Durchsatz von 67,8 kg/h·m.

Beim Partikelaustrag durch Druckluftstöße hat die Kornform einen großen Einfluss auf das Ausbringen, was in diesem Sortierschritt deutlich beobachtet werden konnte und zu zwei Gründen zusammengefasst werden kann. Einerseits weisen längliche, verbogene Teile am errechneten Schwerpunkt kein Material auf werden nicht ausgetragen da der Luftdruckstoß

ins Leere geht. Andererseits werden feine Partikel wie dünne Kupferkabel durch die zu geringen induzierten Wirbelströme nicht als Metalle erkannt. Daher wurden die nicht ausgetragenen Metallpartikel wiederholt aufgegeben um das Zutreffen einer oder beider Gründe zu eruieren, was in Kapitel 5.3 behandelt wird.

4.4.2 Farbsortierung (VIS)

Den dritten Sortierschritt, vglch. Abbildung 35, bildet die Abtrennung von Altglas mithilfe eines Farbsensors. Dabei wurde für Weißglas (WG), Grünglas (GG) und Braunglas (BG) ein Sortierrezept erstellt, anhand dessen die Klassifizierung der Partikel erfolgte.

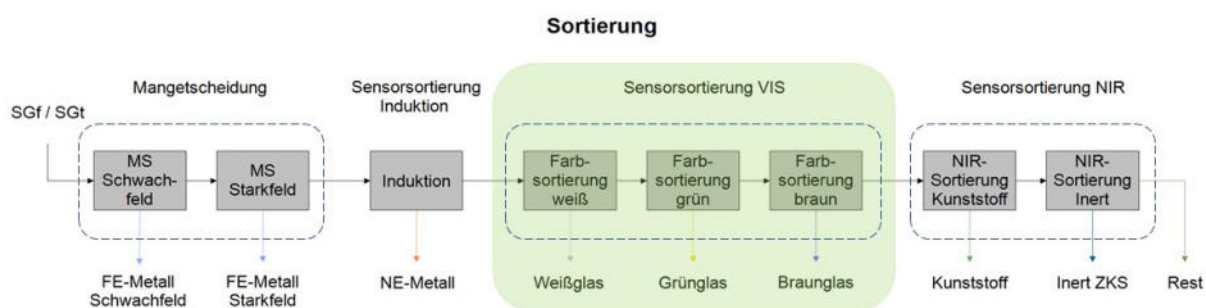


Abbildung 35: Dritter Sortierschritt – Abtrennung von Altglas (eigene Darstellung).

Das Sortierrezept wird auf Basis eines Bildes von mehreren Partikeln jeder Materialart erstellt. Die dabei gewonnenen Informationen werden anschließend im HSV-Farbraum dargestellt. Dieser dient zur Auswahl von Farben, wobei jede Farbe durch die drei Koordinaten Helligkeit (Value), Farbton (Hue) und Sättigung (Saturation) definiert ist, wie in Abbildung 36 erkennbar. Somit ergibt sich für jedes Partikel ein bestimmter Bereich im Farbraum, der dann zur Klassifikation der gesamten Materialart ausgeweitet wird. Es sollte jedoch darauf geachtet werden Überschneidungen der Bereiche der Fraktion zu vermeiden, um einzelne Partikel eindeutig einer Materialart zuordnen zu können und damit Fehlklassifikationen zu verhindern. Um die Sortierung zu verbessern oder sie erst möglich zu machen kann es notwendig sein eine Gewichtung der Farben vorzunehmen, was bei der Rezepterstellung berücksichtigt werden kann.

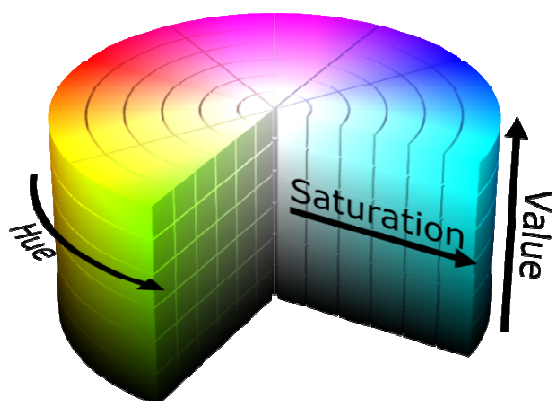


Abbildung 36: HSV-Farbraum (Wikipedia).

Die Aufgabe des Sortiergutes erfolgt wie oben beschrieben über einen Trichter und eine Vibrorinne. Das Material rutscht über die Schurre und wird von Licht im visuell sichtbaren Bereich angestrahlt, welches am Teilchen reflektiert, transmittiert und absorbiert wird. Die transmittierte Strahlung tritt an der Rückseite des Partikels aus und trifft auf einen hinter der Schurre platzierten Sensor. Bei Übereinstimmung mit den Merkmalen des hinterlegten Rezeptes wird es per Druckluftstoß ausgetragen. Dabei wurden für die Sortierung der nass- und trockenmechanisch aufbereiteten Fraktionen die Druckluft von 3,5 bar, die minimale Ausblaszeit von 20 ms, die Verzögerungszeit von 65 ms, die minimale Breite von 10 mm sowie die Ventilaktivität von 30 % gewählt. Die optimalen Durchsatzleistungen der einzelnen Sortierstufen wurden durch iteratives Herantasten ermittelt, vgl. Tabelle 5.

Tabelle 5: Erzielte Durchsätze bei Sortierung mittels Farbkamera.

Fraktion	Durchsatz [kg/h·m]	
	Nassmechanisch aufbereitete Fraktion SGf	Trockenmechanisch aufbereitete Fraktion SGt
Weißglas	40,4	52,4
Grünglas	54,2	92,1
Braunglas	68,6	96,3

Wie bei der Magnetscheidung wurden die drei Teilschritte als ein Prozess mit den Outputfraktionen Weißglas, Grünglas und Braunglas betrachtet (siehe Abbildung 35), weshalb das Ausbringen des jeweiligen Wertstoffes bezogen auf den Rest des letzten Teilschrittes bestimmt wurde. Die Produkte wurden wie bereits beschrieben untersucht und deren Reinheit berechnet.

Probleme in der Erkennung bereitete Glas mit nicht angelernter Farbe, z.B. dunkelblau, schwarz oder orange. Auch milchig-trübe Partikel oder Glasteile mit Beschichtung auf mindestens einer Seite wie beispielsweise Spiegelgläser oder Verpackungsgläser mit Bänderolenresten bzw. Aufdrucken oder sonstigen Farbschichten konnten mithilfe der Durchlichttechnik nicht erkannt werden. Auf den Anteil in der nass- und trockenmechanisch aufbereiteten Fraktion dieser Gläser wird in Kapitel 5.4 eingegangen.

4.4.3 NIR-Sortierung

Im Vierten Sortierschritt wurden mittels Nah-Infrarot-Sensor Kunststoffe sowie Inertmaterialien abgetrennt. Dazu ist ein Sortierrezept notwendig, das eigens für die Sortierung der vorliegenden Materialien erstellt wurde.

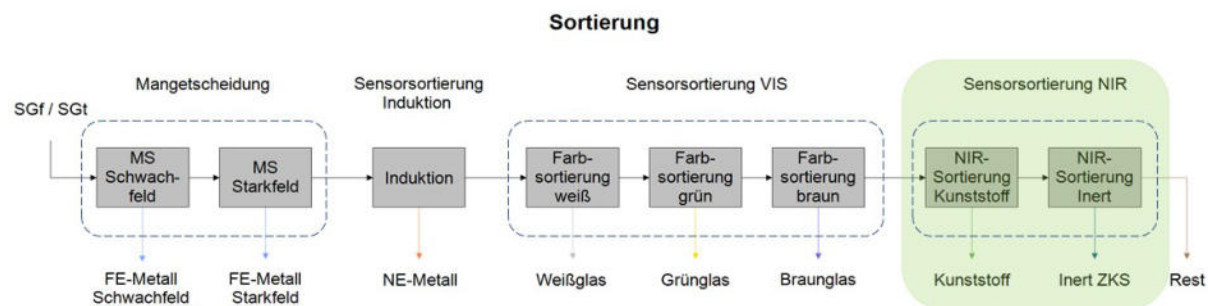


Abbildung 37: Vierter Sortierschritt - Abtrennung von Kunststoffen und Inertmaterialien (eigene Darstellung).

Grundlage eines Sortierrezeptes sind die spezifischen Spektren der einzelnen Materialien bzw. Stoffgruppen des zu sortierenden Aufgabeguts. Dazu werden zuerst Beispielobjekte entnommen, von denen anschließend Aufnahmen mit dem NIR-Sensor im Wellenlängenbereich zwischen 990 nm und 1700 nm gemacht werden, wie in Abbildung 38 am Beispiel für PVC zu sehen ist. Die Aufnahmen beinhalten ein NIR-Spektrum je Pixel, das normiert, geglättet und dessen erste Ableitung dargestellt wird und als hellgrüne Linien erkennbar sind. Das Spektrum des gerade angewählten Pixels wird dabei fett dargestellt, wodurch jedes einzelne Spektrum betrachtet werden kann. Anschließend werden mehrere solcher Pixel ausgewählt um ein gemitteltes Spektrum des Stoffes (pinke Linie) zu erhalten.



Abbildung 38: Auswahl des gemittelten NIR-Spektrums für PVC (eigene Darstellung).

Die einzelnen Objektpixel sollten dabei so ausgewählt werden, dass möglichst repräsentative Spektren hinterlegt und Ausreißer (beispielsweise durch Kanteneffekte oder stark reflektierende Flächen) vermieden werden können, um Fehlklassifikationen zu vermeiden. Das gemittelte Spektrum wird dann im Sortierrezept als Referenz hinterlegt und für die Zuordnung eines unbekanntes Partikels zu dieser Stoffgruppe verwendet. Dabei kann entweder das gesamte Spektrum oder einer oder mehrere Teilbereiche genutzt werden (siehe Abbildung 39). Vorteilhaft für eine möglichst genaue Klassifikation anhand der NIR-Spektren ist die Verwendung jener Wellenlängenbereiche, in denen sich die Intensitäten der

Referenzspektren möglichst stark unterscheiden. Jedem hinterlegten Referenzspektrum bzw. der dazugehörigen Materialklasse wird eine Falschfarbe zugeordnet um die Informationen aus dem NIR-Spektrum und der Klassifikation bildlich darzustellen. Wird ein Partikel also analysiert, werden die NIR-Spektren der einzelnen Pixel aufgenommen, mit den Referenzspektren abgeglichen und mit einer Falschfarbe versehen. Anschließend werden alle Pixel einer Materialklasse summiert und das Partikel jener Materialart zugeordnet, die den größten Anteil an klassifizierten Pixeln aufweist. Auf diese Weise fließen einzelne fehlerkannte Pixel nicht bei der Sortierentscheidung mit ein. Durch die Gewichtung einzelner Materialarten kann dieser Einfluss weiter vermindert werden. Das bedeutet, dass Materialverbunde jener Materialart zugewiesen werden, die den flächenmäßig größten Anteil einnimmt. Bei Überlagerungen oder Berührungen von Partikeln kann das jedoch zu Fehlklassifizierungen führen, da diese als ein Objekt erfasst werden.

Um die Eigenschaften der im Abfall enthaltenen Stoffe so umfassend wie möglich aufzunehmen wurden Vorversuche durchgeführt. Dabei wurden nach der Aufnahme der Sortierfraktionen der nass- und trockenmechanischen Schwerfraktion und Erstellung des Grundrezepts auf die jeweilige Materialart sortiert. Die dabei nicht erkannten Partikel wurden anschließend erneut aufgenommen und das Sortierrezept ergänzt. Dieser Vorgang wurde insgesamt zweimal wiederholt. Da die optimalen NIR-Bereiche der Sortierung von Kunststoffen und Inertmaterial nicht vollständig übereinstimmten wurden auf Basis des Grundrezeptes zwei gesonderte Rezepte für die Sortierung von Kunststoffen und Inermaterialien erstellt.

Auf diese Weise wurde das in Abbildung 39 zu sehende Rezept für die Kunststoffsortierung erstellt. Links sind die gewählten Materialklassen mit den hinterlegten Spektren gelistet, oben mittig die gewählten Wellenlängenbereiche sämtlicher Referenzspektren, unten mittig ein gewähltes Spektrum im Detail, in diesem Fall beispielhaft das von LDPE, und rechts die Aufnahmen der Beispielobjekte in den entsprechenden Falschfarben.

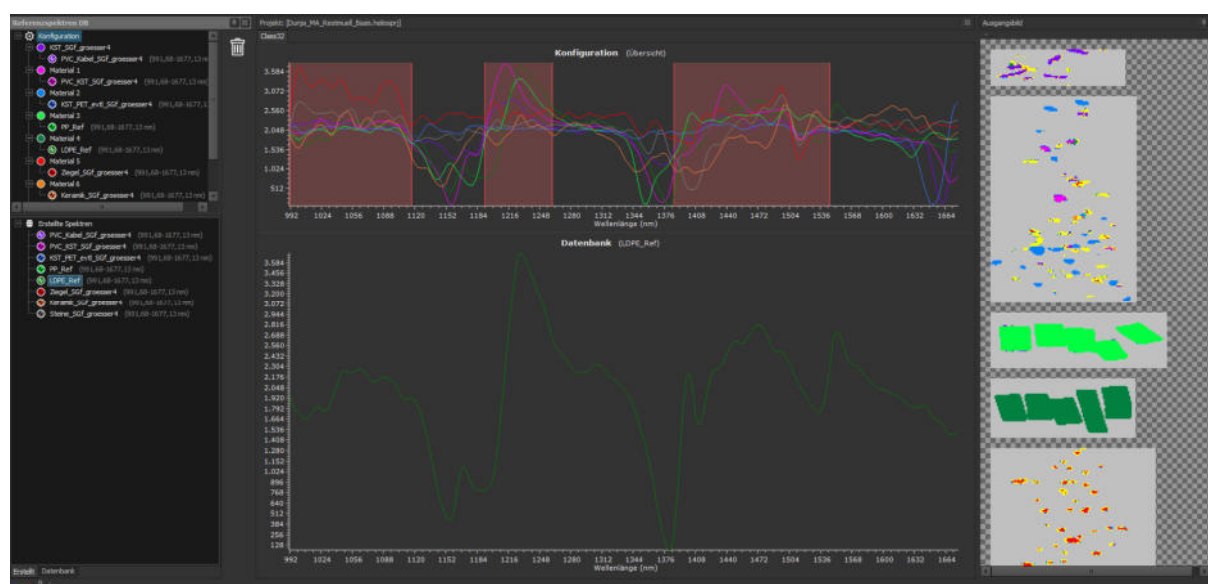


Abbildung 39: Erstelltes Klassifikationsmodell für die Sortierung von Kunststoffen (eigene Darstellung).

Probleme bei der Rezepterstellung können durch stark variierende Einzelspektren entstehen, wie in der linken Hälfte von Abbildung 40 am Beispiel der Materialklasse „Steine“ zu sehen ist. Wird hier eine große Anzahl an stark unterschiedlichen Einzelspektren zu einem Referenzspektrum zusammengefasst, kann das zu Fehlklassifizierungen führen. Der rechte Teil der Abbildung zeigt eine Aufnahme von Kunststoffen, die nicht als Wertstoff ausgetragen aber bei wiederholter Aufnahme richtig klassifiziert wurden. Der mangelnde Austrag kann entweder auf schlechte Flugeigenschaften oder fehlende Erkennung Aufgrund von Überlappungen oder schlechte Lage auf der Schurre zurückgeführt werden.

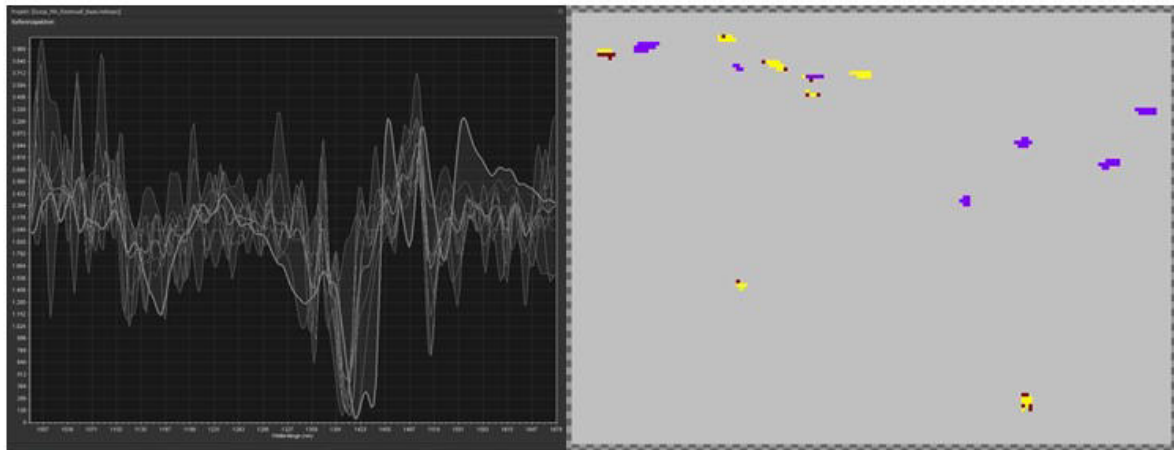


Abbildung 40: Probleme bei der Klassifizierung von Steinen durch stark schwankendes Spektrum (links) und Klassifizierung von Kunststoffen in pinker Farbe und nicht erkannte Kunststoffpartikel in gelber Farbe (rechts) (eigene Darstellung).

Bei der Durchführung der Sortierversuche wurde ebenfalls wie oben beschrieben das Aufgabegut über einen Trichter aufgegeben und mittels Vibrorinne bis zur Rutsche befördert. Dort werden die Partikel von einem NIR-Sensor des Typs EVK-Helios-G2-NIR1 der Firma EVK DI KERSCHHAGGL GMBH analysiert. Die von einer Infrarotlampe emittierte Strahlung mit einer Wellenlänge von 990 nm bis 1690 nm trifft auf die Oberfläche der Teilchen, deren Moleküle die Strahlung transmittieren, reflektieren und/oder absorbieren. Die dispers reflektierte Strahlung wird vom Detektor aufgenommen und in ein elektrisches Signal umgewandelt. Dabei beträgt die spektrale Auflösung des Liniensensors 3,18 nm mit einer Breite von 1,60 mm je analysiertem Pixel. Der Sensor arbeitet mit einer Frequenz von 476 Hz und einer Belichtungszeit von 1800 μ s. Wird die Sortierentscheidung zugunsten des Austrags gefällt, wird bei der Sortierung von Kunststoffen das Partikel mit einem Druckluftstoß von 3,7 bar für die Nassmechanisch bzw. 2,5 bar für die trockenmechanisch aufbereitete Fraktion ausgetragen. Bei der Abtrennung von Inertmaterialien wurde der Druckluftstoß auf 3,5 bar eingestellt. In beiden Fällen betrug die minimale Ausblaszeit 20 ms, die Verzögerungszeit 65 ms, die minimale Breite 10 mm sowie die Ventilaktivität 30 %. Die erzielten Durchsätze bei der Abtrennung der Kunststoffe betragen 41,6 kg/h·m für die Nassmechanisch und 43,9 kg/h·m für die trockenmechanisch aufbereitete Fraktion. Bei der Sortierung der Inertfraktionen konnten 38,0 bzw. 23,2 kg/h·m abgetrennt werden.

Im Gegensatz zum ersten und dritten Sortierschritt wurden hier die Sortierung der Kunststoff- und Inertfraktion als getrennte Prozessschritte betrachtet. Dabei wurden zuerst Kunststoffprodukte generiert und deren Reinheit sowie Ausbringen bestimmt. Anschließend wurde eine Inertfraktion erzeugt, die aus den Materialien Ziegel, Keramik und Steine besteht. Reinheit und Ausbringen der Inertfraktion wurden bezogen auf den nach der Sortierung entstandenen Rest ermittelt.

4.5 Sortieranalyse

Um die Zusammensetzung der Inputmaterialien abschätzen zu können wurden im Vorfeld der Versuche Sortieranalysen in Anlehnung an die ÖNORM S 2097 durchgeführt. Dazu wurde einerseits der zur Verfügung stehende zerkleinerte gemischte Siedlungsabfall und andererseits die durch die nass- und trockenmechanische Aufbereitung erzeugten Schwergutfractionen sortiert. Anschließend an die Sortierversuche wurden die erzeugten Produkte ebenfalls sortiert um damit die Basis für die nachfolgenden Vergleiche, die Bestimmung von Ausbringen und Reinheit sowie die erforderliche Massenbilanz zu schaffen.

Sämtliche Proben wurden vor der Sortierung mittels Handsiebung in die zwei Korngrößenklassen 0 – 4 mm und > 4 mm unterteilt. Dazu wurde ein Siebbelag mit 4 mm Maschenweite verwendet und die Fraktion > 4 mm sortiert. Die Korngröße wurde bei 4 mm gewählt da einerseits begrenzte Zeit zur Verfügung stand und andererseits der Sensorsortierer bis zu einer Korngröße von 4 mm arbeitet.

Da im Rahmen dieser Arbeit eine erste Abschätzung der Auswirkungen von nass- und trockenmechanischer Aufbereitung auf die Produktqualität untersucht werden sollten, wurde keine Forderung an statistisch-mathematisch abgesicherte Ergebnisse gestellt. Aus diesem Grund wurde je Sortierschritt ein Produkt generiert, das anschließend einer Sortieranalyse unterzogen wurde. Die Probengröße wurde demnach von der Zusammensetzung des Inputmaterials und der jeweiligen Aufbereitungsstufe bestimmt. Für die Sortierung des zerkleinerten gemischten Siedlungsabfalls sowie des nass- und trockenmechanisch aufbereiteten Materials wurde die Probe durch Vierteln verjüngt.

Die von der Norm geforderte Menge an Probe je Wägung von mindestens dem zwanzigfachen der Teilung der Waage konnte nicht eingehalten werden. Die verfügbaren Waagen der Typen „Kern 572“ und „Kern DS“ wiesen eine Teilung von 0,1 g bzw. 0,5 g auf.

Die Bestimmung der Abweichungen wurde lediglich für die Produkte und Reste durchgeführt, wobei vier der durchgeführten Sortierungen Abweichungen von über 3 % aufwiesen. Durch die beschränkte verfügbare Zeit konnten die Versuche und Sortierungen nicht wiederholt werden und wurden daher nicht wie von der Norm gefordert ausgeschlossen.

Der Sortierkatalog enthält die folgenden Fraktionen und wurden für jedes Produkt eingehalten:

- FE-Metall,

- NE-Metall,
- Weissglas,
- Gruenglas,
- Braunglas,
- Kunststoff,
- Inert (bestehend aus Ziegeln, Keramik und Steinen, welche getrennt erfasst wurden),
- Flusen bzw. Gewölle,
- Sortierrest.

Die Fraktion „Gewölle“ wurde bei der Sortierung der trockenmechanisch aufbereiteten Fraktionen angewandt da diese Agglomerationen unterschiedlicher Korngröße enthielten, die sich vom Sortierrest unterschieden. Durch Vergleich mit dem Ursprungsmaterial und jenem aus der nassmechanischen Aufbereitung ging hervor, dass sich diese Zusammenpackungen durch die Lagerung nach der Zerkleinerung formten, welche im Gegensatz zur nassmechanischen durch die trockenmechanische Aufbereitung nicht aufgelöst wurden. Die Produkte der nassmechanischen Aufbereitung wiesen hingegen einen signifikanten Anteil an Flusen auf, der wiederum für die nassmechanisch aufbereiteten Fraktionen charakteristisch war und im folgenden Kapitel mit jenem des Gewölles verglichen wird.

Die Reste jedes Aufbereitungsschrittes wurden lediglich auf die jeweiligen Wertstoffe untersucht um das Ausbringen zu bestimmen, eine vollständige Sortierung war aus zeitlichen Gründen nicht möglich.

Um ein möglichst detailliertes Bild der Zusammensetzung des Ursprungsmaterials sowie der Materialien aus der nass- und trockenmechanischen Aufbereitung zu erhalten wurden zusätzliche Sortierfraktionen zum Katalog geschaffen, die in Tabelle 6 gelistet sind. Nach einer zweiten organoleptischen Prüfung der zusätzlichen Fraktionen wurden diese den Hauptfraktionen zugeordnet.

Tabelle 6: Zusätzliche Sortierfraktionen.

Zerkleinerter gemischter Siedlungsabfall	Nassmechanisch aufbereitetes Material	Trockenmechanisch aufbereitetes Material
Holz	Glas flint	FE-schwachmagnetisch
Fasern	Glas bunt	Glas bunt
Papier	Kabel	Kabel
Kunststoffsilikondichtung	Organik	Organik
-	-	Kunststoffsilikondichtung
-	-	Kunststoff schwarz

Die Anteile der Einzelfraktionen wurden in Microsoft Excel mithilfe der in Kapitel 3.4.2 erwähnten Formel berechnet und anschließend im Programm „STAN“ zur Erstellung einer Massenbilanz verwendet.

5 Ergebnisse / Diskussion

In diesem Teil der Arbeit werden die bei den Aufbereitungs- und Sortierversuchen generierten Daten dargestellt. Zuerst wird auf die Ergebnisse der Sortieranalysen des zerkleinerten gemischten Siedlungsabfalls sowie des nass- und trockenmechanisch aufbereiteten Abfalls eingegangen. Diese Ergebnisse bilden die Basis für den anschließenden Vergleich der Produkte und die Betrachtung von Ausbringen und Reinheit.

Sämtliche Prozentangaben beziehen sich, falls nicht anders angegeben, auf die Massenanteile trockener Materialien.

Zerkleinerter gemischter Siedlungsabfall

Um vor den eigentlichen Aufbereitungs- und Sortierversuchen die Zusammensetzung des zur Verfügung stehenden gemischten Siedlungsabfalls zu erheben wurde das Material, das in Abbildung 41 zu sehen ist, einer Sortieranalyse unterzogen.



Abbildung 41: Zerkleinerter gemischter Siedlungsabfall (eigene Aufnahme).

Die Fraktion „Flusen“ macht hier 0 % aus da diese nicht vom Sortierrest unterschieden werden konnte. Deshalb wurden sämtliche nicht identifizierbaren Partikel dem Sortierrest zugewiesen. An dieser Sortierfraktion sind die Auswirkungen der Aufbereitungsmethode auf die Form des Sortierrestes ersichtlich. Im Schwergut der Nassmechanischen Aufbereitung waren neben dem Sortierrest lose verbundene Teilchen in Form von Flusen zu finden. Im Schwergut der trockenmechanischen Aufbereitung waren diese feinen Partikel in Agglomeraten zusammengepackt, die im Nachfolgenden als „Gewölle“ bezeichnet werden. Diese zwei Fraktionen wurden deshalb zusätzlich zum Sortierrest gewählt da sie anhand deren Form eindeutig unterschieden werden konnten.

Die Zusammensetzung des zerkleinerten gemischten Siedlungsabfalls ist in Abbildung 42 ersichtlich.

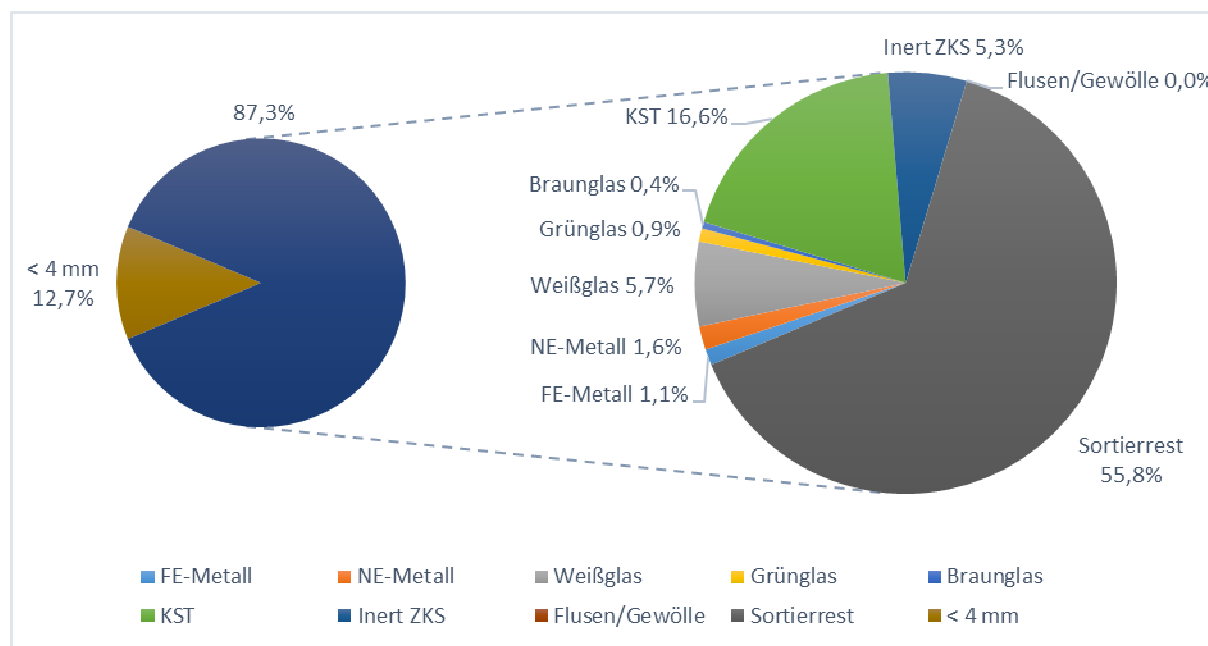


Abbildung 42: Zusammensetzung des zerkleinerten gemischten Siedlungsabfalls (eigene Darstellung).

Ein Vergleich der Daten der Sortieranalysen des steirischen bzw. österreichischen Restmülls aus den Jahren 2014 und 2004 mit den Ergebnissen der Sortieranalyse des zerkleinerten Siedlungsabfalls ist in Tabelle 7 zu sehen.

Darin ist zu erkennen, dass der Kunststoffanteil des zerkleinerten Abfalls um nur einen Prozentpunkt niedriger liegt als 2014. Die Fraktion der Inertstoffe liegt im Bereich der Daten von 2004 und 2014, während der Glasanteil im zerkleinerten gemischten Siedlungsabfall um ca. ein Drittel über dem der Analysen von 2004 und 2014. Der im zerkleinerten Abfall gefundene Metallgehalt ist gleich hoch wie jener aus dem Jahr 2004, liegt jedoch um ein Drittel unter dem Wert aus dem Jahr 2014.

Auffällig ist der im Gegensatz zu den Werten aus 2004 und 2014 stark erhöhte Anteil an Sortierresten. Durch die Manipulation bei der Zerkleinerung wurden die Materialien physikalisch verformt und aufgeschlossen, wodurch die Erkennung beeinträchtigt wurde. Die dadurch erzeugte Korngröße von < 20 mm erschwerte im Gegensatz zur Sortierung von nicht zerkleinertem Restmüll die Erkennung und Zuordnung zu den gewählten Sortierfraktionen. Dadurch konnten für die Sortierung des zerkleinerten Materials die Fraktionen Organik, Papier, Hygieneartikel, Textilien und Schuhe, Elektroaltgeräte, Holz, Leder und Gummi nicht herangezogen werden. Das lässt den Schluss zu, dass diese Fraktionen durch die Behandlung soweit zerkleinert bzw. verändert wurden, dass sie nicht mehr eindeutig erkannt werden konnten und daher zum Sortierrest gezählt wurden.

Trotz Verschiebung dieser Anteile in den Sortierrest kann festgehalten werden, dass die erhobenen Anteile des zerkleinerten Siedlungsabfalls im Rahmen der Schwankungen der Zusammensetzung von Hausmüll liegen.

Tabelle 7: Vergleich der Anteile der Sortieranalyse von Restmüll in der Steiermark (mittlere und rechte Spalte) und der Zusammensetzung des zerkleinerten gemischten Siedlungsabfalls (linke Spalte).

Fraktionen	Anteil		
	2018	2004	2014
Kunststoffe (Verpackungen und Nichtverpackungen)	17 %	10 %	18 %
Organik (inkl. vermeidbarer und nicht vermeidbarer Lebensmittelabfälle)	-	37 %	18 %
Papier, Pappe und Karton (Verpackungen und Nichtverpackungen)	-	11 %	14 %
Hygieneartikel	-	11 %	9 %
Textilien und Schuhe	-	6 %	10 %
Inertstoffe	5 %	4 %	6 %
Glas (Verpackungen und Nichtverpackungen)	7 %	5 %	5 %
Metalle (Verpackungen und Nichtverpackungen)	3 %	3 %	5 %
Sonstige Abfälle und Holz-Nichtverpackungen	-	-	6 %
Elektronikaltgeräte, Altbatterien und Problemstoffe	-	2 %	1 %
Holz, Leder, Gummi	-	1 %	-
Fein-/Grobfraktion	13 %	2 %	-
Verbundstoffe	-	8 %	-
Sortierrest	59 %	-	8 %
Summe	104 %	100 %	100 %

5.1 Nass- und trockenmechanische Vorbehandlung

Bei der nass- und trockenmechanischen Vorbehandlung wurde das Aufgabematerial in unterschiedliche Anteile an Schwer- und Leichtgut getrennt.

Der Anteil des Schwerguts aus der nassmechanischen Aufbereitung im Rahmen des „Plastic Reborn“-Projekts betrug im Schnitt 18,6 % des Aufgabeguts (Schwabl 14.09.2019).

Als Vorbereitung für die trockenmechanische Aufbereitung am Zick-Zack-Sichter wurde der zerkleinerte gemischte Siedlungsabfall per Hand bei 4 mm gesiebt. Dabei wurde ein Feinanteil von 11,6 % bestimmt. Vergleicht man diesen Wert mit dem Feinanteil, der im Zuge der Sortieranalyse erhoben wurde und bei 8,5 % liegt, so wird eine Differenz von rund 3 % sichtbar. Die Trennung am Zick-Zack-Sichter teilte den gesiebten Abfall in ein Leichtgut mit 61,6 % und ein Schwergut mit 38,4 %. Bezieht man nun den Anteil des zuvor abgeseibten Feinkorns bzw. des Grobkorns mit ein, ergibt das einen Schwergutanteil von 34,0 % bzw. 35,1 % bei der Verwendung des Werts aus der Siebung bzw. der Sortieranalyse (Mittelwert 34,6 %).

Der Anteil des Schwerguts aus der Nassmechanischen Behandlung beträgt rund die Hälfte des Schwergutanteils aus der trockenmechanischen Behandlung. Ein Grund dafür können die unterschiedlichen Verweilzeiten des Materials in den Trennaggregaten sein. Bei der Trennung in Setzmaschinen ist die Verweilzeit größer, wodurch höhere Trennschärfen erzielt werden können. Ein weiterer Grund kann die Verwendung von Wasser als Trennmedium sein. Die Verbindung von zusammenhaftenden Partikeln wird durch das Wasser gelöst, wodurch eine ebenfalls höhere Trennschärfe erreicht werden kann. Dadurch werden auch größere Agglomerate, wie die beschriebenen Gewölle, in der Nassmechanischen Aufbereitung aufgelöst. In der trockenmechanischen Behandlung werden diese Teile nicht verändert und ins Schwergut ausgetragen. Würde der Anteil der Gewölle im Schwergut der trockenmechanischen Aufbereitung aufgelöst und ins Leichtgut ausgetragen werden, würde der Anteil des Schwergutes auf rund 25 % sinken. Somit besteht ein direkter Zusammenhang des Anteils an generiertem Schwergut und dessen Zusammensetzung.

In Abbildung 43 sind die Schwergutfraktionen der Nass- und trockenmechanischen Aufbereitung zu sehen.



Abbildung 43: Schwergut der Nassmechanischen (links) und der trockenmechanischen Aufbereitung (rechts) (eigene Darstellung).

Abbildung 44 und Abbildung 45 veranschaulichen die Unterschiede in der Zusammensetzung der beiden Schwerfraktionen, die im Rahmen der Sortieranalysen untersucht wurden.

Ein großer Unterschied ist am Kunststoffanteil erkennbar, der im trockenmechanisch aufbereiteten Material einen Anteil von 20,4 % einnimmt und damit fast dreizehnmal höher ist als im Nassmechanisch aufbereiteten Material, in dem der Kunststoffanteil 1,6 % beträgt. In Abbildung 43 ist zu erkennen, dass die Aufbereitung am Zick-Zack-Sichter das Aufgabegut von flächigen Partikeln wie Kunststofffolien befreit. Schwere Partikel mit annähernd würfelförmiger Kornform werden aber nicht ins Leichtgut ausgetragen, woran der Einfluss der Kornform bei der Windsichtung sichtbar wird.

Die Anreicherung von Metallen im Schwergut der Nassmechanischen Aufbereitung ist mit einem Anteil von 32,9 % mehr als dreimal so hoch wie im trockenmechanisch aufbereiteten Siedlungsabfall mit 9,6 %. Ähnlich verhalten sich die NE-Metalle, die im Nassmechanisch

aufbereiteten Material mit 9,5 % ebenfalls fast dreimal so stark angereichert werden wie im trockenmechanisch aufbereiteten Material. Da im Zick-Zack-Sichter auch schwere Kunststoff- und Gewölle ins Schwergut gelangen ist nicht anzunehmen, dass Metalle ins Leichtgut ausgetragen werden. Daher kann die Ursache am hohen Anteil der übrigen Fraktionen im Schwergut der trockenmechanischen Aufbereitung liegen, wodurch der Anteil der Metalle vermindert wird.

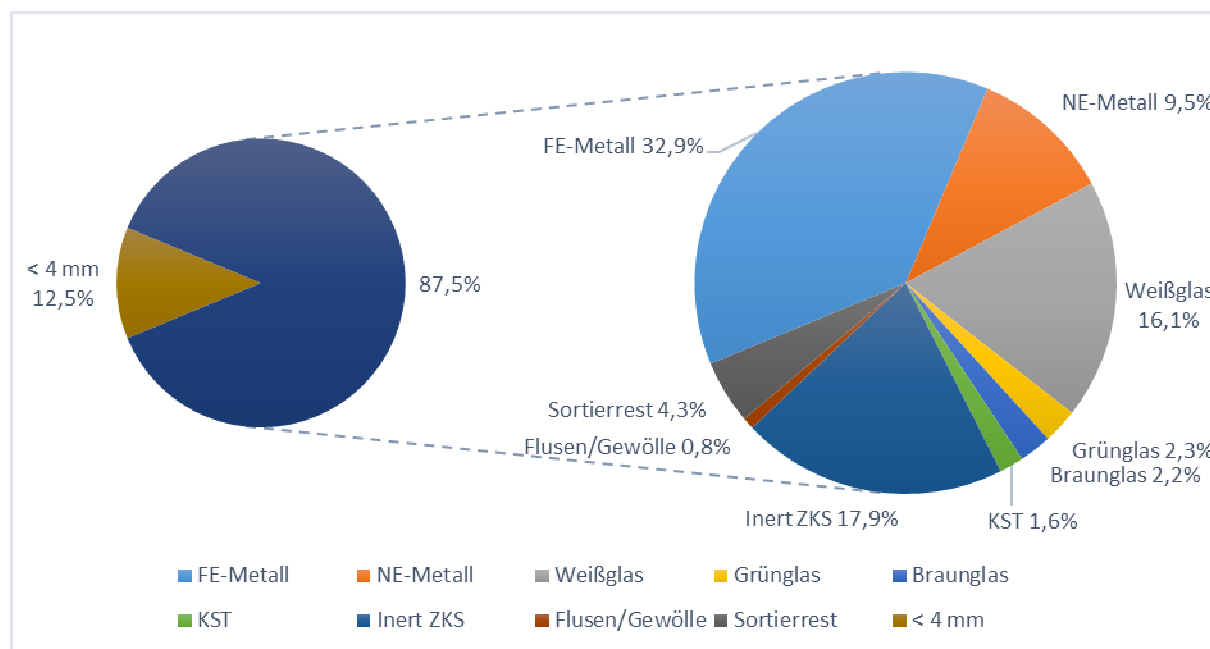


Abbildung 44: Zusammensetzung des Schwerguts aus der Nassmechanischen Aufbereitung (eigene Darstellung).

Der unterschiedliche Einfluss der zwei Aufbereitungsmethoden auf die Zusammensetzung wird am stärksten am Anteil der Störstoffe sichtbar. Flusen, die für die trockenmechanisch aufbereitete Fraktion als Agglomerate vorlagen und 28,5 % ausmachen, sind fast beim 35-Fachen des Anteils der Flusen am Nassmechanisch aufbereiteten Siedlungsabfall mit weniger als 1 %. Gemeinsam mit dem Sortierrest ergibt das einen Störstoffanteil von 5,1 % im Nassmechanisch bzw. 36,2 % bzw. trockenmechanisch aufbereiteten Abfall. Grund dafür können wie beschrieben die unterschiedlichen Trennmedien sein (hab das eh oben schon geschrieben. Soll das dann nochmal da her?). Agglomerate werden dabei vom Wasser der Nassmechanischen Aufbereitung aufgelöst und durch die längere Verweilzeit kann eine höhere Trennschärfe erzielt werden.

Allgemein kann festgehalten werden, dass die Wertstoffanteile im Nassmechanisch aufbereiteten Abfall im Schnitt doppelt so hoch sind wie die im trockenmechanisch aufbereiteten Abfall. Das kann darauf zurückgeführt werden, dass der erhöhte Störstoffanteil in der trockenmechanischen Fraktion die Verhältnisse der anderen Sortierfraktionen verschiebt. Der Anteil des Sortierrests beträgt 4,3 % am Nassmechanisch und 7,7 % am trockenmechanisch generierten Schwergut.

Der Anteil der Partikel < 4 mm am Inputmaterial und am Nassmechanisch erzeugten Schwergut sind annähernd ident. Zur trockenmechanischen Erzeugung des Schwergutes am

Zick-Zack-Sichter wurde das Inputmaterial vom Feinanteil befreit. Der Anteil der Partikel < 4 mm liegt wie zu erwarten war unter den Feinanteilen im Inputmaterial und nassmechanisch erzeugten Schwergut. Trotz Siebung beträgt er mit 8,5 % aber fast 70 % der Werte der übrigen Feinanteile. Ein möglicher Grund kann die Ablösung feiner Partikel von Agglomeraten bei mechanischer Beanspruchung wie der Handsortierung und der Siebung sein.

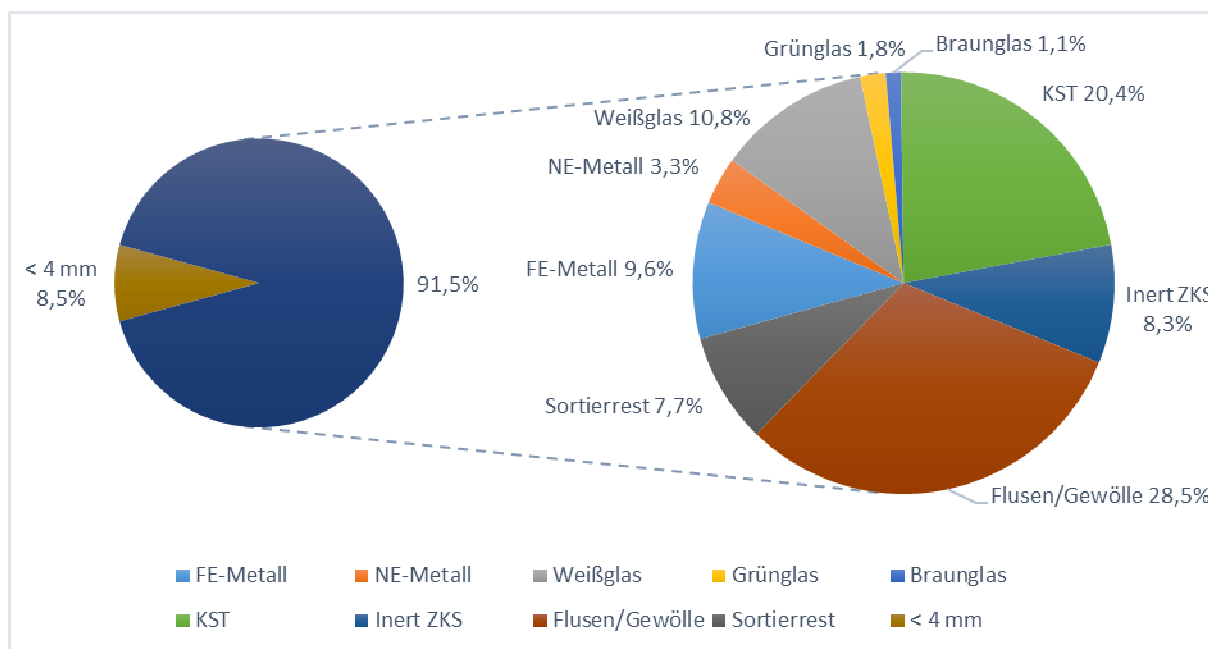


Abbildung 45: Zusammensetzung des Schwerguts aus der trockenmechanischen Aufbereitung (eigene Darstellung).

Die Anreicherung der Wertstoffe durch die nass- und trockenmechanische Aufbereitung in den Schwergutfractionen ist in Tabelle 8 zusammengefasst.

Daraus wird ersichtlich, dass Sortierreste durch beide Aufbereitungslinien zum überwiegenden Teil ins Leichtgut getragen werden. Das führt zu einer Abreicherung von Störstoffen, was sich positiv für nachfolgende Sortierprozesse auswirkt.

In Hinblick auf die Metall-Fractionen gelingt mithilfe der nassmechanischen Aufbereitung eine höhere Anreicherung. Kunststoffe werden hingegen vermehrt ins Schwergut der trockenmechanischen Aufbereitung ausgetragen.

Tabelle 8: Vergleich der Zusammensetzung von zerkleinertem, nassmechanisch und trockenmechanisch aufbereitetem gemischtem Siedlungsabfall.

Fractionen	Zerkleinerter gemischter Siedlungsabfall	Schwergut der nassmechanischen Aufbereitung	Schwergut der trockenmechanischen Aufbereitung
FE-Metall	1,1 %	32,9 %	9,6 %
NE-Metall	1,6 %	9,5 %	3,3 %
Weißglas	5,7 %	16,1 %	10,8 %
Grünglas	0,9 %	2,3 %	1,8 %

Fraktionen	Zerkleinerter gemischter Siedlungsabfall	Schwergut der Nassmechanischen Aufbereitung	Schwergut der trockenmechanischen Aufbereitung
Braunglas	0,4 %	2,2 %	1,1 %
Kunststoffe	16,6 %	1,6 %	20,4 %
Inert ZKS	5,3 %	17,9 %	8,3 %
Flusen	0,0 %	0,8 %	28,5 %
Sortierrest	55,8 %	4,3 %	7,7 %
< 4 mm	12,7 %	12,5 %	8,5 %

5.2 FE-Metalle

In der Magnetscheidung, die den ersten Sortierschritt darstellt, wurden zwei Produkte generiert. Dabei erfolgte die Abtrennung von Eisenmetallen aus den Schwergutfraktionen in zwei Stufen um ein stark und ein schwach magnetisierbares Produkt zu erhalten.

Die Ergebnisse der Sortieranalysen dieser insgesamt vier Produkte werden nun einander gegenübergestellt.

5.2.1 Stark magnetisierbare Eisenprodukte

Bei den Sortierversuchen am Schwachfeldscheider wurden aus den Schwergütern der Nass- und trockenmechanischen Aufbereitung Eisen-Metalle abgetrennt. Dabei handelt es sich um stark magnetisierbare Metalle, die bereits bei geringen Flussdichten des eingesetzten Magnetscheiders ins Eisen-Produkt ausgetragen werden. In Abbildung 46 sind die zwei erzeugten Fraktionen zu sehen, die bereits mittels Handmagnet auf Störstoffe untersucht wurden. Abbildung 47 sind die Hauptbestandteile der beiden Fraktionen zu entnehmen, in Abbildung 71 im Anhang befindet sich die detaillierte Zusammensetzung.



Abbildung 46: Stark magnetisierbare Eisenprodukte des Nass- (links) und trockenmechanisch (rechts) aufbereiteten Siedlungsabfall (eigene Aufnahme).

Wie in Tabelle 9 zu sehen ist wurden bei der Magnetscheidung der beiden Fraktionen sehr hohe Reinheiten erzielt. Im trockenmechanischen Produkt ist neben den Metallen selbst nur die Feinfraktion < 4 mm zu finden. Im Produkt des Nassmechanischen Schwergutes konnten

zwar Partikel mehrerer Sortierkategorien gefunden werden, diese machen insgesamt aber einen geringeren Anteil aus als die Fremdstoffe im Produkt des trockenmechanisch aufbereiteten Materials. Die beiden Fraktionen unterscheiden sich in ihrer Zusammensetzung nur gering voneinander. Die Reinheiten beider Produkte liegen über 90 %. Bei der Sortierung des nassmechanisch generierten Schwerguts konnte ein höheres Wertstoffausbringen erzielt werden, das um ca. 18 % über dem der Magnetscheidung des trockenmechanisch erzeugten Schwerguts liegt.

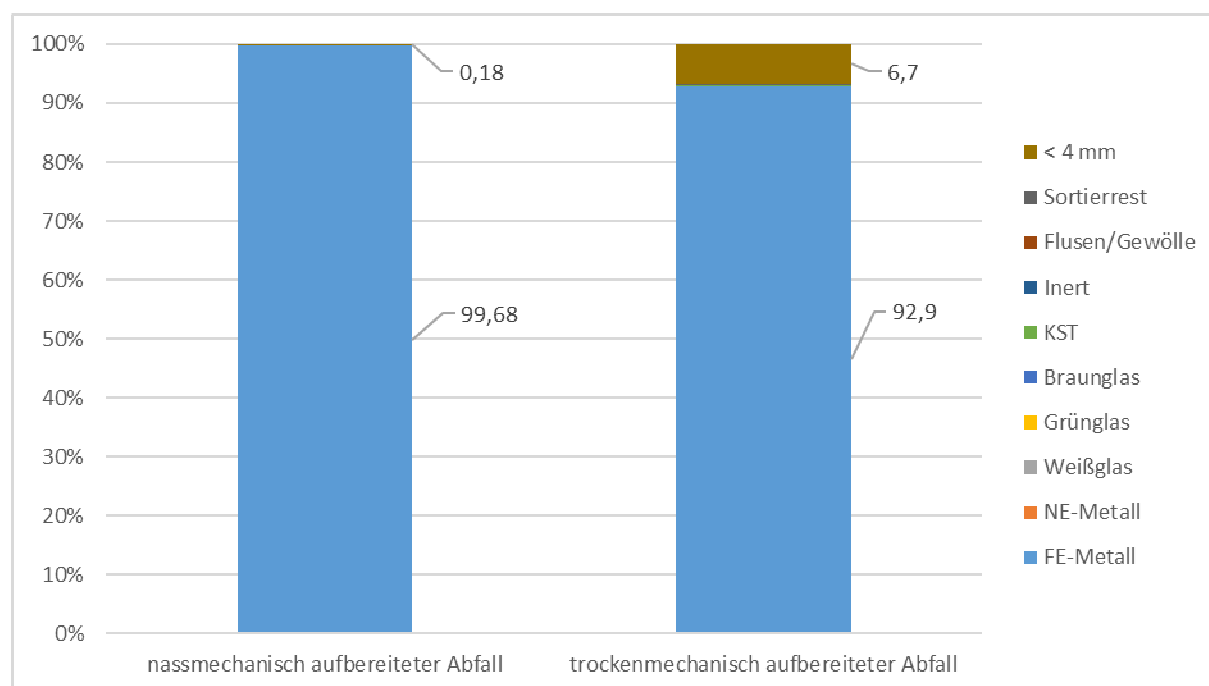


Abbildung 47: Hauptbestandteile der stark magnetisierbaren Eisenprodukte (eigene Darstellung).

Vergleicht man die Zusammensetzung der erzeugten Eisen-Fraktionen mit den in Kapitel 3.4.3 gestellten Anforderungen, so kann das Produkt aus der nassmechanischen Aufbereitung die Vorgaben bezüglich des Feinanteils einhalten, das Produkt aus der trockenmechanischen Aufbereitung nicht. Der Anteil an magnetisierbaren Eisenmetallteilen ist zwar in beiden Produkten groß genug, hier gilt jedoch abzuklären welchen Anteil das metallische Eisen einnimmt. Untersuchungen zur Schüttdichte wurden im Rahmen dieser Arbeit nicht durchgeführt, die Korngröße kann durch den ersten Schritt der Zerkleinerung bereits eingehalten werden. Die Anteile der Fremdstoffe liegen in beiden Produkten unter 1 %, wodurch keine Stoffe, die den Einschmelzvorgang im Recycling beeinträchtigen, enthalten sind.

Beide Produkte können hohe Reinheiten aufweisen, wodurch der Unterschied durch nass- und trockenmechanische Aufbereitung bei der Abtrennung von Eisen-Metallen gering ist. Das Ausbringen ist bei der Sortierung des nassmechanisch erzeugten Schwerguts höher, weshalb ein leichter Vorteil der nassmechanischen gegenüber der trockenmechanischen Aufbereitung zu erkennen ist.

Tabelle 9: Vergleich der Ausbringen und Reinheiten der stark magnetisierbaren Eisenprodukte.

Stark magnetisierbares Eisenprodukt	Schwergut der nassmechanischen Aufbereitung	Schwergut der trockenmechanischen Aufbereitung
Reinheit	99,7 %	92,9 %
Ausbringen	89,8 %	72,3 %

5.2.2 Schwach magnetisierbare Eisenprodukte

Im zweiten Schritt der Magnetscheidung wurden schwach magnetisierbare Eisenprodukte generiert, die in Abbildung 48 zu sehen sind. Dabei handelt es sich um die zwei unsortierten Produkte und Reste der Magnetscheidung.



Abbildung 48: Schwach magnetisierbare Eisen-Produkte des nass- (links oben) und trockenmechanisch (links unten) aufbereiteten Siedlungsabfalls mit den Resten der Magnetscheidung (rechts) (eigene Aufnahme).

Das Produkt aus dem Schwergut der nassmechanischen Aufbereitung ist überwiegend durch Inertmaterialien, der Feinfraktion < 4 mm und Nicht-Eisen-Metallen verunreinigt, vgl. Abbildung 49. Diese Fraktionen machen im trockenmechanisch aufbereiteten Abfall einen geringeren Anteil aus und bestehen primär aus Gewölle. Die detaillierte Zusammensetzung der Produkte ist Abbildung 72 im Anhang zu entnehmen.

Die Reinheit liegt in beiden Fällen bei rund 64 %. Die in Kapitel 3.4.3 gestellten Anforderungen an Eisenschrotte können von beiden schwach magnetisierbaren Produkten nicht eingehalten werden. Vor allem der Anteil der Feinfraktion, aber auch der Anteil an NE-Metallen, Inert- und Reststoffen ist in beiden Produkten zu hoch. Dadurch ergibt sich ein den Qualitätsanforderungen nach zu geringer Eisenanteil. Die Ursache für die stärkere Verunreinigung der Schwachfeldscheiderprodukte verglichen mit den Starkfeldscheiderprodukten kann nicht eindeutig geklärt werden. Die verwendeten

Magnetscheider sind beide als Trommelablenkscheider gebaut und unterscheiden sich neben der Stärke der eingesetzten Magnete ausschließlich in der Dimensionierung von Trommel und Aufgaberinne. Eine erhöhte Verunreinigung der Metallprodukte kann durch den Einsatz des in der Abfallaufbereitung etablierten Überbandmagnetscheiders verhindert werden. Durch die aushebende Arbeitsweise werden weniger Fremdstoffe ins Produkt überführt.

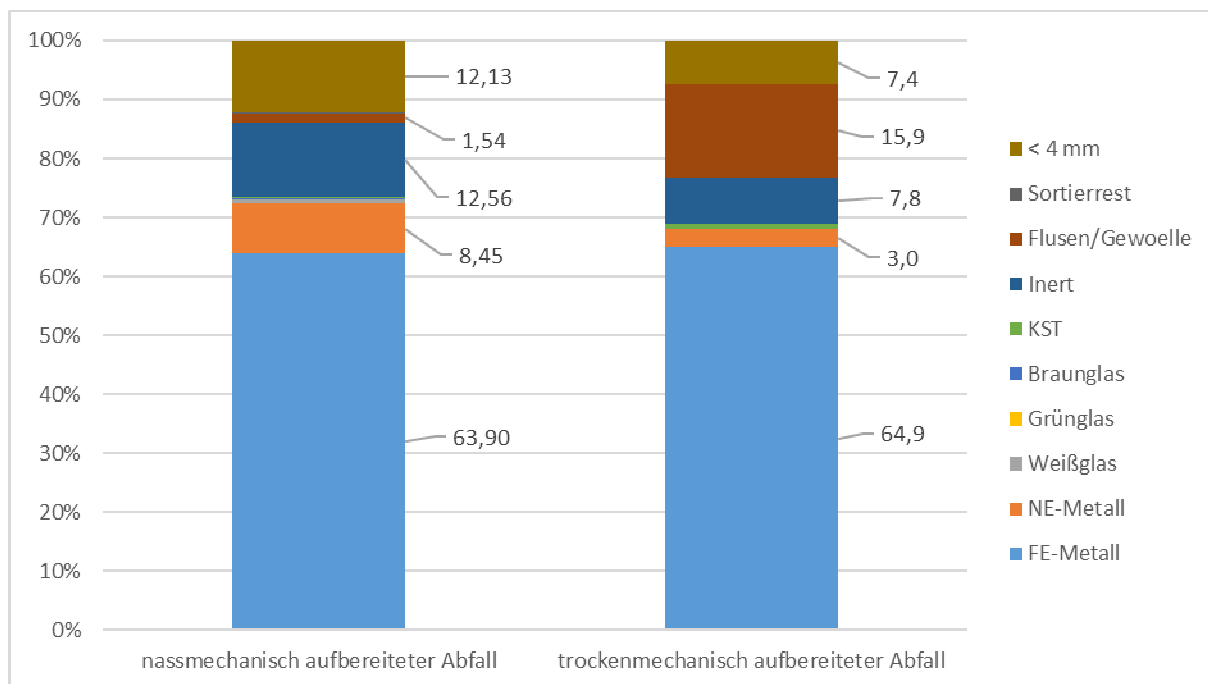


Abbildung 49: Hauptbestandteile der schwach magnetisierbaren Eisenprodukte (eigene Darstellung).

Das Ausbringen der Eisenmetalle beträgt für beide untersuchten Fraktionen fast 100 %. Die vollständige Abtrennung der Eisenmetalle führt einerseits zu geringen Wertstoffverlusten. Andererseits wird dadurch auch der Einsatz des Materials in einem Wirbelstromscheider möglich, da keine Eisenteile den Prozess gefährden. Der Einsatz von nass- und trockenmechanischer Aufbereitung führt zu keinen wesentlichen Unterschieden in Ausbringen und Reinheit der erzeugten Fraktionen. Dadurch ist anzunehmen, dass die Zusammensetzung des Aufgabegutes bei der Magnetscheidung eine untergeordnete Rolle spielt.

Tabelle 10: Vergleich der Ausbringen und Reinheiten der schwach magnetisierbaren Eisenmetall-Produkte.

Schwach magnetisierbares Eisenprodukt	Schwergut der nassmechanischen Aufbereitung	Schwergut der trockenmechanischen Aufbereitung
Reinheit	63,9 %	64,9 %
Ausbringen	100,0 %	99,1 %

Eisen-Metalle werden durch die zweistufige Magnetscheidung vollständig aus den Schwergutfraktionen abgetrennt, vgl. Abbildung 81 im Anhang. Der Unterschied zwischen nass- und trockenmechanisch aufbereiteter Linie besteht darin, dass bei der Sortierung des trockenmechanisch generierten Schwerguts mehr Metallpartikel in die zweite Stufe der Magnetscheidung gelangen. Ein Grund dafür kann der niedrigere Anteil an Metallen im Schwergut der trockenmechanischen Vorbehandlung sein. Dieser beträgt nur 9,6 % im trockenmechanisch erzeugten Schwergut im Gegensatz zu 32,9 % im nassmechanischen Schwergut. Dadurch gelangen beim Trennprozess mehr Partikel auf der Magnettrommel, die den Austrag der Metallteilchen verhindern können. Daher ist die nassmechanische Vorbehandlung durch die höhere Anreicherung der Metalle im Schwergut vorteilhafter. Ein weiterer Grund können Metallpartikel sein, die in Agglomeraten eingebettet sind und durch die trockenmechanische Vorbereitung nicht aufgelöst werden. Auch wenn die Magnetisierbarkeit der Metalle nicht verändert wird, kann der Schwerpunkt des Partikels soweit vom Magnet entfernt liegen, dass die anziehende Kraft nicht mehr ausreicht um es an der Trommel zu halten. Weiters wurde die Magnetisierbarkeit der erzeugten Fraktionen nicht erhoben. Daher kann auch nicht ausgeschlossen werden, dass die Metallteile im trockenmechanisch hergestellten Schwergut schwerer zu magnetisieren sind als jene im nassmechanisch erzeugten Schwergut und daher ein größerer Anteil im Starkfeldscheider ausgetragen wird.

5.3 NE-Metalle

Im zweiten Sortierschritt wurden Nicht-Eisen-Metalle bzw. nicht magnetisierbare Metalle aus den Schwergutfraktionen der nass- und trockenmechanischen Aufbereitung abgetrennt. Dabei wurden die in Abbildung 50 ersichtlichen Fraktionen generiert. Darin ist bereits zu erkennen, dass die NE-Produkte erhebliche Verunreinigungen aufweisen, vgl. Abbildung 51. Die Zusammensetzung der Fraktionen ist in Abbildung 73 im Anhang detailliert aufgeschlüsselt. Auch die Restprodukte besitzen Anteile an NE-Metallen, was durch die errechneten Ausbringen belegt wird.



Abbildung 50: NE-Metallprodukte (links) der Nass- (oben) und trockenmechanisch (unten) erzeugten Schwergutfraktion mit den Resten (rechts) (eigene Aufnahme).

Die Sortieranalysen der beiden NE-Produkte bestätigen die optisch erkennbaren Verunreinigungen. Während das Produkt des Nassmechanisch aufbereiteten Abfalls vor allem Anteile an Partikeln < 4 mm, Inertstoffen und Weißglas aufweist, beinhaltet das Produkt des trockenmechanisch erzeugten Schwerguts einen erheblichen Anteil an Gewölle-Teilchen. Sie machen mit 23,4 % fast ein Viertel des Produktes aus. Die Struktur dieser stark verwachsenen Partikel lässt vermuten, dass innerhalb dieser Agglomerate NE-Metall-Teile zu finden sind. Beim Zerkleinern einiger Partikel konnten jedoch keine Teile nachgewiesen werden, die der für die Erkennung notwendigen Mindestgröße entsprachen. Der Grund für den erhöhten Anteil an Weißglas in beiden Produkten ist nicht bekannt. Der geringere Austrag von Kunststoffen in das Produkt des Nassmechanischen Schwerguts liegt möglicherweise an der stärkeren Abreicherung durch den Einsatz einer Setzmaschine. Dadurch ist die Menge an Störstoffen geringer. Gleiches gilt für den Anteil von Gewölle und Sortierrest, die im trockenmechanisch generierten Schwergut einen höheren Anteil annehmen als im Nassmechanisch erzeugten.

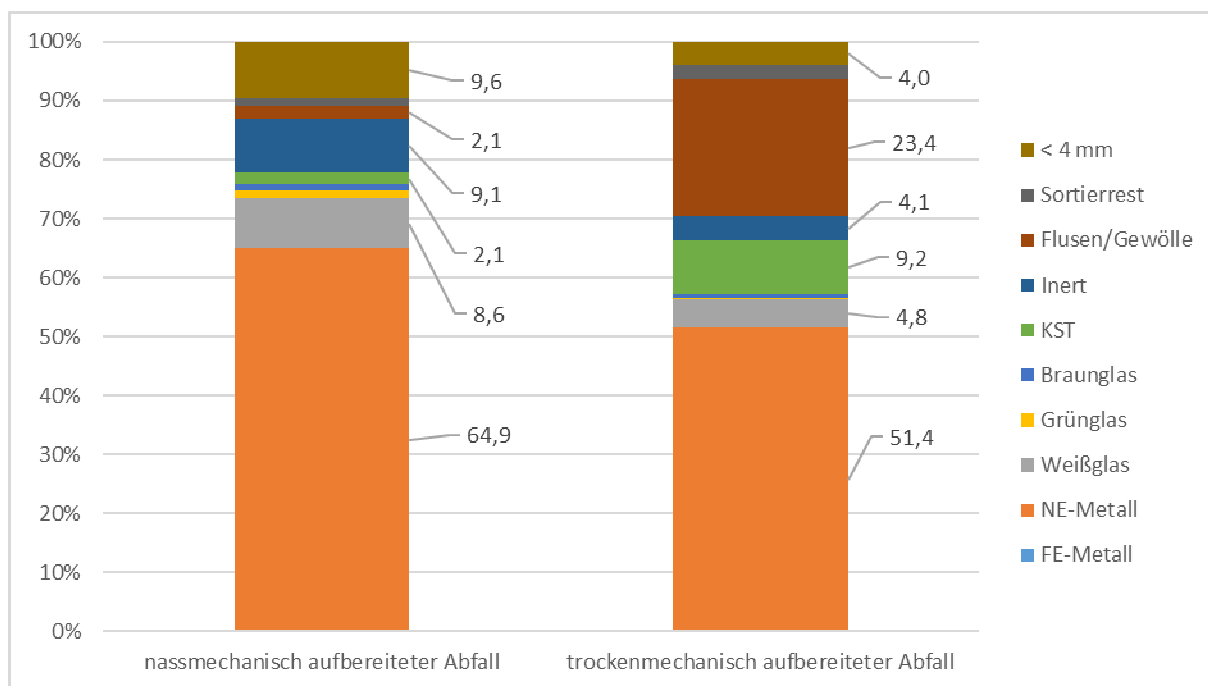


Abbildung 51: Hauptbestandteile der NE-Produkte (eigene Darstellung).

Daraus ergeben sich nur geringe Reinheiten, die gemeinsam mit den erzielten Ausbringen Tabelle 11 zu entnehmen sind. Das Wertstoffausbringen ist ebenfalls gering, was durch die teils „ungünstige“ Geometrie der Teile bedingt ist. Bei der Sortieranalyse des Restes gefundene NE-Metallteile waren meist zu schwer oder zu stark verformt um vom Druckluftstoß ausgetragen werden zu können, wie an den Beispielen in Abbildung 52 zu sehen ist. Soll ein Partikel ausgetragen werden, werden jene Düsen für den Austrag aktiviert, die der zugehörigen Spule entsprechen. Diese werden nach der voreingestellten Verzögerungszeit für die ebenfalls vorab eingestellte minimale Ausblaszeit aktiviert und transportieren das Partikel über den Trennscheitel. Hat das Partikel aber eine kreisring- oder L-förmige Geometrie trifft der Druckluftstoß ins Leere und das Partikel wird nicht ausgetragen. Weiters bieten Partikel mit runder Kornform wenig Angriffsfläche, werden daher leicht umströmt und können durch den Druckluftstoß nicht ausgetragen werden.

Da sich unter den Metallteilen im Rest aber auch Partikel befanden, deren Kornform keinen Einfluss auf den Austrag haben, wurden mit diesen Teilen weitere Versuche zur Erkennung durchgeführt.

Tabelle 11: Vergleich der Ausbringen und Reinheiten der NE-Produkte.

NE-Produkte	Schwergut der nassmechanischen Aufbereitung	Schwergut der trockenmechanischen Aufbereitung
Reinheit	64,9 %	51,4 %
Ausbringen	84,1 %	71,7 %
Ausbringen Stufe 2	89,0 %	80,6 %
Ausbringen Stufe 3	90,8 %	81,6 %



Abbildung 52: Beispiele nicht ausgetragener NE-Metallteile (eigene Aufnahme).

Die nicht ausgetragenen NE-Partikel wurden erneut mit denselben Prozessparametern am Sensorsortierer aufgegeben. Dabei konnten einige Partikel ausgetragen werden, die in der ersten Sortierstufe nicht ins Produkt ausgetragen wurden. Die durch die zweite und dritte Sortierstufe zusätzlich ausgetragenen Partikel ermöglichen die in Tabelle 11 gezeigten Ausbringen. Zu erkennen ist dabei, dass eine zusätzliche zweite Stufe bei der Sortierung des nassmechanisch aufbereiteten Materials nur knapp 5 % mehr Ausbringen ermöglicht, während sie bei der Behandlung des trockenmechanisch aufbereiteten Materials rund 9 % mehr Wertstoffausbringen generiert. In der dritten Stufe ändert sich dieser Effekt und das Ausbringen beim trockenmechanisch aufbereiteten Schwergut kann um nur 1 % weiter gesteigert werden, wohingegen rund 3 % mehr Ausbringen bei der Sortierung des nassmechanisch aufbereiteten Materials möglich sind. Werden drei Sortierstufen in der NE-Metallabtrennung mittels Induktionssensor verwendet können die Ausbringen um 6,7 % bzw. 10,2 % bei der Sortierung von nass- bzw. trockenmechanisch erzeugtem Schwergut gesteigert werden.

Trotz zusätzlicher Sortierstufen bleibt der Unterschied der Ausbringen immer noch bei über 9 %. Zusammenfassend kann gesagt werden, dass die Abtrennung der NE-Metalle aus dem nassmechanisch aufbereiteten Schwergut bessere Resultate hinsichtlich Ausbringen und Reinheit ermöglichte als die Sortierung des trockenmechanisch aufbereiteten Abfalls.

Der Grund dafür kann an der höheren Anreicherung der NE-Metalle durch die nassmechanische Aufbereitung liegen. Im untersuchten Restmüll betrug der Anteil der NE-Metalle nur rund 1,6 %. Während durch die trockenmechanische Vorbehandlung der Metallanteil im Aufgabegut auf 3,3 % gesteigert wurde, konnte durch die nassmechanische Vorbehandlung eine Erhöhung auf 9,5 % erzielt werden. Die fast dreifache Anreicherung im Aufgabegut durch die nassmechanische Aufbereitung ermöglicht deshalb höhere Ausbringen und Reinheiten der erzeugten Fraktionen. Ein weiterer Vorteil der nassmechanischen Vorbehandlung ist das Lösen von Agglomeraten. Dadurch können vermehrt Partikel soweit nach Materialart vereinzelt werden, dass der Schwellwert für den Austrag überschritten wird.

In Abbildung 82 im Anhang ist die Stoffflussanalyse der NE-Metalle dargestellt. Anzumerken ist, dass diese Bilanz ausschließlich die erste Stufe der Metallabtrennung ohne die zusätzlichen Untersuchungen berücksichtigt. Zu erkennen ist, dass in beiden Aufbereitungslinien mehr NE-Metallpartikel in das Eisenprodukt der Starkfeldscheidung als in das der Schwachfeldscheidung ausgetragen wurden. Das könnte daran liegen, dass es sich bei diesen Teilchen um Legierungen handelt, die mithilfe des Starkfeldscheiders aber nicht mithilfe des Schwachfeldscheiders und des Handmagneten magnetisierbar waren. In die Kunststofffraktionen der nass- und trockenmechanischen Linie wurde anteilmäßig annähernd gleich viel ausgetragen. Grund dafür können mit Kunststoff ummantelte Metalle, beispielsweise Kabel, sein, die durch die Untersuchung der Oberfläche mittels NIR-Sensors als Kunststoff identifiziert wurden. Auffällig ist, dass ein mehr als doppelt so hoher Anteil an NE-Metallpartikeln in die Inertfraktion der trockenmechanischen Linie als in die Inertfraktion der Nassmechanischen Linie ausgetragen wurde. Vermutlich erzeugt die oberflächliche Verschmutzung der Metall-Partikel ein Spektrum, das eine Identifikation als Inertmaterial zur Folge hat. Der Einsatz der Nassmechanischen Vorbehandlung kann daher aufgrund seiner Waschwirkung den Verlust wertvoller NE-Metalle in die Inertfraktion vermindern. In beiden Aufbereitungslinien gelangt ein erheblicher Anteil der NE-Metalle in den Rest der Sortierung. In der Linie der Nassmechanischen Aufbereitung handelt es sich dabei um 10,36 %, in der Linie der trockenmechanischen Vorbehandlung um 14,24 %. Das lässt darauf schließen, dass die Metallpartikel aus der trockenmechanischen Aufbereitung durch Verschmutzung und verminderte Auflösung von Agglomeraten schlechter erkannt und ausgetragen werden können. Von den in die Sortierung gelangten NE-Metallen können 81,50 % in die NE-Metallfraktion der Nassmechanischen und 74,19 % in die NE-Metallfraktion der trockenmechanischen Linie ausgetragen werden. Daran wird deutlich, dass durch die Nassmechanische Vorbehandlung der Verlust von Metallen durch Fehlausträge geringer ist.

In diesem Sortierschritt wurden Produkte erzeugt, die Mischungen unterschiedlicher Metalle darstellen. Im Recycling werden jedoch sortenreine Fraktionen eingesetzt, wodurch die generierten Produkte nicht direkt mit den Spezifikationen der Sortenlisten vergleichbar sind. Um wiedereinsatzfähige Materialien zu erzeugen sind deshalb weitere Aufbereitungsschritte notwendig, die durch die in Kapitel 3.4.3 erwähnten Gründe wirtschaftlich durchführbar sind. Ein Sensorgestützter Sortierstand bietet dabei die Möglichkeit die Informationen des Induktions-, des NIR- sowie des Farbsystems zu kombinieren. Dabei können unterschiedliche Metalle anhand ihrer Farbe unterschieden und Materialverbunde wie Kabel gezielt abgetrennt werden. Aus diesem Grund ist die Abtrennung von NE-Metallen von maßgeblicher Bedeutung für die Wirtschaftlichkeit bei der Aufbereitung von Hausmüll.

5.4 Altglas

Mithilfe der Farbsortierung am sensorgestützten Sortierstand wurden drei Altglasprodukte erzeugt, deren Zusammensetzung, Ausbringen und Reinheit im folgenden Kapitel behandelt werden.

5.4.1 Weißglas

Im ersten Teilschritt der Farbsortierung wurde jeweils ein Weißglasprodukt aus den Schwergütern der Nass- und trockenmechanischen Aufbereitung erzeugt, vgl. Abbildung 53. Die Hauptbestandteile der Fraktionen sind Abbildung 54 zu entnehmen, Abbildung 74 im Anhang enthält die detaillierte Zusammensetzung.



Abbildung 53: Weißglasprodukte des Nass- (links) und trockenmechanisch (rechts) aufbereiteten Siedlungsabfalls (eigene Aufnahme).

An den Zusammensetzungen der Weißglasprodukte der beiden Schwergüter können die Fraktion < 4 mm und der Sortierrest als größte Verschmutzungsanteile identifiziert werden. Der Austrag von Sortierresten in die Glasprodukte lässt vermuten, dass es sich dabei um zufällige Fehlwürfe durch Überlappungen handelt, da bei den gefundenen Sortierresten keine transmittierte Strahlung und daher keine Erkennung als Weißglas auftreten dürfte. Der Anteil an Feingut lässt sich möglicherweise an der Ablösung der Feinpartikel von der Oberfläche durch mechanische Beanspruchung erklären. Im Produkt des trockenmechanisch erzeugten Schwerguts sind zusätzlich vermehrt Kunststoffe und Gewölle zu finden, die die Reinheit beeinträchtigen. Der Grund für die Differenz zum Anteil in der Weißglasfraktion aus dem Nassmechanisch generierten Schwergut liegt vermutlich am höheren Anteil an Kunststoffen im Schwergut der trockenmechanischen Vorbehandlung wodurch auch mehr Partikel falsch ausgetragen werden können, insbesondere transparente Teilchen. Zusammenfassend kann gesagt werden, dass die Weißglaspartikel durch die Waschwirkung der Nassmechanischen Aufbereitung weniger stark verschmutzt sind und die Reinheit der Fraktion höher ist.

Sie liegt gemeinsam mit dem Ausbringen der Fraktion aus dem Nassmechanisch erzeugten Schwergut über den Werten für die aus dem trockenmechanisch generierten Schwergut. Dabei beträgt der Unterschied der Reinheiten 5,6 % und der der Ausbringen 11,9 %, vgl. Tabelle 12. Der Grund für diese differierenden Ausbringen wurde mithilfe von zusätzlichen Versuchen zur Erkennung der nicht ausgetragenen Partikel erhoben.

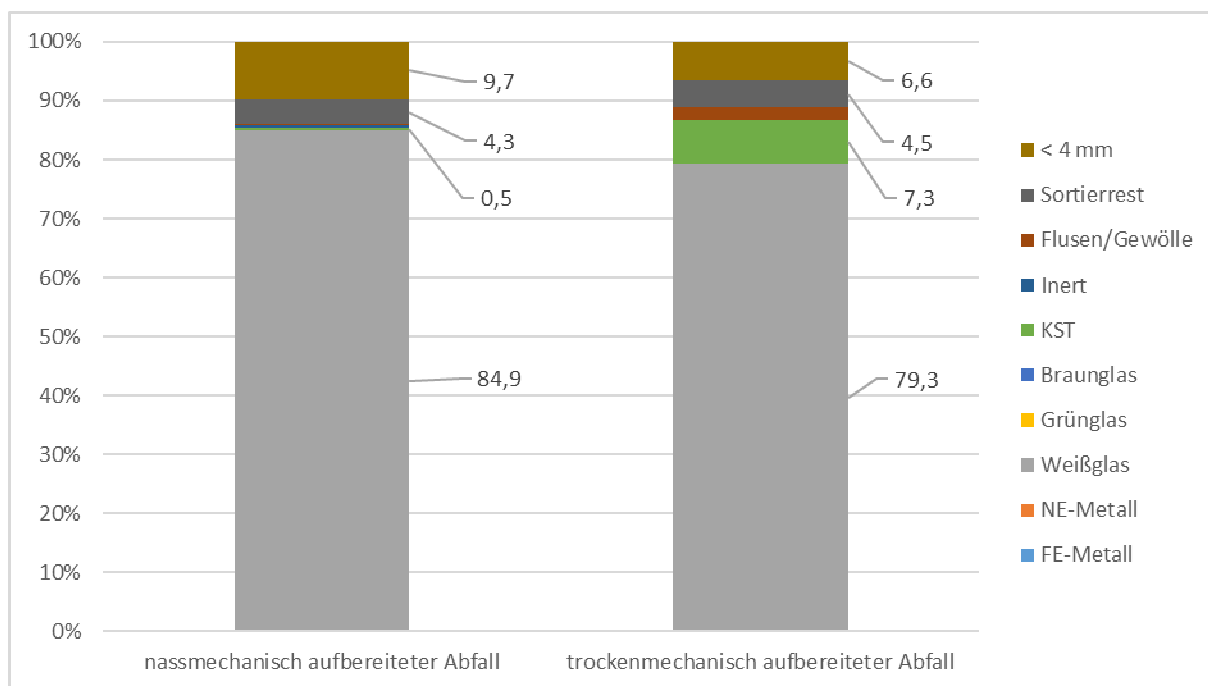


Abbildung 54: Hauptbestandteile der Weißglasprodukte (eigene Darstellung).

Tabelle 12: Vergleich der Ausbringen und Reinheiten der Weißglasprodukte.

Weißglasprodukte	Schwergut der nassmechanischen Aufbereitung	Schwergut der trockenmechanischen Aufbereitung
Reinheit	84,9 %	79,3 %
Ausbringen	95,2 %	83,3 %
Ausbringen Stufe 2	99,5 %	90,1 %
Ausbringen Stufe 3	99,6 %	90,9 %

Dazu wurden die im Rest der Braunglassortierung befindlichen Weißglasteilchen erneut der Sortierung unterzogen und die Klassifizierung sowie das Ausblasverhalten aufgenommen. Dabei konnte ein Teil der Partikel erkannt und ausgetragen werden, wodurch die Ausbringen auf die in Tabelle 12 gezeigten Werte um mehr als 3 % erhöht werden konnten. Die dritte Sortierstufe ermöglichte für beide Schwergüter nur eine geringere Steigerung des Ausbringens von jeweils weniger als 1 %. Die durch die zweite und dritte Stufe ausgetragenen Partikel wiesen keine signifikanten Unterschiede zu jenen im Produkt auf. Daraus kann geschlossen werden, dass diese durch Überlappungen und schlechte Vereinzelung nicht erkannt und ausgeblasen werden konnten. Jene Partikel, die auch in der dritten Sortierstufe nicht erkannt wurden, sind in Abbildung 55 zu sehen. Auffällig ist die orangefarbene Tönung der Partikel des nassmechanisch aufbereiteten Materials (links unten). Diese wurden nicht als Weißglas klassifiziert da dieser Farbbereich nicht in das Sortierrezept aufgenommen wurde. Im nassmechanisch vorbehandelten Material waren Partikel enthalten, die durch ihre kompakte Form und Korngröße durch den Druckluftstoß nur knapp über das Scheitelblech transportiert wurden (Bild links oben). Solche Teilchen

befinden sich bereits in einem kritischen Bereich der Eigenschaften für eine erfolgreiche Sortierung. Bei der Sortierung des trockenmechanisch behandelten Materials konnten die nicht ausgetragenen Partikel in zwei Gruppen unterteilt werden, einerseits „sauberes“ (Bild rechts oben) und andererseits „verschmutztes“ Weißglas (rechts unten). Anzunehmen ist, dass die fest haftende Schmutzschicht die Erkennung im Durchlichtverfahren behindert da die zu geringe transmittierte bzw. detektierte Strahlung mit dem verwendeten Sortierrezept keine Klassifikation als Weißglas ermöglicht. Die verschmutzten Partikel machten mit 69,9 % den Großteil des in der ersten Stufe nicht erkannten Weißglases aus. Dadurch lässt sich das im Vergleich zum nassmechanischen Material, das keine verschmutzten Partikel enthält, geringere Ausbringen beim trockenmechanischen Schwergut erklären.

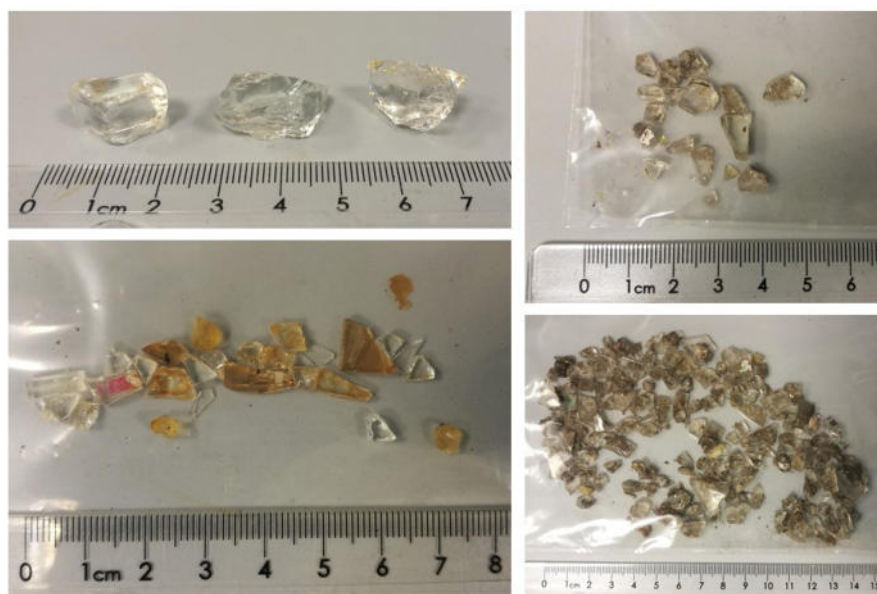


Abbildung 55: Nicht erkannte Weißglaspartikel (nassmechanisch - links; trockenmechanisch - rechts) (eigene Aufnahme).

Grundsätzlich könnte die Erkennung durch eine Erweiterung des Sortierrezeptes verbessert werden, indem iterativ nicht erkannte Teilchen aufgenommen und deren Farbbereich dem Rezept hinzugefügt würden. Dabei ist abzuklären, ob die orange Färbung der Partikel aus der nassmechanischen Aufbereitung durch Rost verursacht oder das Glas durch Additive gefärbt wurde. Daran ist anschließend zu eruieren, ob Glas dieser Farbe den Anforderungen der Recyclingbetriebe genügt und somit in dieser Fraktion angereichert werden soll. Zusätzlich wäre eine Abschätzung der Fehlausträge durch die Anpassung des Farbraumes notwendig.

Die Anteile an Fehlfarben in den erzeugten Weißglasprodukten liegen unterhalb der in Kapitel 3.4.3 beschriebenen Grenzen. Die Bestimmung des Fremdglasanteils konnte nicht durchgeführt werden, weil die Glaspartikel im Rahmen der Sortieranalysen durch die vorangegangene Zerkleinerung nicht mehr als unerwünschte Glassorte gleicher Farbe identifiziert werden konnten. Der Mindestgehalt an Weißglas von 97 % kann nicht erreicht

werden, da die Produkte zu große Rest- und Feianteile enthalten. Das Produkt aus der trockenmechanischen Aufbereitung enthält zudem auch Kunststoffe, die die Reinheit weiter senken. Dadurch überschreiten beide Produkte den maximalen Fremdstoffanteil. Der Gehalt an nicht erwünschten Stoffen kann durch weitere Reinigungsmaßnahmen wie Siebung und Negativsortierung reduziert werden. Das Produkt aus dem Schwergut der nassmechanischen Vorbehandlung benötigt im Gegensatz zum Produkt aus dem Schwergut der trockenmechanischen Vorbehandlung keine Abtrennung der Kunststoffe und somit einen Aufbereitungsschritt weniger. Daher ist auch die Reinigung des nassmechanischen Produkts mit geringeren Kosten verbunden.

Im Anhang ist in Abbildung 83 die Stoffflussanalyse für Weißglas dargestellt. Der Anteil an Weißglas, der in die NE-Metallfraktion transportiert wurde ist in der nassmechanischen Linie mit 5,67 % fast um das Dreifache höher als in der trockenmechanischen Linie. Eine Möglichkeit besteht darin, dass die Partikel auf der Schurre schlecht vereinzelt und durch Überlappungen zufällig ausgetragen wurden. Das kann anhand der gefahrenen Durchsätze nicht auf eine Überbelastung des Sortierers zurückgeführt werden. Weiters wurde bei der Sortierung des nassmechanisch erzeugten Schwerguts mit 53 kg/h·m ein geringerer Durchsatz als bei der Sortierung des trockenmechanisch generierten Schwerguts von 68 kg/h·m gefahren, wodurch der umgekehrte Effekt zu erwarten wäre. Der Grund für die abweichenden Anteile der in die NE-Fractionen ausgetragenen Weißglaspartikel kann daher nicht eindeutig geklärt werden. Anteil Weißglas, der in die Kunststofffraktion aus dem trockenmechanisch erzeugten Schwergut ausgetragen wurde beträgt ca. das Eineinhalbfache vom Anteil an Weißglas, der in das Kunststoffprodukt des nassmechanisch generierten Schwerguts transportiert wurde. Möglicherweise erzeugten die Anhaftungen an den Glaspartikeln Spektren im NIR-Bereich, durch die die Partikel anhand des verwendeten Rezeptes als Kunststoffe identifiziert wurden. Dazu können die ausgetragenen Partikel erneut im NIR-Bereich aufgenommen werden um zu klären, ob es sich um eine fehlerhafte Erkennung oder den zufälligen Austrag durch Überlappung auf der Schurre handelte. Diese Untersuchungen wurden im Rahmen dieser Arbeit nicht durchgeführt. Der Austrag von Weißglas in die Inertfraktion der trockenmechanischen Linie ist mit einem Anteil von 6,14 % fast sechsmal so hoch wie in der nassmechanischen Aufbereitungslinie. Das bestärkt die Vermutung, dass verschmutzte Oberflächen den Austrag von Partikeln in die Inertfraktion bei der NIR-Sortierung verstärken. Der Anteil an Weißglas, der in die Weißglasfraktion der nassmechanischen Linie ausgetragen wurde, beträgt 88,36 % und der für die trockenmechanische Linie 77,91 %. Weiters beträgt der Anteil des Weißglases im Rest der nassmechanischen Linie 4,40 % und in der trockenmechanischen Linie 12,51 %. Daran ist zu erkennen, dass aus dem nassmechanisch erzeugten Schwergut einerseits mehr Weißglas in die Zielfraktion gelangt und andererseits die Verluste an Wertstoff im Rest geringer sind als bei der Sortierung des trockenmechanisch hergestellten Schwerguts. Das lässt die Vermutung zu, dass die Waschwirkung der nassmechanischen Vorbehandlung einen wesentlichen positiven Einfluss auf die Farbsortierung von Weißglas hat.

5.4.2 Grünglas

Im zweiten Teilschritt der Farbsortierung wurden zwei Grünglasprodukte erzeugt, vgl. Abbildung 56. Abbildung 57 zeigt die Hauptbestandteile der Fraktionen, die detaillierten Unterschiede in der Zusammensetzung sind Abbildung 75 im Anhang zu entnehmen.

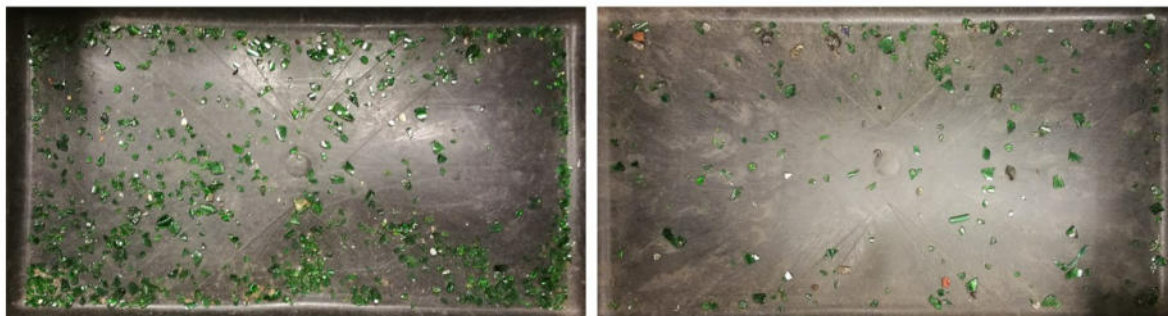


Abbildung 56: Grünglasprodukte der nass- (links) und trockenmechanisch (rechts) generierten Schwergutfraktion.

Die beiden Produkte enthalten ca. denselben Anteil an Grünglas und beinhalten beide die Feinfraktion als größte Verunreinigung. Auffällig ist der höhere Feinanteil in der Fraktion des nassmechanisch aufbereiteten Schwerguts als der in der Fraktion des trockenmechanisch aufbereiteten Schwerguts. Ein Grund dafür liegt im niedrigeren Gehalt an Feinpartikeln im trockenmechanisch vorbehandelten Material durch die Siebung vor der Windsichtung. Die Ursache für die doppelt so hohe Anreicherung in der Glasfraktion der nassmechanischen Linie konnte nicht eruiert werden. Die Grünglasfraktion aus dem Schwergut der trockenmechanischen Aufbereitung beinhaltet zusätzlich noch Kunststoffe, die in der Fraktion aus dem Schwergut der nassmechanischen Vorbehandlung nicht gefunden wurden. Dieser höhere Anteil liegt einerseits daran, dass im Schwergut aus der trockenmechanischen Vorbehandlung ein höherer Anteil an Kunststoffen zu finden ist als im Schwergut der nassmechanischen Aufbereitung. Andererseits werden beim Durchlichtverfahren auch transparente Kunststoffe mit gleicher Farbe ausgetragen.

Somit ist auch die Reinheit der Grünglasfraktion aus dem nassmechanisch erzeugten Schwergut höher als die Reinheit der Fraktion aus dem trockenmechanisch generierten Schwergut, vgl. Tabelle 13. Die Differenz der Reinheiten beträgt aber nur 2,2 %, wodurch sie als annähernd gleich bewertet werden können. Die Ausbringen in den beiden Sortierlinien weisen hingegen einen größeren Unterschied von 16,5 % aus. Um die Ursachen für den verminderten Austrag beim trockenmechanischen Material festzustellen wurden die im Rest nach der Braunglassortierung gefundenen Grünglaspartikel erneut einer Sortierung unterzogen.

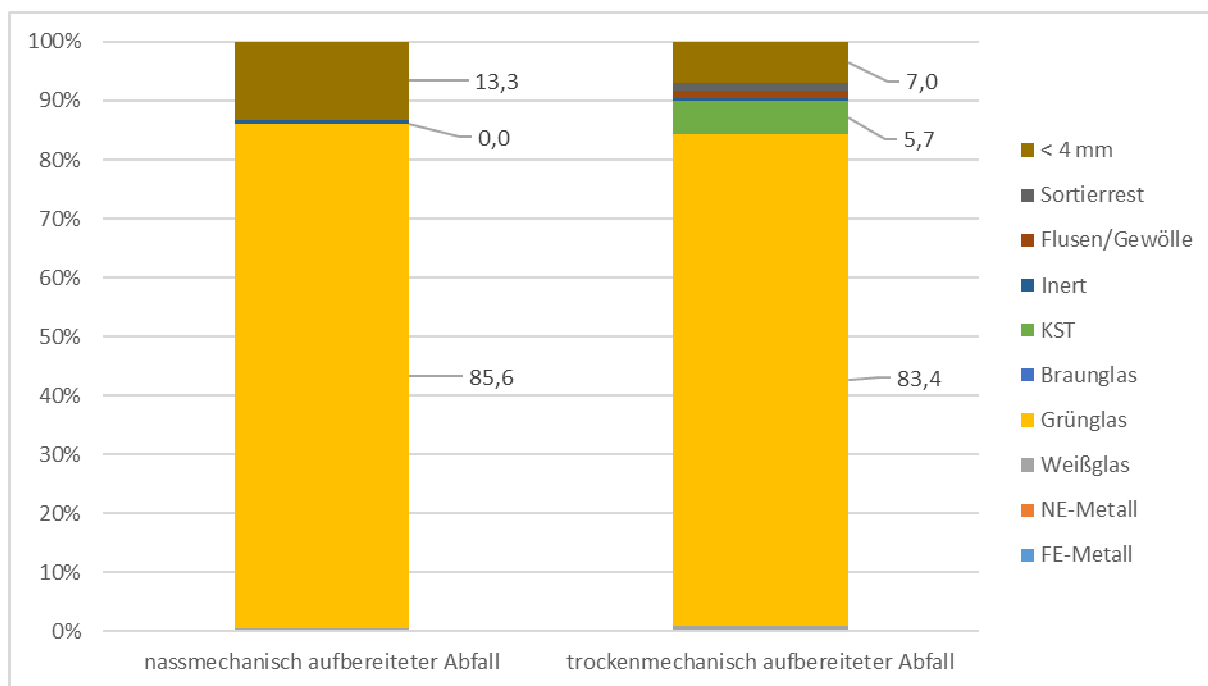


Abbildung 57: Hauptbestandteile der Grünglasprodukte (eigene Darstellung).

Tabelle 13: Vergleich der Ausbringen und Reinheiten der Grünglasprodukte.

Grünglasprodukte	Schwergut der nassmechanischen Aufbereitung	Schwergut der trockenmechanischen Aufbereitung
Reinheit	85,6 %	83,4 %
Ausbringen	66,6 %	50,1 %
Ausbringen Stufe 2	70,3 %	58,0 %
Ausbringen Stufe 3	71,4 %	58,0 %

Diese nicht erkannten Partikel sind in Abbildung 58 abgebildet. Jene der nassmechanischen Fraktion sind links zu sehen und haben größtenteils im Vergleich zum Produkt eine dunklere und bräunlichere Färbung (links). Dieser Farbraum fehlt im Sortierrezept und kann auch hier erweitert werden, wobei darauf zu achten ist eine klare Abgrenzung zum Farbraum der Braunglassortierung zu schaffen um eine sinnvolle Trennung zu ermöglichen. Die hellen nicht erkannten Partikel enthalten möglicherweise einen stärkeren Blauanteil, der mithilfe der Software untersucht und anschließend ebenfalls dem Rezept hinzugefügt werden könnte. Die Behinderung der Erkennung durch Schmutzfilme auf den Partikeln des trockenmechanisch aufbereiteten Abfalls halten sich beim Grünglas im Gegensatz zum Weißglas in Grenzen. Der Anteil der „verschmutzten“ nicht erkannten Grünglaspartikel (rechts) entsprach dem der „sauberen“ (mittig).



Abbildung 58: Nicht erkannte Grünglaspartikel des Nass- (links) und trockenmechanisch aufbereiteten Materials (sauber - mittig; verschmutzt - rechts) (eigene Darstellung).

Die Ausbringen der ersten Sortierstufe der beiden Linien liegen unter den Ausbringen der Weißglassortierung. Auch mithilfe der Versuche der zweiten und dritten Stufe konnte keine wesentliche Erhöhung der Ausbringen erreicht werden. Die Untersuchung der Partikel lässt den Schluss zu, dass das verwendete Sortierrezept nicht den gesamten Farbraum der im gemischten Siedlungsabfall vorkommenden Grüngläser abdeckt. Das könnte durch ausführliche Erstellung des Sortierrezepts und die iterative Anpassung an das Inputmaterial verbessert werden.

Wie bereits erwähnt werden von den Glashütten Anforderungen bezüglich des Fremdstoff- und Fehlfarbanteils gestellt, die in Kapitel 3.4.3 behandelt wurden. Sowohl der minimale Grünfarbanteil als auch die maximalen Fehlfarbanteile können von beiden Produkten eingehalten werden. Allerdings werden die geforderten Reinheiten nicht erreicht da mehr als 1 % Fremdstoffe in den Produkten gefunden wurden und der Anteil des Grünlasses unter 97 % liegt. Zusätzlich konnte wie bereits erläutert nicht abgeklärt werden ob der Fremdglasanteil von 2 % eingehalten wird. In beiden Fällen ist die Feinfraktion stark erhöht, die aber beispielsweise durch eine nachgeschaltete Siebung entfernt werden könnte. Dadurch würde der Anteil der Fremdstoffe im Grünglasprodukt der Nassmechanischen Aufbereitungslinie auf rund 1 % sinken. Das Produkt der trockenmechanischen Aufbereitungslinie ist zusätzlich von Kunststoff- und Restpartikeln zu befreien um die gestellten Spezifikationen zu erfüllen. Dadurch ist wie beim Weißglas zu erkennen, dass die Nassmechanische Aufbereitung bessere Produktqualitäten ermöglicht.

In Abbildung 84 im Anhang ist die Stoffflussanalyse für Grünglas dargestellt. Dabei ist auffällig, dass Grünglas in denselben Produkten wie Weißglas angereichert wurde. In der Nassmechanischen Linie wurde ein größerer Anteil an Grünglas in die Fraktion der NE-Metalle ausgetragen als in der trockenmechanischen Aufbereitungslinie. Dieser Effekt war bei der Sortierung von Weißglas ebenfalls zu beobachten und anhand der unterschiedlichen Durchsätze und daraus resultierende Überlappungen von Partikeln auf der Schurre nicht erklärbar. Ein mit 28,44 % erheblicher Anteil an Grünglas in der trockenmechanischen Linie wurde in die Kunststofffraktion ausgetragen. Hier lässt sich vermuten, dass die oberflächliche Schmutzschicht eine Klassifizierung als Kunststoff verursacht, ähnlich wie bei Weißglas. Im Gegensatz zu Weißglas ist der in die Inertfraktion fehlausgetragene Anteil an Grünglas in der

nassmechanischen Aufbereitungslinie größer. Die Vermutung, dass Verschmutzung Probleme bei der Erkennung in der NIR-Sortierung verursacht, kann aber bei der Betrachtung sämtlicher Fehlausträge von Grünglas bestärkt werden. In der nassmechanischen Aufbereitungslinie gelangte mit 58,88 % ein signifikant höherer Anteil an verfügbarem Grünglas in die Grünglasfraktion als in der trockenmechanischen Aufbereitungslinie mit 43,14 %. Die nassmechanische Vorbehandlung ermöglicht somit ein höheres Wertstoffausbringen. Annähernd idente Anteile von ca. 27 % des Grünglases wurden in die Restfraktion transportiert. Das dadurch nicht genutzte Potential kann durch eine Nachsortierung oder mehrstufige Ausführung der Sortierschritte genutzt werden. Laut Stoffflussanalyse geht in der nassmechanischen Aufbereitungslinie insgesamt weniger Grünglas in andere Fraktionen verloren und ist bei Vergleich mit der trockenmechanischen Vorbehandlung dieser vorzuziehen.

5.4.3 Braunglas

In Abbildung 59 sind die Produkte der dritten Teilstufe der Farbsortierung zu sehen. Darin ist bereits optisch zu erkennen, dass das Produkt der nassmechanischen Aufbereitung wesentlich reiner ist als das der trockenmechanischen Aufbereitung. In Abbildung 60 sind die Hauptbestandteile, in Abbildung 76 im Anhang sind die Zusammensetzungen der Fraktionen im Detail festgehalten ist.



Abbildung 59: Braunglasprodukt des nass- (links) und trockenmechanisch (rechts) aufbereiteten gemischten Siedlungsabfalls.

Das Braunglasprodukt der nassmechanisch generierten Schwergutfraktion weist verglichen mit der Braunglasfraktion aus dem trockenmechanisch erzeugten Schwergut einen höheren Wertstoffanteil und somit eine höhere Reinheit auf, vgl. Tabelle 14. Die Reinheit des trockenmechanischen Produkts ist um über 15 % geringer und beinhaltet Störstoffanteile an Kunststoffen, Gewölle und Grünglas. Bei Betrachtung der Gewöllefraktion liegt die Vermutung nahe, dass die Anreicherung dieses Materials im trockenmechanisch erzeugten Schwergut einen Einfluss auf den Anteil in der Braunglasfraktion hat, wie schon bei vorherigen Produkten beobachtet werden konnte. Der erhöhte Kunststoffanteil liegt

möglicherweise ebenfalls am größeren Anteil von Kunststoffen im trockenmechanisch generierten Schwergut und ähnlichen Farbinformationen von transparenten gleichfarbigen Partikeln bei der Sortierung im visuellen Bereich.

Das Ausbringen an Braunglas ist ebenfalls sehr unterschiedlich ausgeprägt, wobei die Differenz mit knapp 25 % beträchtlich ist.

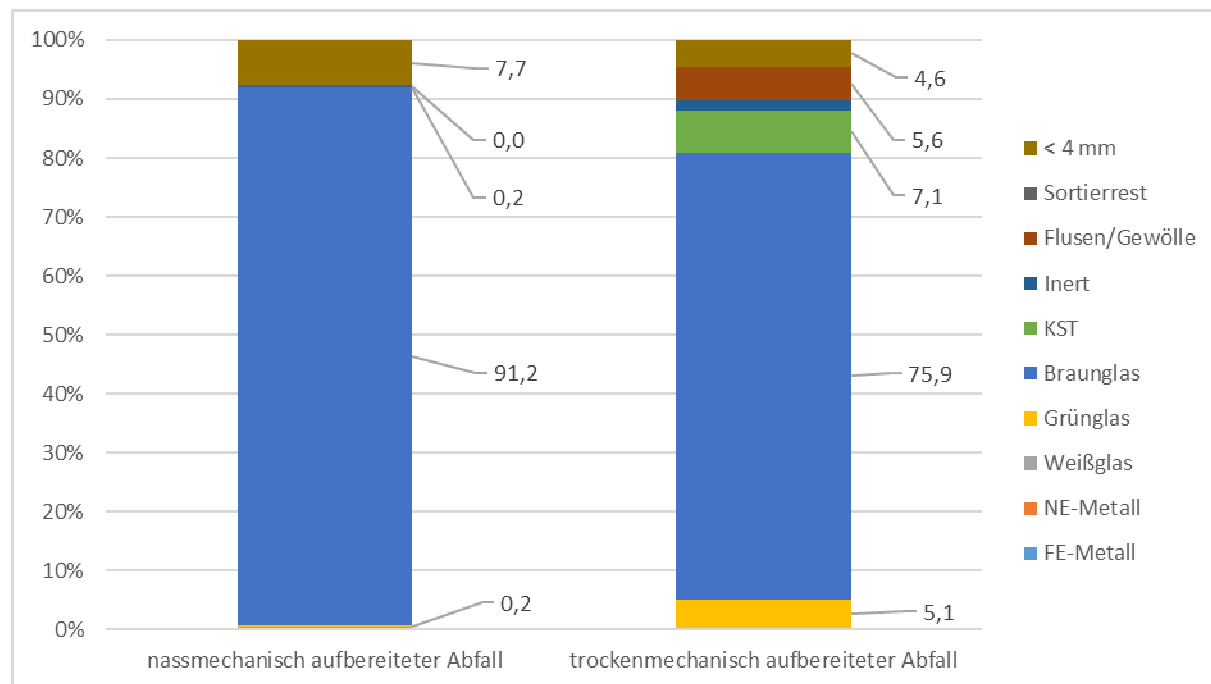


Abbildung 60: Hauptbestandteile der Braunglasprodukte (eigene Darstellung).

Tabelle 14: Vergleich der Ausbringen und Reinheiten der Braunglasprodukte.

Braunglasprodukte	Schwergut der nassmechanischen Aufbereitung	Schwergut der trockenmechanischen Aufbereitung
Reinheit	91,2 %	75,9 %
Ausbringen	71,4 %	46,9 %
Ausbringen Stufe 2	76,3 %	56,4 %
Ausbringen Stufe 3	77,1 %	56,4 %

Die Untersuchung des geringen Ausbringens wurde durch erneute Sortierung der nicht erkannten Partikel durchgeführt. Dabei ist in Abbildung 61 zu erkennen, dass die nicht erkannten Partikel bei der Sortierung des nassmechanisch hergestellten Schwerguts heller und teilweise auch grünlicher sind, als jene des Braunglasproduktes. Wie bereits erwähnt kann durch Anpassung des Sortierrezepts das Ausbringen durch Erweiterung des Farbraums bei Beachtung der übrigen Farbräume verbessert werden. Durch die zusätzlichen zwei Sortierstufen kann ohne Veränderung des hinterlegten Rezepts eine Steigerung des Ausbringens von rund 5 % erreicht werden. Das Ausbringen von Braunglas ins Produkt der trockenmechanischen Fraktion von unter 50 % kann durch Untersuchung der nicht erkannten

Partikel nur bedingt geklärt werden. Ähnlich wie bei der Weißglassortierung besteht der Großteil der nicht ausgetragenen Teilchen aus verschmutzten Partikeln (Abbildung 61 rechts), beträgt aber trotzdem nur rund zwei Drittel des Ausbringens bei der Weißglassortierung. Möglicherweise stört die Anwesenheit von Kunststoffen und Grünglas die Erkennung von Braunglas.. Das könnte daran liegen, dass die helleren Grünglaspartikel bei gegen die Achse der eintreffenden Strahlung gedrehtem Rutschen auf der Schurre die transmittierte Strahlung reduzieren und so dunklere Farbinformationen verursachen. Weiters können oberflächliche Verschmutzungen die transmittierte Strahlung vermindern und so zu einer Identifikation des Partikels im Farbbereich von Braunglas führen.

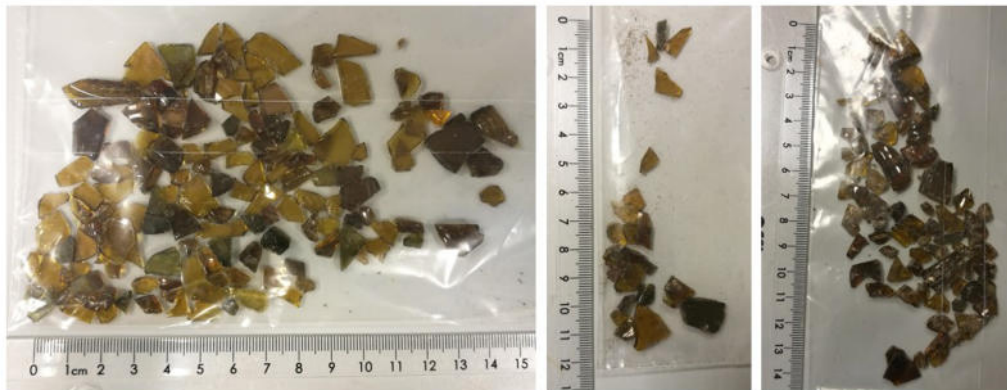


Abbildung 61: Nicht erkannte Braunglaspartikel des nass- (links) und trockenmechanisch aufbereiteten Materials (sauber - mittig; verschmutzt - rechts) (eigene Aufnahme).

Der in Kapitel 3.4.3 behandelte gesamte Fehlfarbanteil sowie der des Grünglases kann von beiden Produkten eingehalten werden, auch der Farbanteil des Braunglases wird von beiden Produkten erreicht. Allerdings liegt der massenbezogene Anteil des Braunglases in beiden Fraktionen unter den 97 %, wodurch auch der maximale Fremdstoffanteil überschritten wird. Beim Braunglasprodukt aus dem nassmechanisch aufbereiteten Schwergut bestehen die Fremdstoffe hauptsächlich aus Feinkörnern, die mittels Siebung entfernt werden können. Im Produkt des trockenmechanisch hergestellten Schwerguts sind neben der Feinfraktion auch Kunststoffe und Restpartikel enthalten, die neben einer Siebung noch weitere Reinigungsschritte notwendig machen. Auch im Fall des Braunglases wurden die Glaspartikel nicht auf mögliche Fremdgläser mit gleicher Farbe untersucht, wodurch dieser Anteil nicht mit den Literaturdaten verglichen werden kann. Zusammenfassend kann wie schon für die zwei anderen Glasprodukte gesagt werden, dass die nassmechanische Aufbereitung die Abtrennung von Produkten ermöglicht, deren Qualität näher an die geforderten Spezifikationen herankommt als die Produkte aus dem trockenmechanisch erzeugten Schwergut.

Wie bei den beiden anderen Glasfraktionen ist der in die NE-Metallfraktion fehlausgetragene Anteil an Braunglas in der nassmechanischen Aufbereitungslinie größer als der in der trockenmechanischen Linie. Die Ursache dafür konnte wie bei den übrigen Glasfraktionen nicht eruiert werden. Der Anteil an Braunglas, der in den Kunststofffraktionen gefunden

wurde, ist im Gegensatz zu den Daten aus der Stoffflussanalyse von Weiß- und Grünglas annähernd gleich groß. Vermutlich spielen oberflächliche Verschmutzungen wie bei den anderen Glasfraktionen eine Rolle in der Erkennung im NIR-Bereich. Warum die Anteile in den drei Sortierschritten nicht annähernd gleiche Verhältnisse aufweisen kann nicht beantwortet werden. Der in die Inertfraktion ausgetragene Anteil an Braunglas in der trockenmechanischen Aufbereitungslinie beträgt 14,04 %, der Anteil in der nassmechanischen Aufbereitungslinie macht nur rund ein Drittel dieses Wertes aus. Auch hier wird vermutet, dass Verschmutzungen die Erkennung im NIR-Bereich beeinflussen, was aber im Rahmen dieser Arbeit nicht weiter untersucht wurde. In der nassmechanischen Aufbereitungslinie gelangen 63,77 % des verfügbaren Braunglases in die Braunglasfraktion. In der trockenmechanischen Linie beträgt dieser Anteil 42,84 % und ist damit signifikant geringer als bei der Sortierung des nassmechanisch erzeugten Schwerguts. 22,88 % des Braunglases aus dem nassmechanisch generierten Schwergut gehen im Rest verloren, bei der Sortierung des trockenmechanisch hergestellten Schwerguts beträgt dieser Anteil 39,83 %. In beiden Fällen könnte das Potential der nicht erkannten Braunglaspartikel durch eine mehrstufig Sortierung genutzt werden. Zusammenfassend kann daher festgehalten werden, dass die nassmechanische Vorbehandlung den Austrag von Braunglas in die Braunglasfraktion begünstigt.

Fremdglas

Bei der Sortierung des Rests nach der Abtrennung von Braunglas wurden Glaspartikel gefunden, die keiner der angelernten und im Sortierrezept eingearbeiteten Fraktionen entsprachen, wie Abbildung 62 zeigt. Dabei handelt es sich um milchig-trübe Partikel unterschiedlichster Farbe und Intensität, von violett über dunkelblau bis hin zu orange. Teile der Partikel waren an mindestens einer Fläche beschichtet, z.B. Spiegelglas oder Teilchen mit Bänderolenresten. Daraus lässt sich schließen, dass die vorliegenden Glaspartikel nicht ausschließlich von Hohlglasprodukten stammen.

Der gemischte Siedlungsabfall ist jene Abfallart, über die korrekterweise sämtliche Nicht-Verpackungsgläser entsorgt werden. Diese Gläser erreichen das Ende ihrer Nutzungsdauer beispielsweise als Dekoartikel, die in einer Vielzahl an Formen und Farben gefertigt werden. Dabei kommen verschiedenste Metalloxide für die Färbung der Gläser zum Einsatz, die nicht gemischt eingeschmolzen werden können. Dadurch ist es nicht möglich das Sortierrezept an alle Farben bzw. Metalloxide anzupassen und gleichzeitig eine effektive Trennung durch die Abgrenzung aller Farbräume zu erreichen. Aus diesem Grund wurde im Rahmen dieser Arbeit keine weitere Sortierung dieser Glassorte durchgeführt.



Abbildung 62: Fremdglas im Rest nach Braunglassortierung (nassmechanische Linie - links; trockenmechanische Linie - rechts).

5.5 Kunststoffe

Im vierten Sortierschritt wurden mithilfe des NIR-Sensors Kunststoffprodukte aus dem Nass- und trockenmechanisch generierten Schwergut abgetrennt. Diese sind in Abbildung 63 gemeinsam mit den dabei entstandenen Resten zu sehen. Der optische Eindruck vermittelt ähnliche Ausbringen und Reinheiten der erzeugten Produkte, was jedoch durch die in Abbildung 77 im Anhang Abbildung 64 detailliert dargestellte Zusammensetzung widerlegt wird. In Abbildung 64 sind die Hauptbestandteile der Fraktionen dargestellt.

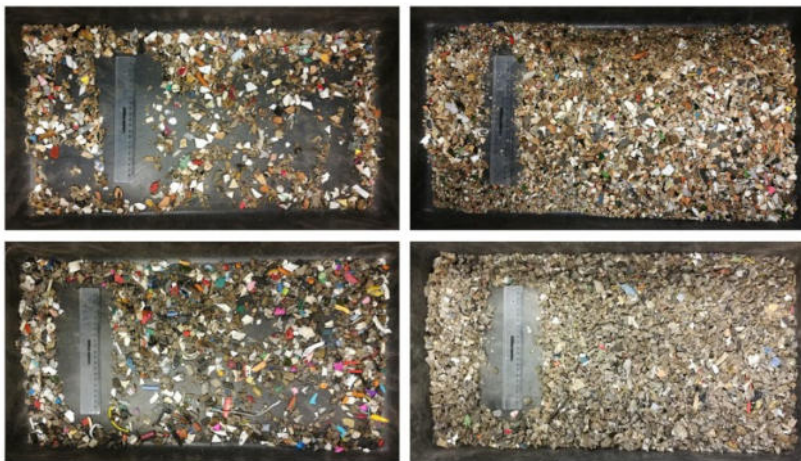


Abbildung 63: Kunststoffprodukte des Nass- (links oben) und trockenmechanisch (links unten) aufbereiteten gemischten Siedlungsabfalls mit Restfraktionen (rechts) (eigene Aufnahme).

Beide Produkte sind mit Inertmaterialien verunreinigt. Das Kunststoffprodukt der Nassmechanischen Aufbereitung enthält mehr Inertstoffe als Kunststoffe, was durch die berechnete Reinheit von unter 20 % in Tabelle 15 bestätigt wird. Die zweitgrößte Störstofffraktion sind Flusen, die mit 4,5 % zwar einen geringen Massenanteil bei geringer

Schüttdichte, jedoch einen durchaus hohen Volumenanteil ausmachen. Dabei ist weiter abzuklären aus welchem Material diese Flusen bestehen. Handelt es sich dabei um Kunststoffe können diese Partikel als Wertstoff betrachtet werden. Das Kunststoffprodukt der trockenmechanischen Aufbereitung setzt sich überwiegend aus Kunststoffen, Gewölle und Inertmaterialien zusammen. Trotz der zwei Störstofffraktionen beträgt die erreichte Reinheit über 50 % und ist damit um ein Vielfaches höher als jene des nassmechanischen Kunststoffprodukts. Der Grund für den übermäßigen Austrag von Inertpartikeln in das Produkt aus dem nassmechanisch generierten Schwergut kann durch das weitere Anpassen des Sortierrezepts nur bedingt verändert werden, da die Summenspektren der beiden Fraktionen in den verwendeten NIR-Bereichen zu starke Ähnlichkeiten der Intensitäten aufweisen.

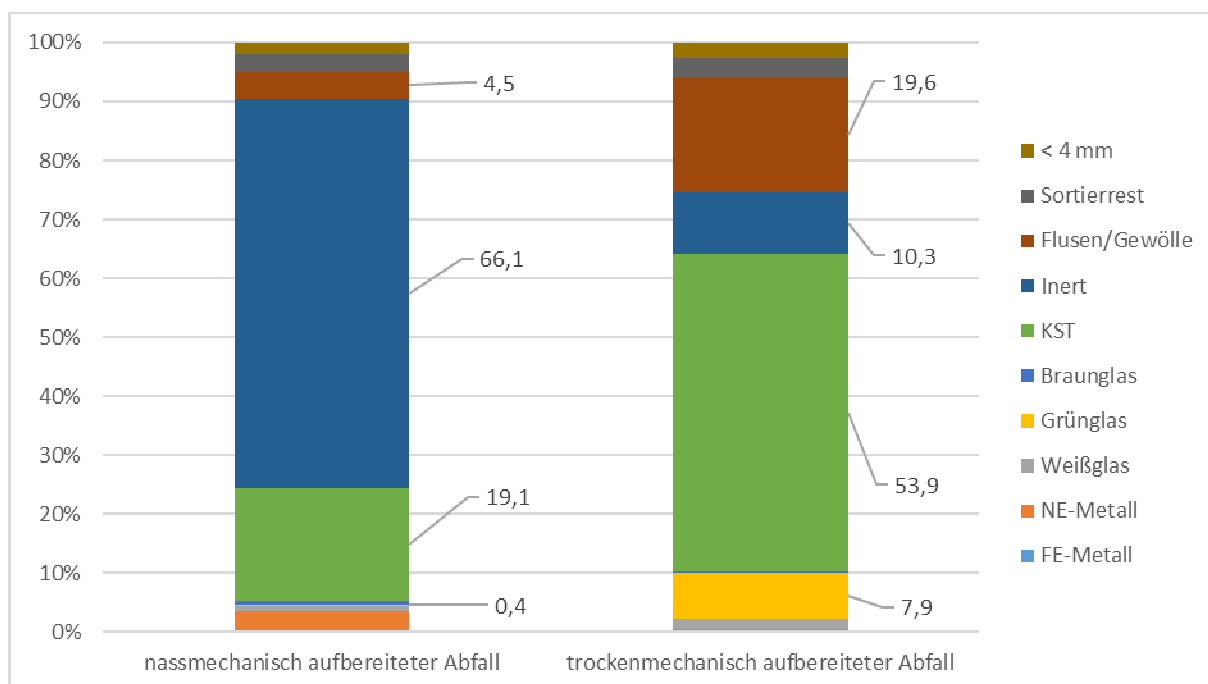


Abbildung 64: Hauptbestandteile der Kunststoffprodukte (eigene Darstellung).

Tabelle 15: Vergleich der Ausbringen und Reinheiten der Kunststoffprodukte.

Kunststoffprodukte	Schwergut der nassmechanischen Aufbereitung	Schwergut der trockenmechanischen Aufbereitung
Reinheit	19,1 %	53,9 %
Ausbringen	34,2 %	37,2 %

Das Kunststoffausbringen in die beiden Produkte liegt sowohl für das nass- als auch für das trockenmechanisch generierte Schwergut unter 40 %. Daher wurden die nicht ausgetragenen Partikel erneut mithilfe des NIR-Sensors aufgenommen und das in Abbildung 65 dargestellte Spektrum aufgenommen. Dabei ist einerseits zu erkennen, dass die Einzelspektren der Teilchen stark variieren. Andererseits wird im rechten Bereich deutlich,

dass der mangelnde Austrag tatsächlich auf die fehlende Erkennung der Kunststoffe zurückzuführen ist, da die Partikel als „Unbekannt“ klassifiziert wurden. Da bereits im Rahmen der Vorversuche die Spektren sämtlicher nicht erkannter Teilchen ins Sortierrezept aufgenommen wurden kann hier keine Verbesserung durch das Erweitern des Rezepts erwartet werden. Gleiches gilt für die Sortierung des trockenmechanisch generierten Schwerguts. Hier wurden ebenfalls nicht erkannte Partikel bereits in den Vorversuchen in das Sortierrezept eingepflegt, wodurch keine Verbesserung in der Erkennung möglich ist.

Aus den in Kapitel 3.4.3 genannten Gründen und in Betracht der geringen Ausbringen und Reinheiten kann dieser Sortierschritt nicht mit dem Ziel der Erzeugung recyclingfähiger Kunststoffprodukte durchgeführt werden. Er kann jedoch dazu genutzt werden um die Restfraktion soweit von organischen Komponenten abzureichern, dass die Grenzwerte für die Deponierung des Restmaterials eingehalten werden können.

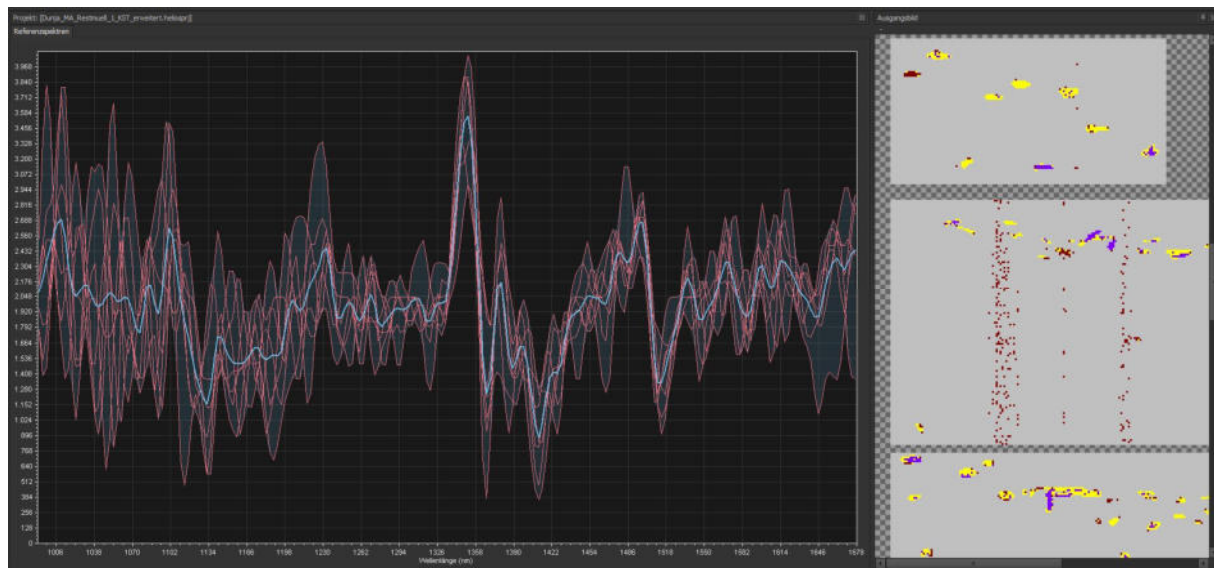


Abbildung 65: Spektrum der nicht erkannten Kunststoffpartikel im nassmechanisch aufbereiteten Schwergut (eigene Darstellung).

In Abbildung 86 im Anhang ist die Stoffflussanalyse von Kunststoff dargestellt. 13,03 % der Kunststoffe im nassmechanisch erzeugten Schwergut wurden in die NE-Metallfraktion transportiert, bei der Sortierung des trockenmechanisch hergestellten Schwerguts beträgt dieser Anteil nur 2,5 %. Annähernd gleich viel Kunststoffe gelangten in das Weißglasprodukt der beiden Aufbereitungslinien. Womöglich handelt es sich um durchsichtige Kunststoffe, die bei der Farbsortierung gleiche Informationen erzeugen wie Weißglas. Die Anteile an Kunststoffen, die in die Kunststoffprodukte der beiden Aufbereitungslinien gelangten, sind verglichen mit den übrigen Produkten gering und bestätigt die niedrigen Reinheiten und Ausbringen der Produkte. Mit 16,09 % und 14,43 % gelangten im darauffolgenden Schritt erhebliche Anteile an Kunststoffpartikeln in die Inertprodukte der beiden Aufbereitungslinien. Die „Mischung“ von Kunststoff- und Inertpartikeln in den beiden Fraktionen ist auf die mangelnde Erkennung und Differenzierung anhand der NIR-Spektren der beiden Stoffgruppen zurückzuführen. Bei der Sortierung des nassmechanisch erzeugten

Schwerguts gehen 25,70 % durch das Verbleiben im Rest verloren, bei der Sortierung des trockenmechanisch erzeugten Schwerguts beträgt dieser Anteil 42,37 %. Der niedrigere Anteil im Rest der nassmechanischen Linie kommt daher, dass dieses Schwergut bereits weniger Kunststoffe enthält als jenes aus der trockenmechanischen Vorbehandlung. Daher kann zusammengefasst werden, dass die nassmechanische Aufbereitung zwar keine Vorteile bei der Herstellung einer Kunststofffraktion bietet, durch den geringeren Anteil an Kunststoffen im Schwergut aber eine bessere Abreicherung von Kunststoffen im Sortierrest und folglich eine Deponierung ohne weitere Aufbereitungsschritte ermöglicht.

5.6 Inertstoffe

Im letzten Sortierschritt wurden Inertmaterialien wie Ziegel, Keramik und Steine abgetrennt. Dabei konnten die in Abbildung 66 gezeigten Produkte erzeugt werden. Optisch ist bereits erkennbar, dass das Produkt des nassmechanischen Schwergutes eine höhere Reinheit aufweist, was durch die in Abbildung 67 gezeigten Hauptbestandteile bestätigt wird. Abbildung 78 im Anhang enthält die detaillierte Zusammensetzung der Fraktionen.



Abbildung 66: Inertprodukte des nass- (links) und trockenmechanisch (rechts) aufbereiteten Schwergutes (eigene Aufnahme).

Das Produkt des nassmechanisch erzeugten Schwerguts weist eine Reinheit von über 70 % auf, wobei Kunststoffe und Restpartikel die zwei größten Fremdfractionen darstellen. Diese zwei Materialien konnten gleich wie bei der Sortierung von Kunststoffen nicht hinreichend getrennt werden. Die Spektren der zuvor nicht erkannten Kunststoffe und der Inertmaterialien (vgl. Abbildung 65 und Abbildung 40) sind beide stark variabel und liefern zu wenige Bereiche mit unterschiedlichen Intensitäten.

Das Produkt des trockenmechanisch erzeugten Schwerguts beinhaltet einen doppelt so hohen Anteil an Gewölle als an Inertstoffen. Gemeinsam mit dem Sortierrest machen diese Störstoffe knapp 55 % des Produktes aus, wohingegen die Störstoffe im Produkt aus dem nassmechanisch hergestellten Schwergut nur 6,8 % betragen. Daran ist der Einfluss der trockenmechanischen Aufbereitung erkennbar, die im Vergleich zu den Flusen in der Schwerfraktion der nassmechanischen Aufbereitung größere Mengen an störendem Gewölle

erzeugt. Gleich wie bei der Sortierung des nassmechanisch generierten Schwerguts werden hier Kunststoffe mit ausgetragen, die die Reinheit des Produkts weiter vermindern.

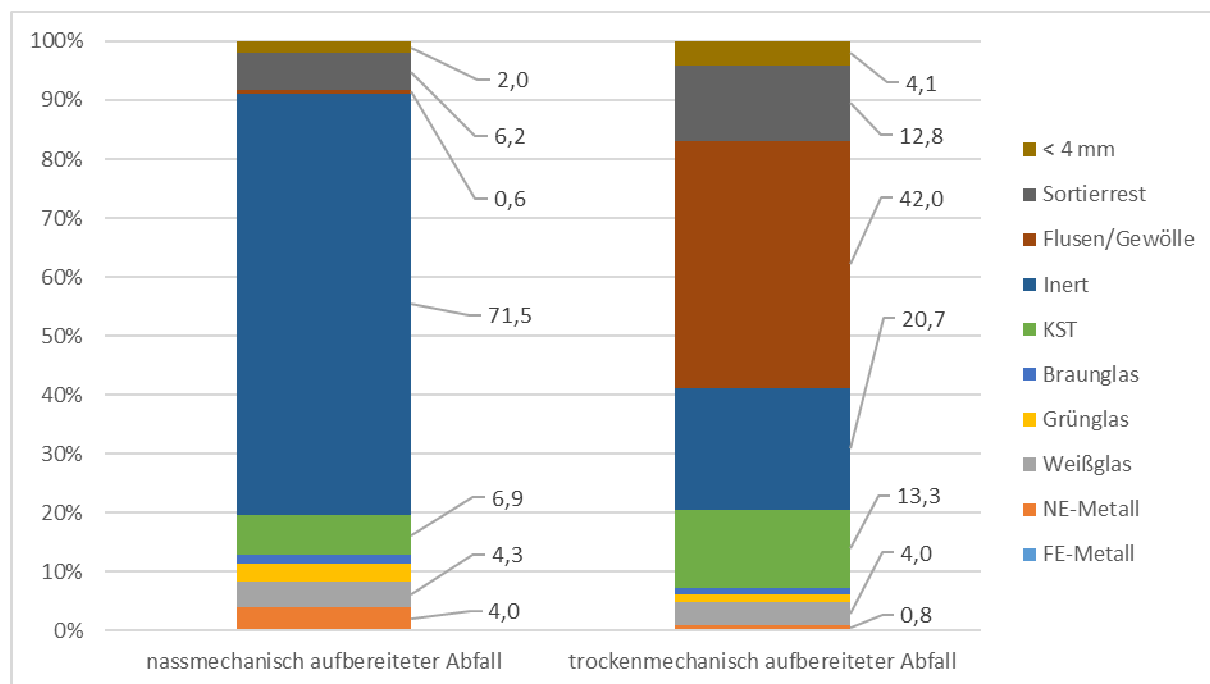


Abbildung 67: Hauptbestandteile der Inertprodukte (eigene Darstellung).

Die Ausbringen der Inertpartikel in die Produkte der nass- und trockenmechanischen Schwergüter liegen beide unter 40 %. Gleich wie für die Sortierung der Kunststoffe wurde mithilfe einer Vorsortierung versucht die Spektren der nicht erkannten Partikel in das Sortierrezept einzuarbeiten. Dadurch sollten einerseits vermehrt Inertpartikel korrekt klassifiziert werden und andererseits die Abgrenzung zu den Kunststoffen erfolgen. Beide Ziele konnten durch die Aufnahme zusätzlicher Spektren nicht erreicht werden. Als Ursache dafür können ähnlichen Spektren der beiden Materialklassen identifiziert werden.

Tabelle 16: Ausbringen und Reinheit der Inertprodukte.

Inertprodukte	Schwergut der nassmechanischen Aufbereitung	Schwergut der trockenmechanischen Aufbereitung
Reinheit	71,5 %	20,7 %
Ausbringen	33,7 %	39,1 %

Ob die Verwendung der erzeugten Produkte als Sekundärbaustoffe möglich ist, muss konkret anhand der Anforderungen laut Recycling-Baustoffverordnung 2015 geprüft werden. Aufgrund der geringen Reinheiten der zwei Fraktionen ist allerdings anzunehmen, dass sie sich ohne weitere Aufbereitungsmaßnahmen nicht für den Wiedereinsatz eignen. Daher ist die Einhaltung der Kriterien für die Deponierung auf einem Baurestmassenkompartiment zu prüfen. Dadurch sind im Vergleich zur Deponierung in einem Massenabfallkompartiment

geringere ALSAG-Beiträge zu zahlen, wodurch die Gesamtkosten für die Aufbereitung von Restmüll gesenkt werden (Altlastensanierungsgesetz 07.06.1989).

In die Produkte der Starkfeldscheidung wurden annähernd gleich große Anteile an Inertstoffen ausgetragen. Grund dafür könnte eine ähnliche Flugparabel der Metall- und Inertstoffpartikeln sein. In das NE-Metallprodukt aus dem nassmechanisch hergestellten Schwergut gelangten mehr Inertstoffe als in das aus dem trockenmechanisch erzeugten Schwergut. Dieser Unterschied konnte bei der Sortierung sämtlicher Produkte, die am sensorgestützten Sortierstand erzeugt wurden, beobachtet werden. Die Ursache dafür konnte nicht geklärt werden. Der Anteil an Inertstoffen, der in die Kunststofffraktionen transportiert wurde, beträgt 18,72 % für die nassmechanische und 9,77 % für die trockenmechanische Aufbereitungslinie. In die Inertstoffprodukte der nass- und trockenmechanischen Aufbereitungslinie gelangen 22,95 % und 33,03 %. Das bedeutet, dass die Unterscheidung von Kunststoffen und Inertstoffen im Schwergut aus der nassmechanischen Vorbehandlung mit mehr Fehlern versehen ist als bei der Sortierung des trockenmechanisch erzeugten Schwerguts. Inertstoffe gelangten in beiden Aufbereitungslinien zu einem großen Anteil in den Rest der Sortierversuche. Bei der Sortierung des nassmechanisch vorbehandelten Materials handelt es sich um 45,05% und bei der Sortierung des trockenmechanisch vorbehandelten Materials um 51,44 %. Das liegt möglicherweise daran, dass die NIR-Spektren der unterschiedlichen Baustoffe dieser Gruppe zu stark schwanken.

Die Abtrennung von Inertstoffen ist daher durch das geringe Ausbringen und die geringen Erlöse am Sekundärrohstoffmarkt nicht erstrebenswert. Weiters ist (nach Prüfung) eine kostengünstige Deponierung auf einem Baurestmassenkompartiment möglich, wodurch der Schritt der Inertstoffsartierung bei der Aufbereitung gemischter Siedlungsabfälle nicht notwendig.

5.7 Restprodukte

Im letzten Sortierschritt wurden neben der Inertprodukte auch Restprodukte erzeugt, die in Abbildung 68 zu sehen sind. Darin ist zu erkennen, dass das Produkt aus dem trockenmechanisch generierten Schwergut einen höheren Anteil an Kunststoffen besitzt. Das wird durch die Daten der Sortieranalyse, deren Hauptbestandteile in Abbildung 69 Abbildung 69 zusammengefasst sind, bestätigt. Abbildung 79 im Anhang zeigt die detaillierte Zusammensetzung der Fraktionen.



Abbildung 68: Restprodukte der Sortierschritte des nass- (links) und trockenmechanisch (rechts) aufbereiteten Siedlungsabfalls (eigene Aufnahme).

Die Zusammensetzung des Restprodukts aus der Sortierung des nassmechanisch erzeugten Schwerguts ist in Abbildung 69 zu sehen. Bei Betrachtung von Flusen, Sortierresten und der Feinfraktion < 4 mm als Reste im Restprodukt, machen sie 52,2 % der Masse aus. Dabei stellt die Feinfraktion mit annähernd 50 % den größten Anteil dar. Die Inertfraktion macht ein weiteres Drittel aus und bestätigt dadurch das zuvor berechnete niedrige Ausbringen der Inertstoffsartierung. Der Anteil der Kunststoffe konnte im Restprodukt auf 2,5 % reduziert werden.

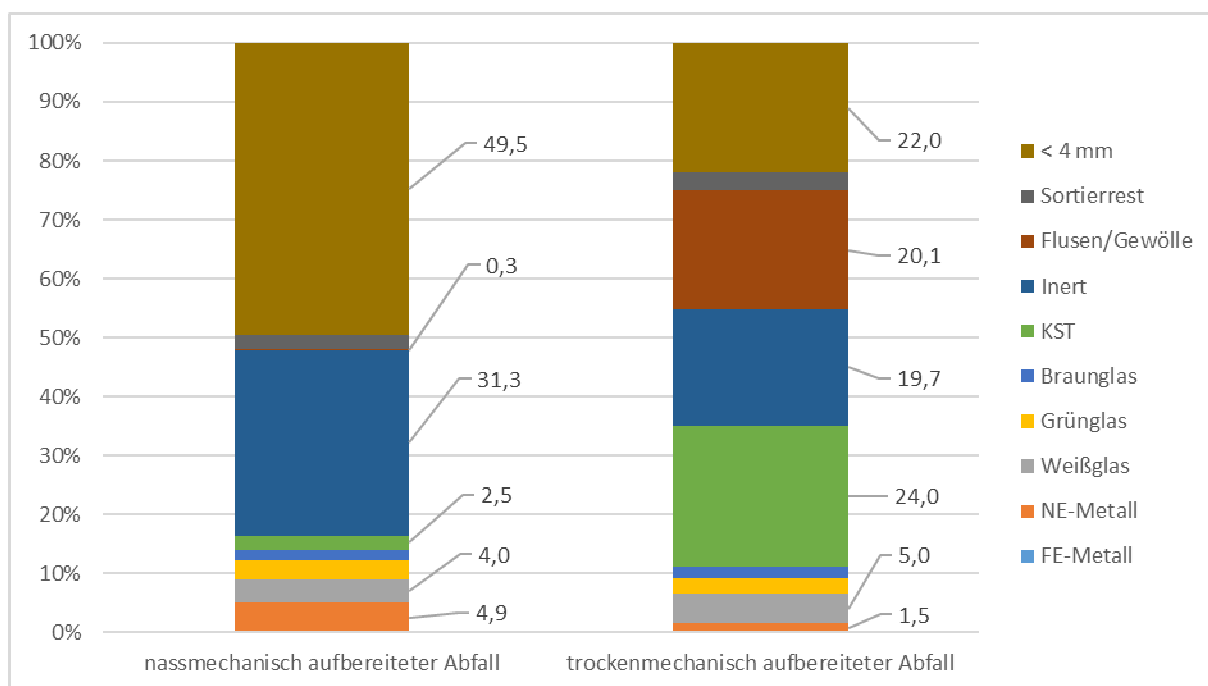


Abbildung 69: Hauptbestandteile der Restprodukte (eigene Darstellung).

Im Restprodukt der trockenmechanischen Aufbereitung beträgt die Summe der Restfraktionen bestehend aus Gewölle, Sortierrest und Feinfraktion 45,1 %. Dabei beträgt im Gegensatz zum nassmechanischen Restprodukt der Feinanteil nur etwa die Hälfte, der Anteil des Gewölles ist verglichen mit dem der Flusen jedoch um ein Vielfaches erhöht. Auffällig ist der im Vergleich zum Restprodukt der nassmechanischen Aufbereitung hohe Anteil an Kunststoffen. Dieser ist bereits im Schwergut des Zick-Zack-Sichters im Vergleich zum Schwergut der nassmechanischen Aufbereitung erhöht. Durch die ähnlichen

Ausbringen bei der Sortierung der Kunststoffe gelangt somit auch eine größere Menge an Kunststoffen in das erzeugte Restprodukt.

Die Anteile der übrigen Wertstoffe sind in beiden Reststoffprodukten annähernd gleich. Lediglich die NE-Metalle sind im nassmechanischen Produkt im Gegensatz zum trockenmechanischen Produkt erhöht. Das höhere Ausbringen bei der NE-Sortierung des nassmechanischen Schwergutes ließ zunächst auf einen geringeren Anteil der NE-Metalle im Restprodukt verglichen mit der trockenmechanischen Linie schließen. Vergleicht man auch den Anteil der NE-Metalle im Schwergut der nassmechanischen Aufbereitung mit dem im trockenmechanischen Material, so kann hier ein höherer Anteil der Metalle festgestellt werden. Daher ist auch der im Rest zurückbleibende Anteil an NE-Metallen höher.

In Hinblick auf die anschließende Deponierung ist der niedrigere Kunststoffgehalt des nassmechanischen Produkts im Gegensatz zum trockenmechanischen Produkt vorteilhaft.

5.8 Abschätzung des Wertstoffpotenzials in gemischten Siedlungsabfällen

Mithilfe der Daten, die im Rahmen der Sortierversuche und -analysen gewonnen wurden, kann eine erste Abschätzung der Wertstoffmenge in gemischten Siedlungsabfällen durchgeführt werden. Dazu können einerseits die Mengen an Wertstoffen in den erzeugten Schwergutfraktionen und andererseits die Mengen der theoretisch erzeugbaren Fraktionen der einzelnen Sortierschritte bezogen auf die in Österreich und der Steiermark anfallenden Menge an gemischten Siedlungsabfälle verglichen werden.

Für die Berechnung der in den Schwergutfraktionen enthaltenen Wertstoffmengen wurden die bei den Sortieranalysen erhaltenen Anteile auf die Menge der gemischten Siedlungsabfälle in Österreich (1,43 Mio. t/a) und der Steiermark (155 889 t/a) bezogen, vgl. Tabelle 17. Weiters wurde eine Massenbilanz auf Basis der bei den Sortierversuchen gewonnenen Daten bezogen auf die Mengen des österreichischen und steirischen Restmülls erstellt, vgl. Abbildung 91 und Abbildung 92 im Anhang. Anhand dieser Massenbilanz kann eine erste Abschätzung der theoretisch erzeugbaren Fraktionen erfolgen, vgl. Tabelle 18.

Tabelle 17: Vergleich der im zerkleinerten, nass- sowie trockenmechanisch aufbereiteten gemischten Siedlungsabfälle enthaltenen Wertstoffmengen in Österreich.

Wertstoff- fraktion	Österreich			Steiermark		
	z.g. SA	SGf	SGt	z.g. SA	SGf	SGt
	[10 ³ t/a]			[10 ³ t/a]		
Anfallende Menge	1 430	266,0	494,8	155,9	29,0	53,9
Eisen- Metall	15,4	87,5	47,5	1,7	9,5	5,2
Nichteisen- Metall	22,4	25,2	16,5	2,4	2,7	1,8
Weißglas	81,0	42,8	53,4	8,8	4,7	5,8

Wertstoff- fraktion	Österreich			Steiermark		
	z.g. SA	SGf	SGt	z.g. SA	SGf	SGt
	[10 ³ t/a]			[10 ³ t/a]		
Grünglas	12,6	6,2	8,8	1,4	0,7	1,0
Braunglas	6,3	5,8	5,2	0,7	0,6	0,6
Kunststoff	236,8	4,3	100,8	25,8	0,5	11,0
Inertstoff	75,4	47,5	41,1	8,2	5,2	4,5
Reststoff	980,1	46,7	221,3	106,8	5,1	24,1

Bei Betrachtung der Mengen in beiden Tabellen ist erkennbar, welche Vorteile die Nassmechanische Aufbereitung hinsichtlich der Wertstoffanreicherung im erzeugten Schwergut und damit auch der erzeugbaren Sortierfraktionen bietet. Das wird vor allem bei den Fraktionen der Eisenmetalle deutlich. Bei 155 889 t/a an in der Steiermark anfallendem Restmüll bedeutet das ein Wertstoffpotenzial an Eisen-Metallen von ca. 9 500 t/a im Schwergut der Nassmechanischen Aufbereitung, vgl. Tabelle 17. Könnte die im Rahmen dieser Arbeit erzeugte stark magnetisierbare Metallfraktion wie zuvor diskutiert ohne weitere Aufbereitungsschritte direkt in der Stahlindustrie eingesetzt werden, würde damit eine Menge von ca. 18 400 t/a direkt für den Wiedereinsatz zur Verfügung stehen. Bezogen auf die in Österreich anfallende Menge an gemischten Siedlungsabfällen von 1,43 Mio. t könnte mithilfe der Nassmechanischen Aufbereitung eine stark magnetisierbare Metall-Fraktion mit ca. 168 900 t/a erzeugt werden.

Tabelle 18: Vergleich der theoretisch erzeugbaren Fraktionen bei der Nass- und trockenmechanischen Aufbereitung der in Österreich und der Steiermark anfallenden gemischten Siedlungsabfälle.

Mengen der theoretisch erzeugbaren Produkte	Österreich		Steiermark	
	SGf	SGt	SGf	SGt
	[t/a]		[t/a]	
Starkmagn. Metall	168 897	231 062	18 412	25 189
Schwachmagn. Metall	46 406	68 039	5 059	7 417
Nichteisen-Metall	8 919	17 024	972	1 856
Weißglas	12 068	35 016	1 316	3 817
Grünglas	2 256	7 756	246	846
Braunglas	2 085	5 299	227	578
Kunststoff	4 461	33 690	486	3 673
Inertstoff	3 822	36 819	417	4 014
Reststoff	17 065	60 073	1 860	6 549

Einige der erzeugten Fraktionen können die erwähnten Qualitätsanforderungen aufgrund eines erhöhten Feinanteils nicht einhalten. Unter der Annahme, dass eine Absiebung des Feinkorns das Einhalten der Anforderungen ermöglicht, könnten durch einen weiteren

Behandlungsschritt weitere Sekundärrohstoffströme zur Verfügung stehen. Die erzeugten Fraktionen können daher in die Kategorien „direkt verwertbar“, „nach einem Behandlungsschritt verwertbar“, „nach mehreren Behandlungsschritten verwertbar“ und „nicht verwertbar“ eingeteilt werden, vgl. Abbildung 70. Dadurch wird deutlich, wie das vorhandene Wertstoffpotenzial mithilfe der zwei Aufbereitungstechniken erschlossen werden kann. Dabei ist zu erkennen, dass durch die Nassmechanische Vorbehandlung eine Fraktion direkt und drei Fraktionen nach nur einem zusätzlichen Aufbereitungsschritt wiedereingesetzt werden können. Von den Fraktionen der trockenmechanischen Aufbereitungslinie könnte lediglich das stark magnetisierbare Metallprodukt durch nur einen Behandlungsschritt weit genug aufbereitet werden. Die Nassmechanische Aufbereitung ermöglicht daher die Erzeugung von Fraktionen, die weniger aufbereitungstechnischen Aufwand für deren Wiedereinsatz benötigen.

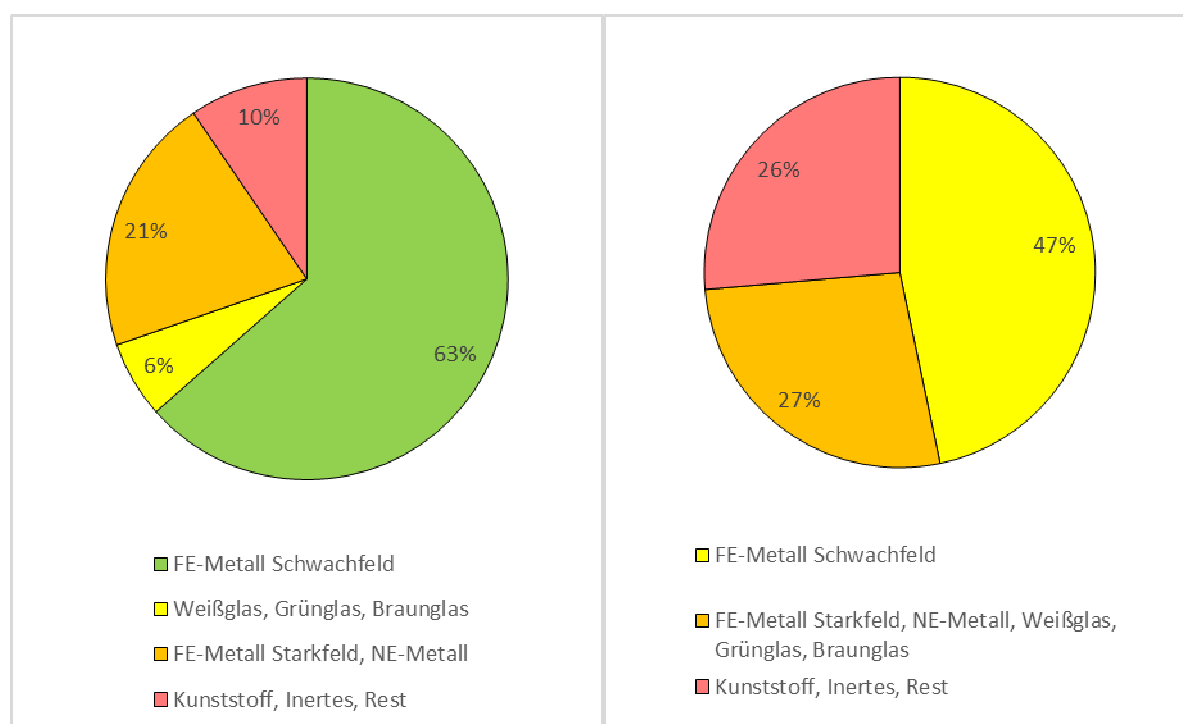


Abbildung 70: Verwertbare Fraktionen ohne zusätzlich notwendigen Aufbereitungsschritt (grün), nach einem Aufbereitungsschritt (gelb), nach mehreren Schritten (orange) und nicht verwertbare Fraktionen (rot) aus Nass- (links) und trockenmechanisch (rechts) generiertem Schwergut bezogen auf den in Österreich jährlich anfallenden gemischten Siedlungsabfall (eigene Darstellung).

Betrachtet man sämtliche Fraktionen außer den erzeugten Kunststoff- und Inertprodukten als Wertstoffe, könnten bezogen auf den steirischen Restmüll ca. 26 232 t/a durch den Einsatz der Nassmechanischen und ca. 39 703 t/a durch den Einsatz der trockenmechanischen Aufbereitung generiert werden. Verglichen mit den zurückgewonnenen Wertstoffen der Steiermark mit 6 236 t im Jahr 2015 wird somit ein erhebliches Wertstoffpotenzial im gemischten Siedlungsabfall sichtbar. In Österreich konnten 2015 aus Restmüll 13 900 t Wertstoffe rückgewonnen werden. Die Nassmechanische Aufbereitung könnte ca.

240 632 t/a und die trockenmechanische Aufbereitung ca. 364 198 t/a an Wertstoffen bereitstellen. Ein Vergleich dieser Daten lässt darauf schließen, dass die trockenmechanische Aufbereitung eine höhere Menge an Wertstoffen zur Verfügung stellen kann. Dabei sind allerdings die Zusammensetzung und der höhere aufbereitungstechnische Aufwand der erzeugten Fraktionen aus dem trockenmechanischen Schwergut zu beachten.

Bisher beträgt die jährlich in der Steiermark deponierte Menge an Massenabfällen ca. 250 000 t. Unter der Annahme, dass die bei nass- und trockenmechanischer Aufbereitung erzeugten Restfraktionen auf einer Massenabfalldéponie abgelagert werden, könnte die jährlich verbaute Menge auf ca. 1 860 t/a bzw. 6 549 t/a reduziert werden. Bei Déponierung der Inertstofffraktionen auf Baurestmassenkompartmenten würden weiters ca. 417 t/a bzw. 4 014 t/a an Déponiekapazität benötigt werden. Dadurch würden bei nass- und trockenmechanischer Aufbereitung nur mehr ca. 2 277 t/a bzw. 10 563 t/a Material déponiert werden müssen. Durch die nassmechanische Vorbehandlung müssten, verglichen mit der trockenmechanischen, um ca. 8 300 t/a weniger Material déponiert werden.

6 Zusammenfassung

Hauptziel dieser Arbeit war die vergleichende Erhebung der Recyclingfähigkeit nass- und trockenmechanisch aufbereiteter gemischter Siedlungsabfälle. Dazu wurden mittels nass- und trockenmechanischer Vorbehandlung vorab zerkleinerte Schwergüter erzeugt, die anschließend mithilfe von Magnetscheidung, Induktions-, Farb- und NIR-Sortierung aufbereitet wurden. Auf Basis von Sortieranalysen wurden die dabei erhaltenen Outputfraktionen untersucht. Die dadurch gewonnenen Daten bilden die Grundlage für die erstellte Massenbilanz (siehe Anhang) sowie die Berechnung von Reinheit und Ausbringen der Outputfraktionen. Anhand quantitativer Bewertung und Interpretation der Ergebnisse wurde eine vergleichende Potenzialabschätzung durchgeführt, die im Folgenden zusammengefasst wird.

Die erzeugten Produkte werden durch die beiden Vorbehandlungslinien auf verschiedene Weise beeinflusst. Zum einen werden durch die eingesetzten Vorbehandlungsverfahren unterschiedliche Zusammensetzungen der Schwergutfraktionen verursacht. Dadurch werden die nachfolgenden Sortierschritte vor allem durch den Anteil enthaltener Störstoffe beeinflusst, aber auch die unterschiedlich starke Anreicherung von Wertstoffen führt zu verschiedenen hohen Wertstoffpotenzialen in den Schwergutfraktionen. Zum anderen wirkt das Vorbehandlungsverfahren auf die Beschaffenheit der Partikel ein, wodurch die Erkennung (z.B. durch Verschmutzung) und der Austrag (z.B. durch Kornform und -größe) beeinflusst werden. Dadurch werden das Wertstoffausbringen sowie die Zusammensetzung und somit auch die Reinheit des Produkts bestimmt.

Infolgedessen wurden zunächst die erzeugten Schwergutfraktionen untersucht. Im Zuge der nassmechanischen Vorbehandlung wurde ein Schwergut erzeugt, das überwiegend aus Eisenmetallen, Inertmaterial und Weißglas besteht und von Kunststoffen und Sortierresten abgereichert ist. Das Schwergut der trockenmechanischen Aufbereitung weist hingegen höhere Anteile an Kunststoffen, Sortierresten und Gewölle auf, wodurch der Anteil an Metallen, Glas und Inertmaterial geringer ist. Durch die der Windsichtung vorgeschaltete Siebung wurde der Feinanteil reduziert, konnte jedoch nicht vollständig entfernt werden.

Ausbringen und Reinheit der bei den nachfolgenden Sortierversuchen erzeugten Fraktionen sind unterschiedlich stark ausgeprägt, eine Übersicht dazu bietet Tabelle 19.

Die bei der Magnetscheidung am Schwachfeldscheider erzeugten Fraktionen weisen mit geringem Unterschied Reinheiten über 90 % auf. Bei der Aufbereitung des trockenmechanisch erzeugten Schwerguts wurden um 17,5 % weniger Eisenmetalle ausgetragen, die in der Starkfeldscheidung abgetrennt wurden. Mit den Ausbringen von (fast) 100 % für beide Produkte in der zweiten Magnetscheiderstufe wurden daher (fast) alle Metall-Partikel in die Zielfraktionen überführt. Auffällig waren die geringen Reinheiten der Produkte aus der Starkfeldscheidung, die ein Drittel unter denen der Produkte aus der Schwachfeldscheidung liegen. Diese sind aber für die Fraktionen aus dem nass- und trockenmechanisch generierten Schwergut annähernd gleich und rühren vermutlich von einer für die Aufbereitung von gemischten Siedlungsabfällen ungünstigen Bauart des verwendeten Magnetscheiders her. Von den erzeugten Produkten kann ausschließlich das

stark magnetisierbare Eisenprodukt aus dem nassmechanisch generierten Schwergut die Anforderungen eines Sekundärrohstoffs erfüllen. Die Fremdstoffanteile in den übrigen Eisenprodukten sind dafür zu hoch, durch eine Abtrennung des Feinkorns könnte das stark magnetisierbare Eisenprodukt aus dem trockenmechanisch erzeugten Schwergut die Qualitätskriterien erfüllen. Aus diesen Gründen ist die nassmechanische Vorbehandlung einer trockenmechanischen vorzuziehen.

Bei der Abtrennung von Metallen mittels Induktionssystems des sensorgestützten Sortierstands wurden hingegen deutliche Unterschiede sichtbar. Das Produkt aus dem nassmechanischen Schwergut kann eine um 13,5 % höhere Reinheit und ein um 12,4 % höheres Ausbringen erzielen. Die so hergestellten Metall-Mischungen müssten für den Wiedereinsatz in sortenreine Fraktionen getrennt werden, dadurch könnten auch die Fremdstoffanteile gesenkt werden. Demnach ist zu erkennen, dass die nassmechanische Vorbehandlung, verglichen mit der trockenmechanischen, ein höheres Wertstoffpotenzial zur Verfügung stellt.

Die Farbsortierung im Durchlichtverfahren führte ebenfalls zu unterschiedlichen Reinheiten und Ausbringen der Produkte. Dabei wurde die Sortierung des Abfalls durch die nassmechanische Vorbehandlung positiv beeinflusst. Durch den Wascheffekt konnten einerseits sauberere Glasprodukte hergestellt werden, andererseits konnte die Erkennung vor allem von Braunglas, aber auch von Weiß- und Grünglas erhöht werden. Beides ist anhand der höheren Ausbringen und der höheren Reinheiten der Fraktionen aus dem nassmechanisch erzeugten Schwergut zu erkennen, vgl. Tabelle 19. Die an Altglas gestellten Qualitätsanforderungen konnten von keiner Fraktion erfüllt werden, da der Fremdstoffanteil in jedem Produkt über den geforderten Maximalanteilen liegt. Dabei sind in erster Linie der Feinanteil sowie zusätzlich der Kunststoffanteil in den Produkten des trockenmechanisch erzeugten Schwerguts zu hoch, die durch nachgeschaltete Reinigungsschritte (vor allem mittels Siebung) reduziert werden können. Anzumerken ist, dass die Produkte aus dem nassmechanisch erzeugten Schwergut die Qualitätsanforderungen mit weniger aufbereitungstechnischem Aufwand erreichen könnten und dadurch die nassmechanische Vorbehandlung, gegenüber der trockenmechanischen, einen Vorteil bietet.

Die Sortierung im NIR-Bereich wird ebenfalls durch oberflächliche Verschmutzung beeinflusst, indem das Spektrum des Wertstoffs überlagert wird. Durch den Reinigungseffekt bei der nassmechanischen Aufbereitung ergibt sich daher ein Vorteil gegenüber der trockenmechanischen Vorbehandlung. Einen weiteren positiven Effekt bietet die nassmechanische Behandlung durch die Abreicherung von Störstoffen im Stoffstrom. Materialien mit schwankenden NIR-Spektren, wie Inertes, Sortierrest sowie Flusen bzw. Gewölle, können im NIR-Bereich nicht eindeutig unterschieden werden. Bei einem höheren Anteil an Störstoffen im Aufgabegut bedingt das einen erhöhten Austrag in die Produkte. Dem kann durch Abreicherung dieser Fraktionen im Aufgabegut entgegengewirkt werden, was durch die nassmechanische im Vergleich zur trockenmechanischen Aufbereitung besser gelingt. Dieser Effekt kann vor allem bei der Sortierung von Inertmaterialien beobachtet werden. Die Reinheiten der Inertprodukte unterscheiden sich dabei deutlich voneinander,

wobei die der Fraktion aus der trockenmechanischen Aufbereitung um über 50 % unter der des Produkts aus der Nassmechanischen Vorbehandlung liegt. Die Wirtschaftlichkeit der Abtrennung von Inertstoffen ist hinsichtlich der geringen Reinheiten und Ausbringen fragwürdig.

Bei der Abtrennung von Kunststoffen waren ähnliche Ergebnisse auffällig, die Sortierung des Nassmechanisch generierten Schwerguts erzielte eine Reinheit von 19,1 % und stellt damit keine ausreichend angereicherte Wertstofffraktion dar. Auch das Produkt aus dem trockenmechanisch erzeugten Schwergut kann nicht als Sekundärrohstoff eingesetzt werden, wodurch das Ziel bei der Sortierung von Kunststoffen nicht das Erzeugen eines Sekundärrohstoffs, sondern das Abtrennen von Organik für die Deponierung der Restfraktion darstellt. In Hinblick darauf kann durch die stärkere Abreicherung der Kunststoffe im Schwergut der Nassmechanischen Vorbehandlung auch bei ähnlichen Ausbringen ein niedrigerer Kunststoffanteil in der Restfraktion erzielt werden.

Tabelle 19: Vergleich von Reinheit und Ausbringen der erzeugten Produkte.

Produkte	Reinheit		Ausbringen	
	SGf	SGt	SGf	SGt
Starkmagn. Metall	99,7 %	92,9 %	89,8 %	72,3 %
Schwachmagn. Metall	63,9 %	64,9 %	100,0 %	99,1 %
Nichteisen-Metall	64,9 %	51,4 %	84,1 %	71,7 %
Weißglas	84,9 %	79,3 %	95,2 %	83,3 %
Grünglas	85,6 %	83,4 %	66,6 %	50,1 %
Braunglas	91,2 %	75,9 %	71,4 %	46,9 %
Kunststoff	19,1 %	53,9 %	34,2 %	37,2 %
Inertstoffe	71,5 %	20,7 %	33,7 %	39,1 %

In Hinblick auf die Wirtschaftlichkeit von Aufbereitungsanlagen sind Investitions- und Betriebskosten von essentieller Bedeutung. Dabei sind weiters Erlöse und/oder Kosten der erzeugten Fraktionen sowie die Kosten für die bei der Nassmechanischen Aufbereitung notwendige Behandlung des anfallenden Prozesswassers zu erheben und mit einzubeziehen.

Die technischen Vor- bzw. Nachteile der Nassmechanischen Aufbereitung gegenüber der trockenmechanischen können wie folgt zusammengefasst werden:

- + Stärkere Anreicherung von Wertstoffen im Schwergut führt zu einem erhöhten Wertstoffpotenzial.
- + Stärkere Abreicherung von Störstoffen im Schwergut begünstigt die Sortierung.
- + Entfernung von Oberflächenschmutz durch Waschwirkung begünstigt die Sortierung und erleichtert die Erkennung bei VIS- und NIR-Sortierung.
- + Erzeugte Fraktionen haben i.d.R. höhere Reinheiten und Ausbringen.
- + Geringerer aufbereitungstechnischer Aufwand für den Wiedereinsatz der erzeugten Fraktionen.

- + Stärkere Abreicherung der Restfraktion von Organik.
- + Geringere Menge an zu deponierendem Material.
- Behandlung des Prozesswassers notwendig.

7 Verzeichnisse

7.1 Literatur

(07.06.1989) Altlastensanierungsgesetz; ALSAG

Abfallbericht Steiermark (23.06.2017) Jahresbericht 2015; Kommunales Abfallaufkommen der Steiermark

Abfallwirtschaftsgesetz 2002

Amt der Niederösterreichischen Landesregierung (2013) Niederösterreichischer Abfallwirtschaftsbericht 2012

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. Österr Wasser- und Abfallw 69:446–459. doi:10.1007/s00506-017-0420-1

Beel H (2017) Sortierung von schwarzen Kunststoffen nach ihrer Polymerklasse mit Hyperspectral-Imaging-Technologie

Billitewski B, Härdtle G (2013) Abfallwirtschaft; Handbuch für Praxis und Lehre. Springer, Heidelberg

BMNT (2017) Bundesabfallwirtschaftsplan

Bundesministerium für Nachhaltigkeit und Tourismus (2016) Abfallverzeichnis; entsprechend Abfallverzeichnisverordnung, RecyclingholzV, AVV-Novelle 2013 und Recycling-Baustoffverordnung

Bunge R (2012) Mechanische Aufbereitung; Primär- und Sekundärrohstoffe. Wiley-VCH

Europäisches Parlament (18.04.2018) Abfall- und Kreislaufwirtschaft: Mehr Recycling, weniger Müll

Förstner U (2012) Umweltschutztechnik

Institut für nachhaltige Abfallwirtschaft und Entsorgungstechnik (2004) Heizwertreiche Abfallfraktionen aus der mechanischen Abfallbehandlung (MA) und der mechanisch-biologischen Abfallbehandlung (MBA)

IUT S (20.02.2014) Sortieranalysen für Restmüll aus der Steiermark; Endbericht

Kohaupt U (2009) Aspekte bei Auswahl und Anwendung von Wirbelstromscheidern. Berg Huettenmaenn Monatsh 154:160–163. doi:10.1007/s00501-009-0458-x

Kranert M, Cord-Landwehr K (2010) Einführung in die Abfallwirtschaft; Mit 131 Tabellen. Vieweg + Teubner, Wiesbaden

Kranzinger L, Pomberger R, Bauer M, Lehner M, Schwabl D, Flachberger H, Hofer W (2017) Outputorientierte Betrachtung der nass-mechanischen Aufbereitung von polyolefinreichen

Abfällen für das rohstoffliche Recycling. Österr Wasser- und Abfallw 69:460–469.

doi:10.1007/s00506-017-0423-y

Martens H (2011) Recyclingtechnik; Fachbuch für Lehre und Praxis. Spektrum Akademischer Verlag, Heidelberg

Neubauer C, Öhlinger A (2006) Ist-Stand der mechanisch-biologischen Abfallbehandlung (MBA) in Österreich; Zustandsbericht 2006. Umweltbundesamt, Wien

Pretz T, Julius J (2008) Stand der Technik und Entwicklung bei der berührungslosen Sortierung von Abfällen. Österr Wasser- und Abfallw 60:105–112. doi:10.1007/s00506-008-0005-0

S 2097-1 (01.04.2005) Sortieranalyse von Abfällen

S 2097-2 (01.04.2005) Sortieranalyse von Abfällen

S 2097-3 (01.04.2005) Sortieranalyse von Abfällen

S 2097-4 (01.07.2011) Sortieranalyse von Abfällen

Schubert H (Hrsg) (2008) Handbuch der mechanischen Verfahrenstechnik. Wiley-VCH, Weinheim

Schwabl D (14.09.2019) Anteile der erzeugten Fraktionen in Plastic Reborn

Stieß M (2009) Mechanische Verfahrenstechnik - Partikeltechnologie 1. Springer Berlin Heidelberg, Berlin, Heidelberg

StLAWP (2010) Landes-Abfallwirtschaftsplan Steiermark 2010, Graz

van de Winkel F, Schunicht J, Pak C Sortierung von Nichteisenmetallen mit sensorbasierter Sortierung

Wens B, Julius J, Pretz T (2011) Recycling von Nichteisenmetallen aus Siedlungsabfällen: Anforderungen an moderne Aufbereitungstechniken

Wikipedia (Hrsg) Bild: Fichier:HSV color solid cylinder.png — Wikipédia.

https://www.google.com/imgres?imgurl=https%3A%2F%2Fupload.wikimedia.org%2Fwikipedia%2Fcommons%2F4%2F4e%2FHSV_color_solid_cylinder.png&imgrefurl=https%3A%2F%2Ffr.wikipedia.org%2Fwiki%2FFichier%3AHSV_color_solid_cylinder.png&docid=gxxmNVDuu gMOxM&tbnid=CGhV_m0ogGSx2M%3A&vet=1&w=2400&h=1800&bih=584&biw=1280&ved=2ahUKEwizsvo7_rjAhWB6qQKH3pAMkQxiAoA3oECAEQGg&iact=c&ictx=1. Zugegriffen: 11. August 2019

Wotruba H (2008) Stand der Technik der sensorgestützten Sortierung. Berg Huettenmaenn Monatsh 153:221–224. doi:10.1007/s00501-008-0379-0

Wotruba H, Knapp H, Neubert K, Schropp C (2014) Anwendung der sensorgestützten Sortierung für die Aufbereitung mineralischer Rohstoffe. Chemie Ingenieur Technik 86:773–783. doi:10.1002/cite.201300174

7.2 Abkürzungsverzeichnis

°C	Grad Celsius
a	Jahr
abh.	abhängig
ca.	circa
etc.	et cetera
v.a.	vor allem
vgl.	vergleiche
z.Z.	zur Zeit
max.	maximal
min.	minimal
VIS	visuell
NIR	Nah-Infra-Rot
FE	Eisen-Metall
NE	Nicht-Eisen-Metall
KST	Kunststoff
ZKS	Ziegel Keramik Steine
z.g. SA	zerkleinerter gemischter Siedlungsabfall
SGf	Schwergut der nassmechanischen Aufbereitung
SGt	Schwergut der trockenmechanischen Aufbereitung
MGf	Mittelgut der nassmechanischen Aufbereitung
FGt	Feingut der trockenmechanischen Aufbereitung
LGt	Leichtgut der trockenmechanischen Aufbereitung
PET	Polyethylenterephthalat
PP	Polypropylen
PE	Polyethylen
LDPE	Low Density Polyethylen
PS	Polystyrol
EPS	Expandiertes Polystyrol
PA	Polyamid
PVC	Polyvinylchlorid

7.3 Tabellen

Tabelle 1: Zusammensetzung von gemischtem Siedlungsabfall in den Jahren 2004 und 2014 (Förstner 2012); (BMNT 2017).	6
Tabelle 2: Zerkleinerer in der Abfallaufbereitung (Kranert und Cord-Landwehr 2010).	17
Tabelle 3: Siebe in der Abfallaufbereitung (Kranert und Cord-Landwehr 2010).	19
Tabelle 4: Anwendungsgebiete von Sensorsortierern in der Abfallaufbereitung (Kranert und Cord-Landwehr 2010).	34
Tabelle 5: Erzielte Durchsätze bei Sortierung mittels Farbkamera.	60

Tabelle 6: Zusätzliche Sortierfraktionen.....	65
Tabelle 7: Vergleich der Anteile der Sortieranalyse von Restmüll in der Steiermark (mittlere und rechte Spalte) und der Zusammensetzung des zerkleinerten gemischten Siedlungsabfalls (linke Spalte).	68
Tabelle 8: Vergleich der Zusammensetzung von zerkleinertem, nassmechanisch und trockenmechanisch aufbereitetem gemischten Siedlungsabfall.....	71
Tabelle 9: Vergleich der Ausbringen und Reinheiten der stark magnetisierbaren Eisenprodukte.	74
Tabelle 10: Vergleich der Ausbringen und Reinheiten der schwach magnetisierbaren Eisenmetall-Produkte.	75
Tabelle 11: Vergleich der Ausbringen und Reinheiten der NE-Produkte.....	78
Tabelle 12: Vergleich der Ausbringen und Reinheiten der Weißglasprodukte.....	82
Tabelle 13: Vergleich der Ausbringen und Reinheiten der Grünglasprodukte.	86
Tabelle 14: Vergleich der Ausbringen und Reinheiten der Braunglasprodukte.	89
Tabelle 15: Vergleich der Ausbringen und Reinheiten der Kunststoffprodukte.....	93
Tabelle 16: Ausbringen und Reinheit der Inertprodukte.....	96
Tabelle 17: Vergleich der im zerkleinerten, nass- sowie trockenmechanisch aufbereiteten gemischten Siedlungsabfälle enthaltenen Wertstoffmengen in Österreich.....	99
Tabelle 18: Vergleich der theoretisch erzeugbaren Fraktionen bei der nass- und trockenmechanischen Aufbereitung der in Österreich und der Steiermark anfallenden gemischten Siedlungsabfälle.....	100
Tabelle 19: Vergleich von Reinheit und Ausbringen der erzeugten Produkte.....	105

7.4 Abbildungen

Abbildung 1: Gesamtabfallaufkommen (links) und Zusammensetzung der Siedlungsabfälle (rechts) in Österreich 2015 (Quelle: BMNT 2017; BMNT 2017).....	8
Abbildung 2: Zusammensetzung des steirischen Restmülls 2013 in Prozent (IUT 20.02.2014).....	11
Abbildung 3: Restmüllaufkommen in der Steiermark 1990 - 2015 in kg/EW (Abfallbericht Steiermark 23.06.2017).....	12
Abbildung 4: Behandlungswege von gemischten Siedlungsabfällen aus Haushalten und ähnlichen Einrichtungen in der Steiermark 2008 (StLAWP 2010).....	15
Abbildung 5: Prinzipieller Aufbau eines Linearschwingsiebes (Kranert und Cord-Landwehr 2010).....	20
Abbildung 6: Trennkriterien und Sortiermaschinentypen (Kranert und Cord-Landwehr 2010).	21

Abbildung 7: Übersicht trockener und nasser Dichtesortierverfahren (Bunge 2012).	22
Abbildung 8: Setzprozesses in einer Kolbenetzmaschine (rechts: von oben) (Bunge 2012).	24
Abbildung 9: Trennung in einem Zick-Zack-Sichter (a) Aufbau, (b) Trennprinzip im Einkanalsichter, (c) Mehrkanalsichter (Stieß 2009).....	26
Abbildung 10: Einteilung und Übersicht unterschiedlicher Magnetscheider (Schubert 2008).	28
Abbildung 11: Aufbau und Funktionsweise eines Wirbelstromscheiders (Kranert und Cord- Landwehr 2010).	29
Abbildung 12: Grundprinzip eines Sensorsortierers (van de Winkel et al.).....	31
Abbildung 13: Sensorsortierer mit Förderband (1) links und mit Rutsche (1) rechts (2 Sensoreinheit, 3 Datenverarbeitung, 4 Düsenleiste) (Wotruba 2008; Wotruba 2008). ...	32
Abbildung 14: VIS-Sortierer mit Sensorbild (Quelle: Beel 2017).	35
Abbildung 15: Kunststoffe mit spektraler Intensität (erste Ableitung) im NIR-Bereich (Beel 2017).....	36
Abbildung 16: Aufbau und Spektrum eines HSI-Sensors (Beel 2017).....	37
Abbildung 17: Lasertriangulation mit 3D-Bild (Beel 2017).....	37
Abbildung 18: Sortierer mit Induktionssensor (Kranert und Cord-Landwehr 2010).....	39
Abbildung 19: Sortierer mit Röntgentransmissions-Sensor und Röntgenbild (Beel 2017).	40
Abbildung 20: Sortierer mit Röntgenfluoreszenz-Sensor und Energiespektrum (Beel 2017).40	
Abbildung 21: Ablauf einer Sortieranalyse (links) und Analyseauswertung (rechts) nach ÖNORM S 2097 (Quelle: S 2097-2 (01.04.2005); S 2097-4 (01.07.2011)).	43
Abbildung 22: Ablauf bei der Aufbereitung von Abfällen (Martens 2011). Bei dem eingesetzten Material handelte es sich um gemischten Siedlungsabfall aus Haushalten (ohne Gewerbeabfall) aus dem Raum Leoben, der im Rahmen des Projekts „Plastic Reborn“ auf dessen Polyolefingehalt untersucht wurde. Auf die Zusammensetzung des Originalmaterials wird in Kapitel 5 eingegangen.	47
Abbildung 23: Fließschema der Aufbereitung (eigene Darstellung). Der Restmüll wurde über die schwarze Tonne gesammelt und von einem Aufbereiter auf < 20 mm zerkleinert. Dabei kam ein Einwellenzerkleinerer zum Einsatz, der insgesamt 300 kg Restmüll behandelte.	48
Abbildung 24: Fließschema der Sortierung im Detail (eigene Darstellung).	49
Abbildung 25: Fließschema der Pilotanlage Plastic Reborn (Bauer et al. 2017).	50
Abbildung 26: Aufnahme der Anlage aus dem Projekt „Plastic Reborn“ (Schwabl 14.09.2019).	51

Abbildung 27: Teile des Inputmaterials vor der Teilung (eigene Aufnahme).	52
Abbildung 28: Eingesetzter Zick-Zack-Sichter (eigene Aufnahme).	53
Abbildung 29: Handsiebung, links: zerkleinertes Inputmaterial, rechts: verwendetes Werkzeug (eigene Aufnahme).	53
Abbildung 30: Erster Sortierschritt – Abtrennung von Eisen-Metallen (eigene Darstellung). .	54
Abbildung 31: Eingesetzter Schwachfeldmagnetscheider (eigene Aufnahme).	55
Abbildung 32: Eingesetzter Starkfeldmagnetscheider (eigene Aufnahme).	57
Abbildung 33: Eingesetzter sensorgestützter Sortierer (eigene Aufnahme).	58
Abbildung 34: Zweiter Sortierschritt - Abtrennung Nicht-Eisen-Metalle (eigene Darstellung).	58
Abbildung 35: Dritter Sortierschritt – Abtrennung von Altglas (eigene Darstellung).	59
Abbildung 36: HSV-Farbraum (Wikipedia).	59
Abbildung 37: Vierter Sortierschritt - Abtrennung von Kunststoffen und Inertmaterialien (eigene Darstellung).	61
Abbildung 38: Auswahl des gemittelten NIR-Spektrums für PVC (eigene Darstellung).	61
Abbildung 39: Erstelltes Klassifikationsmodell für die Sortierung von Kunststoffen (eigene Darstellung).	62
Abbildung 40: Probleme bei der Klassifizierung von Steinen durch stark schwankendes Spektrum (links) und Klassifizierung von Kunststoffen in pinker Farbe und nicht erkannte Kunststoffpartikel in gelber Farbe (rechts) (eigene Darstellung).	63
Abbildung 41: Zerkleinerter gemischter Siedlungsabfall (eigene Aufnahme).	66
Abbildung 42: Zusammensetzung des zerkleinerten gemischten Siedlungsabfalls (eigene Darstellung).	67
Abbildung 43: Schwergut der nassmechanischen (links) und der trockenmechanischen Aufbereitung (rechts) (eigene Darstellung).	69
Abbildung 44: Zusammensetzung des Schwerguts aus der nassmechanischen Aufbereitung (eigene Darstellung).	70
Abbildung 45: Zusammensetzung des Schwerguts aus der trockenmechanischen Aufbereitung (eigene Darstellung).	71
Abbildung 46: Stark magnetisierbare Eisenprodukte des nass- (links) und trockenmechanisch (rechts) aufbereiteten Siedlungsabfall (eigene Aufnahme).	72
Abbildung 47: Hauptbestandteile der stark magnetisierbaren Eisenprodukte (eigene Darstellung).	73

Abbildung 48: Schwach magnetisierbare Eisen-Produkte des nass- (links oben) und trockenmechanisch (links unten) aufbereiteten Siedlungsabfalls mit den Resten der Magnetscheidung (rechts) (eigene Aufnahme).....	74
Abbildung 49: Hauptbestandteile der schwach magnetisierbaren Eisenprodukte (eigene Darstellung).....	75
Abbildung 50: NE-Metallprodukte (links) der nass- (oben) und trockenmechanisch (unten) erzeugten Schwergutfraktion mit den Resten (rechts) (eigene Aufnahme).	77
Abbildung 51: Hauptbestandteile der NE-Produkte (eigene Darstellung).....	78
Abbildung 52: Beispiele nicht ausgetragener NE-Metallteile (eigene Aufnahme).....	79
Abbildung 53: Weißglasprodukte des nass- (links) und trockenmechanisch (rechts) aufbereiteten Siedlungsabfalls (eigene Aufnahme).....	81
Abbildung 54: Hauptbestandteile der Weißglasprodukte (eigene Darstellung).....	82
Abbildung 55: Nicht erkannte Weißglaspartikel (nassmechanisch - links; trockenmechanisch - rechts) (eigene Aufnahme).....	83
Abbildung 56: Grünglasprodukte der nass- (links) und trockenmechanisch (rechts) generierten Schwergutfraktion.....	85
Abbildung 57: Hauptbestandteile der Grünglasprodukte (eigene Darstellung).....	86
Abbildung 58: Nicht erkannte Grünglaspartikel des nass- (links) und trockenmechanisch aufbereiteten Materials (sauber - mittig; verschmutzt - rechts) (eigene Darstellung).....	87
Abbildung 59: Braunglasprodukt des nass- (links) und trockenmechanisch (rechts) aufbereiteten gemischten Siedlungsabfalls.	88
Abbildung 60: Hauptbestandteile der Braunglasprodukte (eigene Darstellung).	89
Abbildung 61: Nicht erkannte Braunglaspartikel des nass- (links) und trockenmechanisch aufbereiteten Materials (sauber - mittig; verschmutzt - rechts) (eigene Aufnahme).....	90
Abbildung 62: Fremdglas im Rest nach Braunglassortierung (nassmechanische Linie - links; trockenmechanische Linie - rechts).....	92
Abbildung 63: Kunststoffprodukte des nass- (links oben) und trockenmechanisch (links unten) aufbereiteten gemischten Siedlungsabfalls mit Restfraktionen (rechts) (eigene Aufnahme).	92
Abbildung 64: Hauptbestandteile der Kunststoffprodukte (eigene Darstellung).....	93
Abbildung 65: Spektrum der nicht erkannten Kunststoffpartikel im nassmechanisch aufbereiteten Schwergut (eigene Darstellung).....	94
Abbildung 66: Inertprodukte des nass- (links) und trockenmechanisch (rechts) aufbereiteten Schwergutes (eigene Aufnahme).	95
Abbildung 67: Hauptbestandteile der Inertprodukte (eigene Darstellung).	96

Abbildung 68: Restprodukte der Sortierschritte des nass- (links) und trockenmechanisch (rechts) aufbereiteten Siedlungsabfalls (eigene Aufnahme).....	98
Abbildung 69: Hauptbestandteile der Restprodukte (eigene Darstellung).	98
Abbildung 70: Verwertbare Fraktionen ohne zusätzlich notwendigen Aufbereitungsschritt (grün), nach einem Aufbereitungsschritt (gelb), nach mehreren Schritten (orange) und nicht verwertbare Fraktionen (rot) aus nass- (links) und trockenmechanisch (rechts) generiertem Schwergut bezogen auf den in Österreich jährlich anfallenden gemischten Siedlungsabfall (eigene Darstellung).	101
Abbildung 71: Zusammensetzung der stark magnetisierbaren Eisenmetalle (eigene Darstellung).....	I
Abbildung 72: Zusammensetzung der schwach magnetisierbaren Eisenmetalle (eigene Darstellung).....	I
Abbildung 73: Zusammensetzung der NE-Produkte (eigene Darstellung).	II
Abbildung 74: Zusammensetzung der Weißglasprodukte (eigene Darstellung).	II
Abbildung 75: Zusammensetzung der Grünglasprodukte (eigene Darstellung).	III
Abbildung 76: Zusammensetzung der Braunglasprodukte (eigene Darstellung).	III
Abbildung 77: Zusammensetzung der Kunststoffprodukte (eigene Darstellung).	IV
Abbildung 78: Zusammensetzung der Inertprodukte (eigene Darstellung).	IV
Abbildung 79: Zusammensetzung der Restprodukte (eigene Darstellung).	V
Abbildung 80: Massenflussanalyse der Sortierversuche in kg/h·m (eigene Darstellung).	VI
Abbildung 81: Stoffflussanalyse der Eisen-Metalle in kg/h·m (eigene Darstellung).	VII
Abbildung 82: Stoffflussanalyse der NE-Metalle in kg/h·m (eigene Darstellung).	VIII
Abbildung 83: Stoffflussanalyse von Weißglas in kg/h·m (eigene Darstellung).	IX
Abbildung 84: Stoffflussanalyse von Grünglas in kg/h·m (eigene Darstellung).	X
Abbildung 85: Stoffflussanalyse von Braunglas in kg/h·m (eigene Darstellung).	XI
Abbildung 86: Stoffflussanalyse von Kunststoff in kg/h·m (eigene Darstellung).	XII
Abbildung 87: Stoffflussanalyse von Inertstoffen in kg/h·m (eigene Darstellung).	XIII
Abbildung 88: Stoffflussanalyse von Flusen (links) bzw. Gewölle (rechts) in kg/h·m (eigene Darstellung).....	XIV
Abbildung 89: Stoffflussanalyse des Sortierrests in kg/h·m (eigene Darstellung).	XV
Abbildung 90: Stoffflussanalyse der Feinfraktion in kg/h·m (eigene Darstellung).	XVI
Abbildung 91: Massenbilanz bezogen auf das Gesamtaufkommen des Restmülls in Österreich (eigene Darstellung).	XVII

Abbildung 92: Massenbilanz bezogen auf das Gesamtabfallaufkommen des Restmülls in der Steiermark (eigene Darstellung)XVIII

Anhang

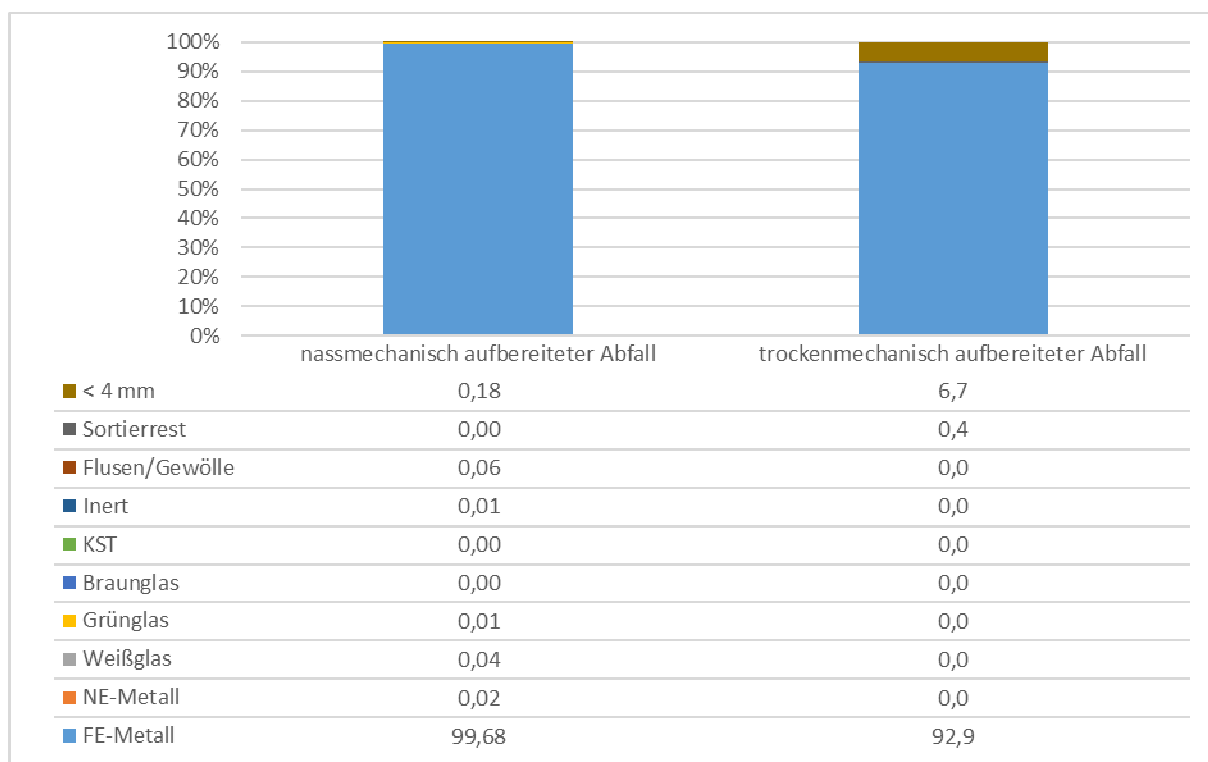


Abbildung 71: Zusammensetzung der stark magnetisierbaren Eisenmetalle (eigene Darstellung).

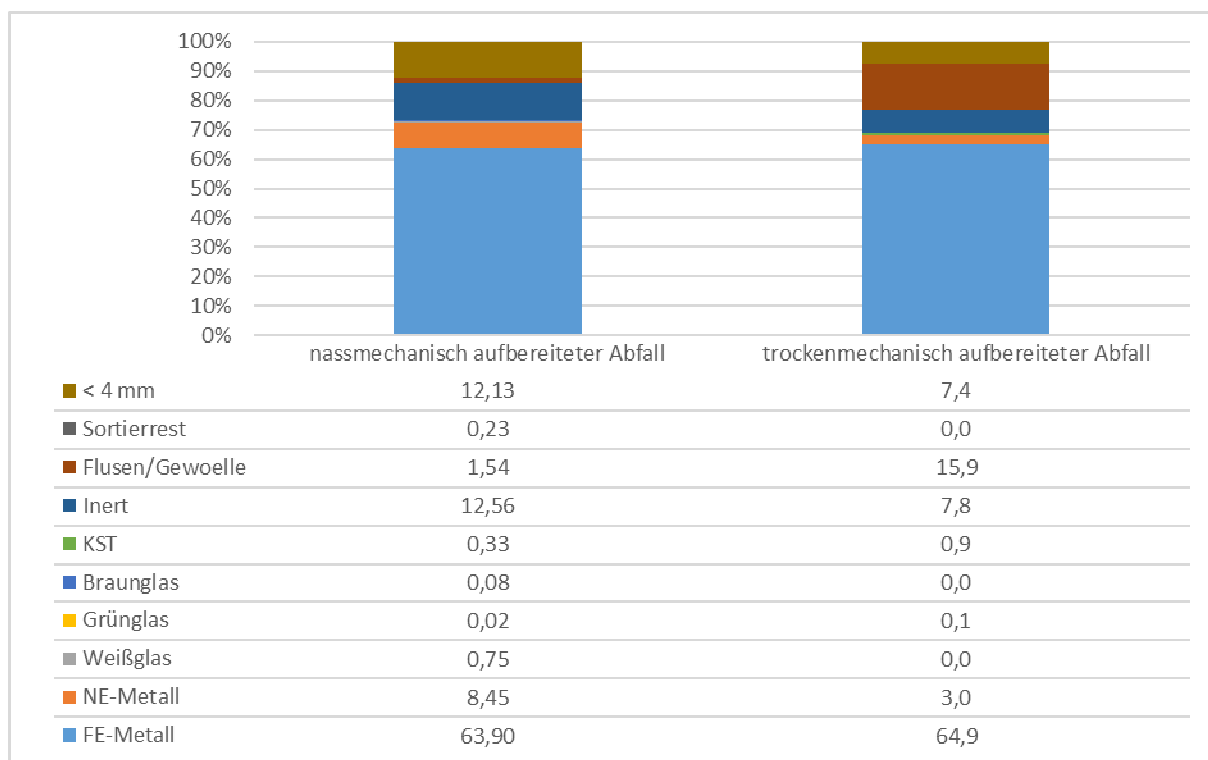


Abbildung 72: Zusammensetzung der schwach magnetisierbaren Eisenmetalle (eigene Darstellung).

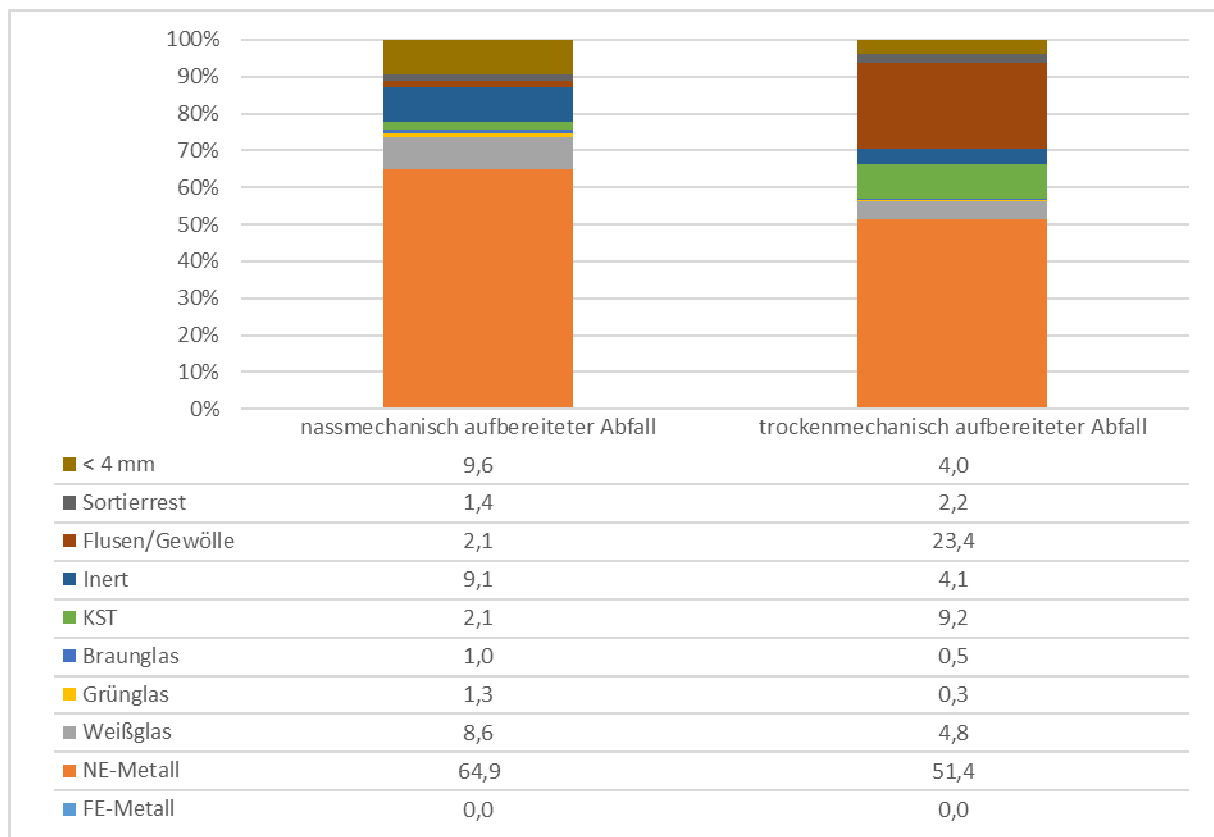


Abbildung 73: Zusammensetzung der NE-Produkte (eigene Darstellung).

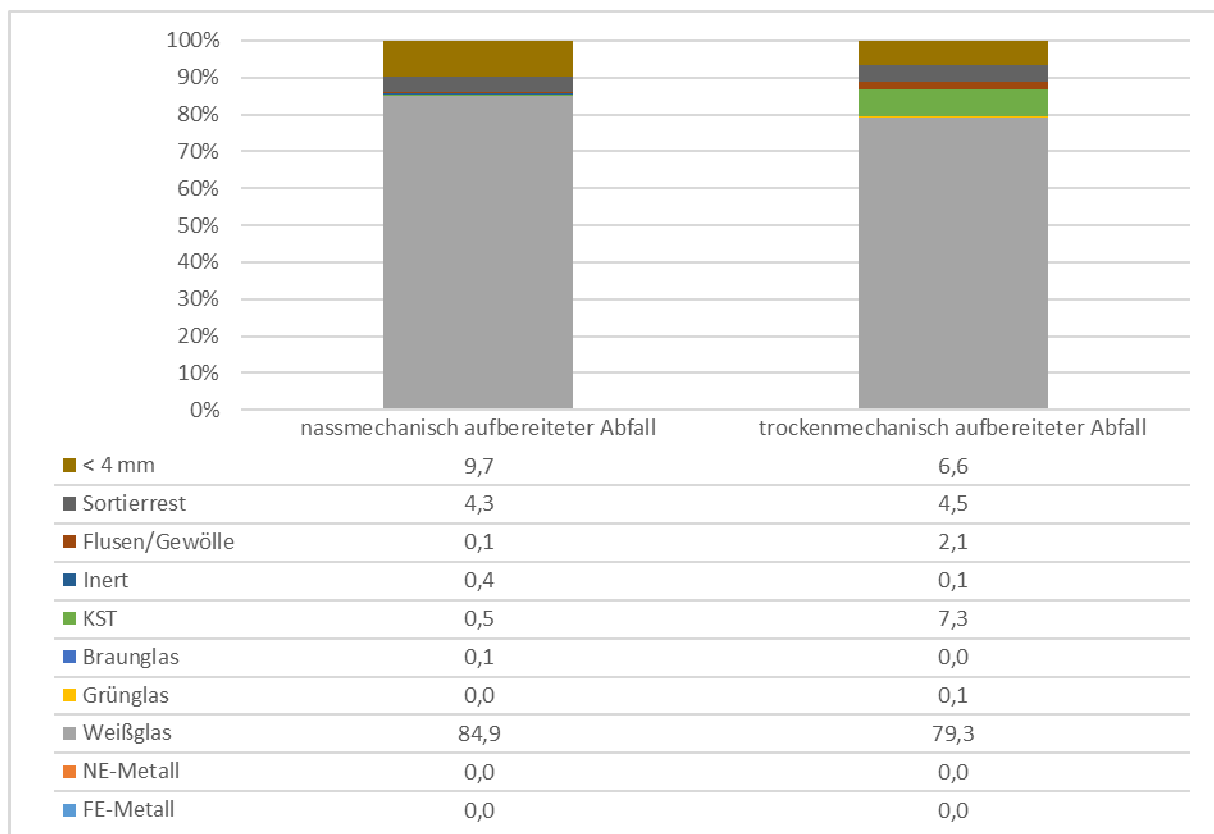


Abbildung 74: Zusammensetzung der Weißglasprodukte (eigene Darstellung).

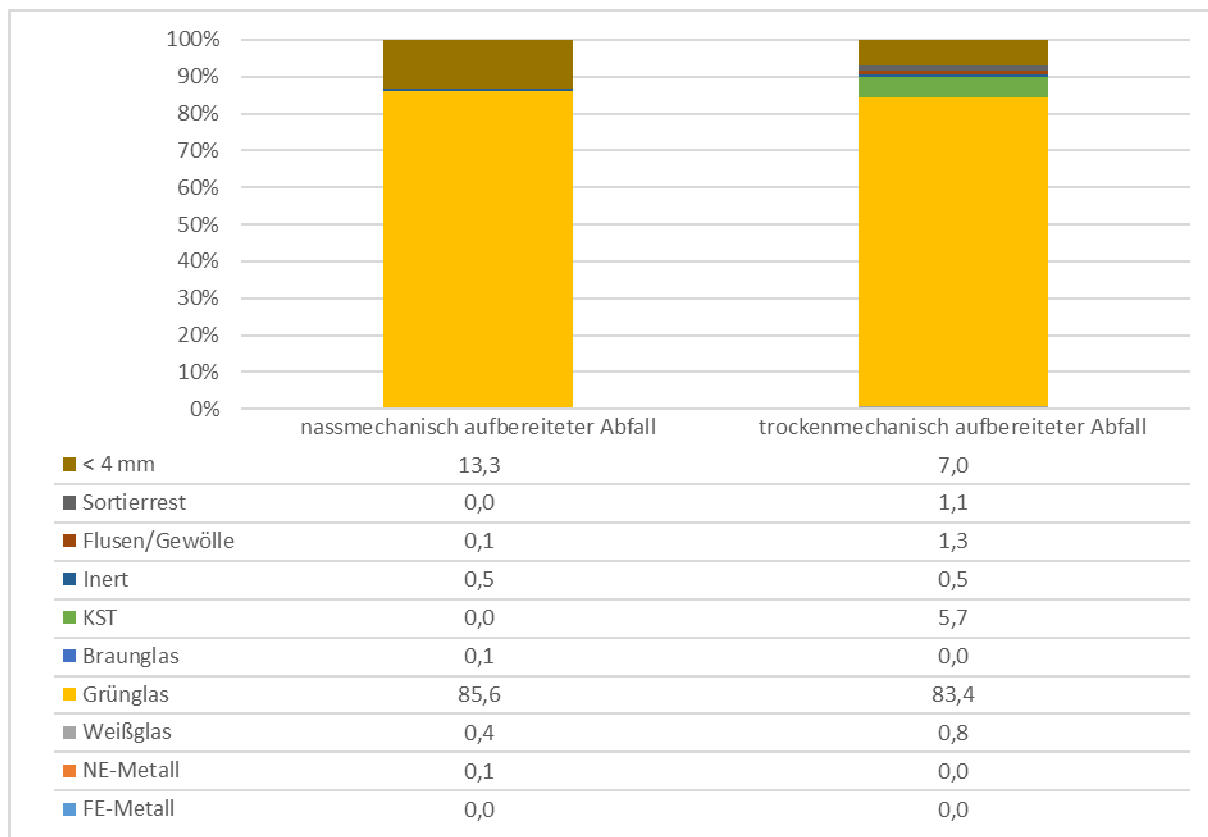


Abbildung 75: Zusammensetzung der Grünglasprodukte (eigene Darstellung).

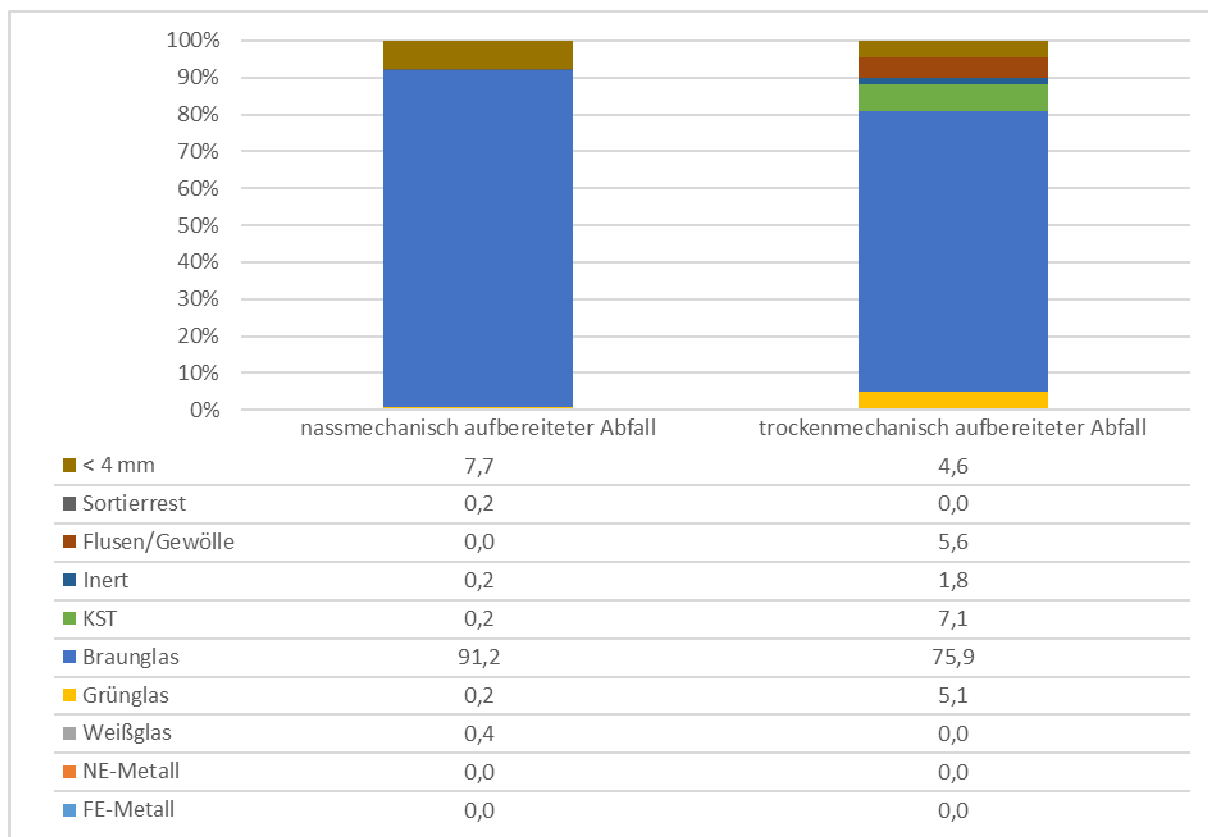


Abbildung 76: Zusammensetzung der Braunglasprodukte (eigene Darstellung).

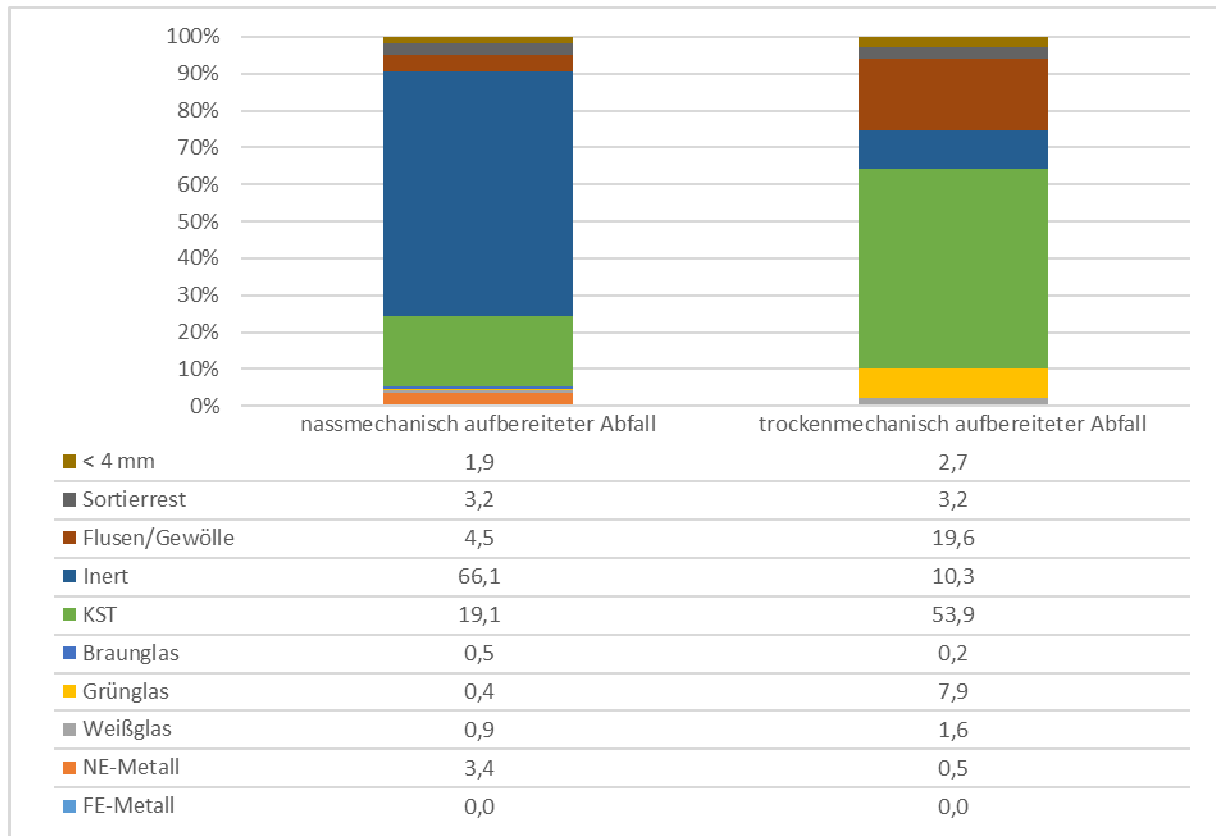


Abbildung 77: Zusammensetzung der Kunststoffprodukte (eigene Darstellung).

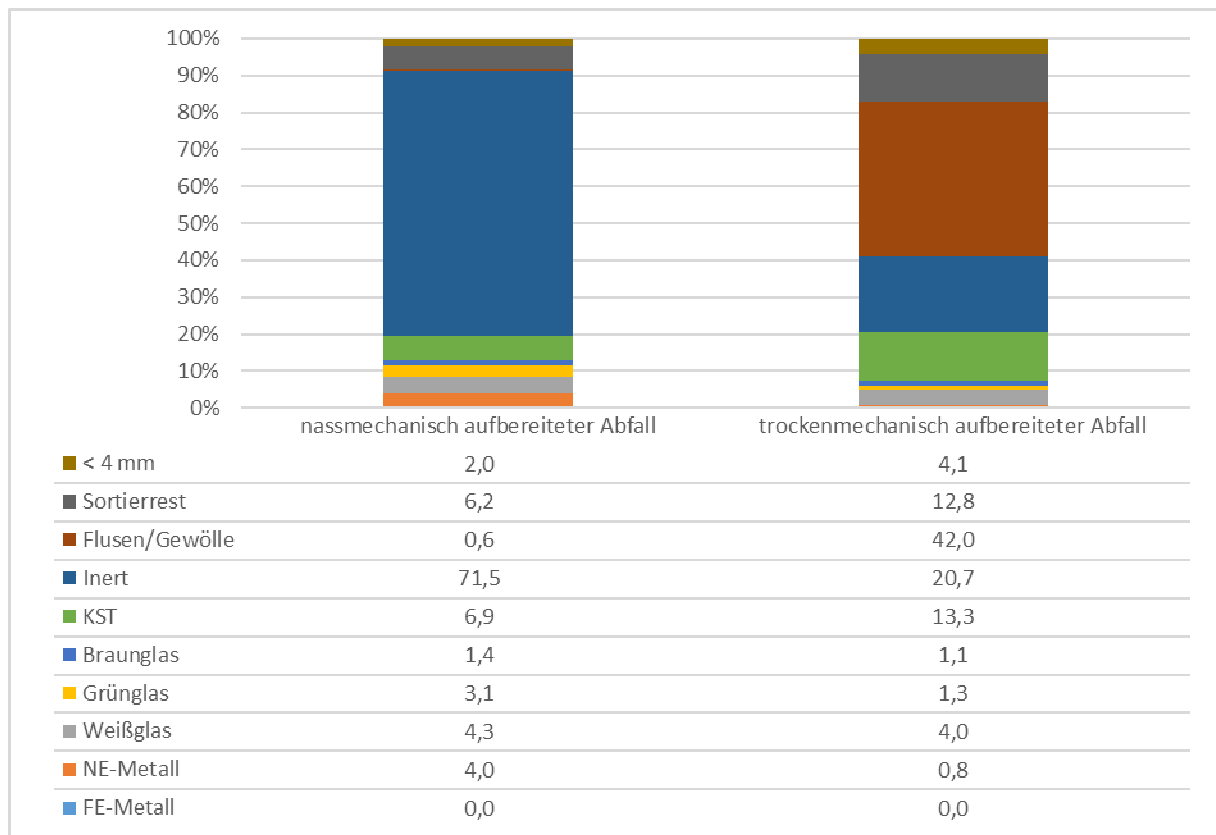


Abbildung 78: Zusammensetzung der Inertprodukte (eigene Darstellung).

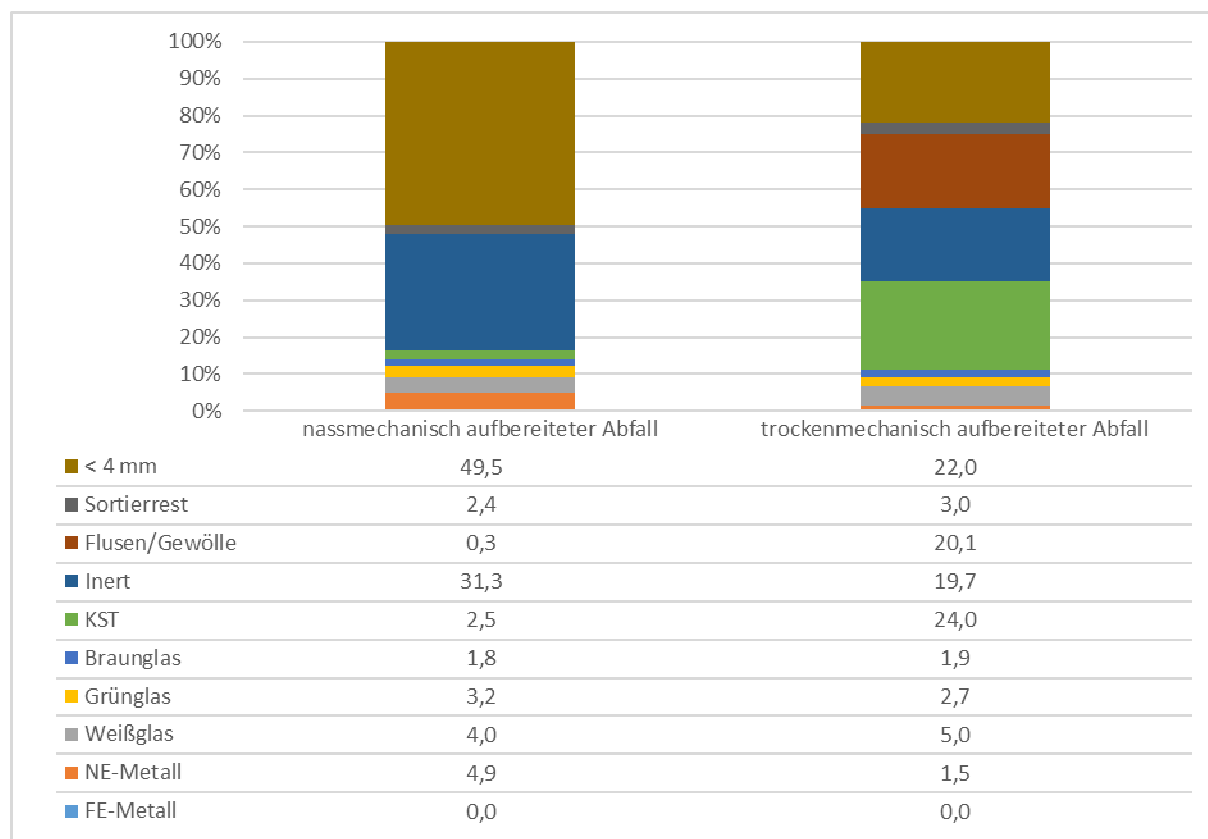


Abbildung 79: Zusammensetzung der Restprodukte (eigene Darstellung).

Fließbild Vergleich Nass-/Trockenmechanische Aufbereitung

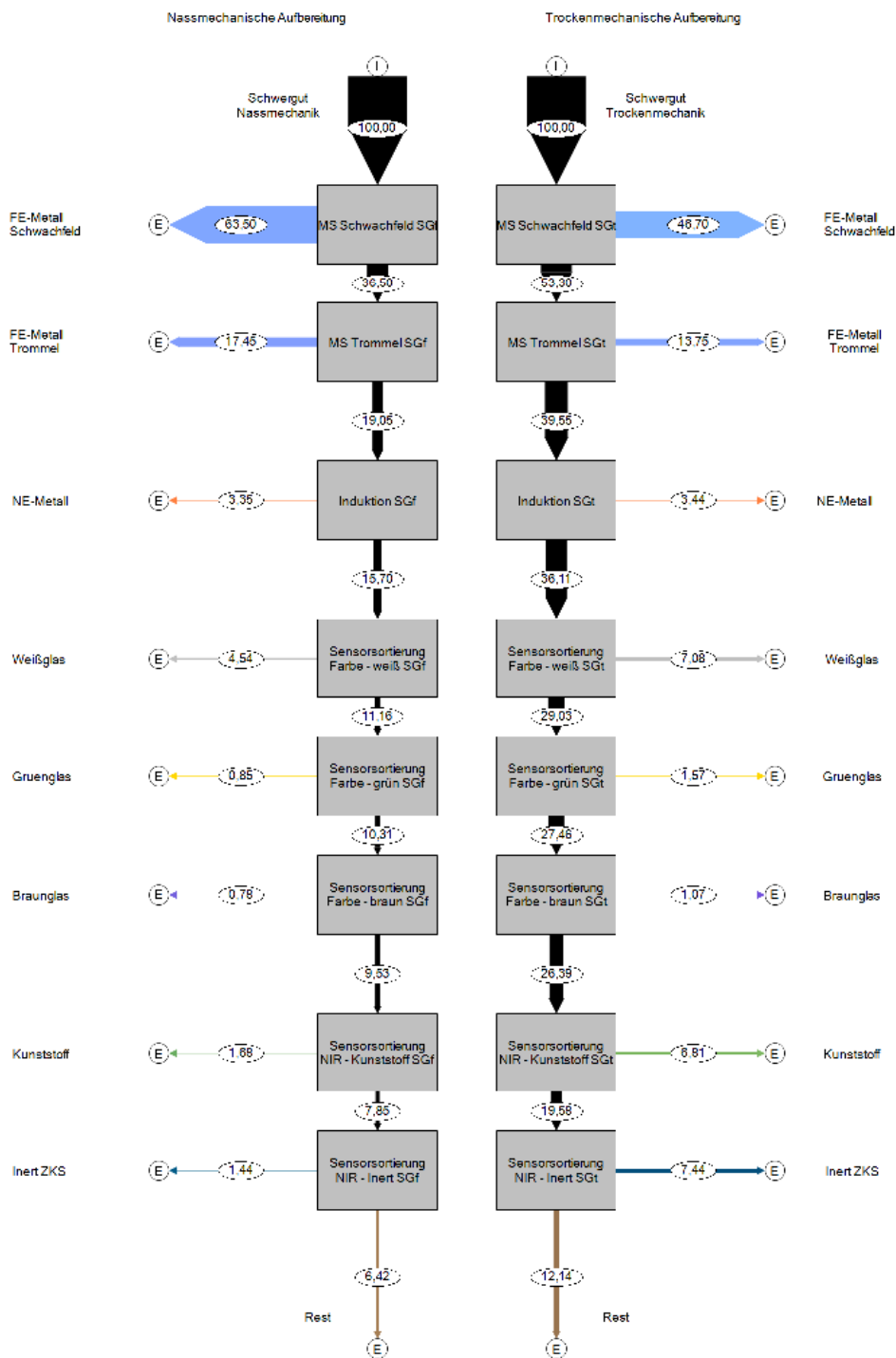


Abbildung 80: Massenflussanalyse der Sortierversuche in kg/h·m (eigene Darstellung).

Fließbild Vergleich Nass-/Trockenmechanische Aufbereitung

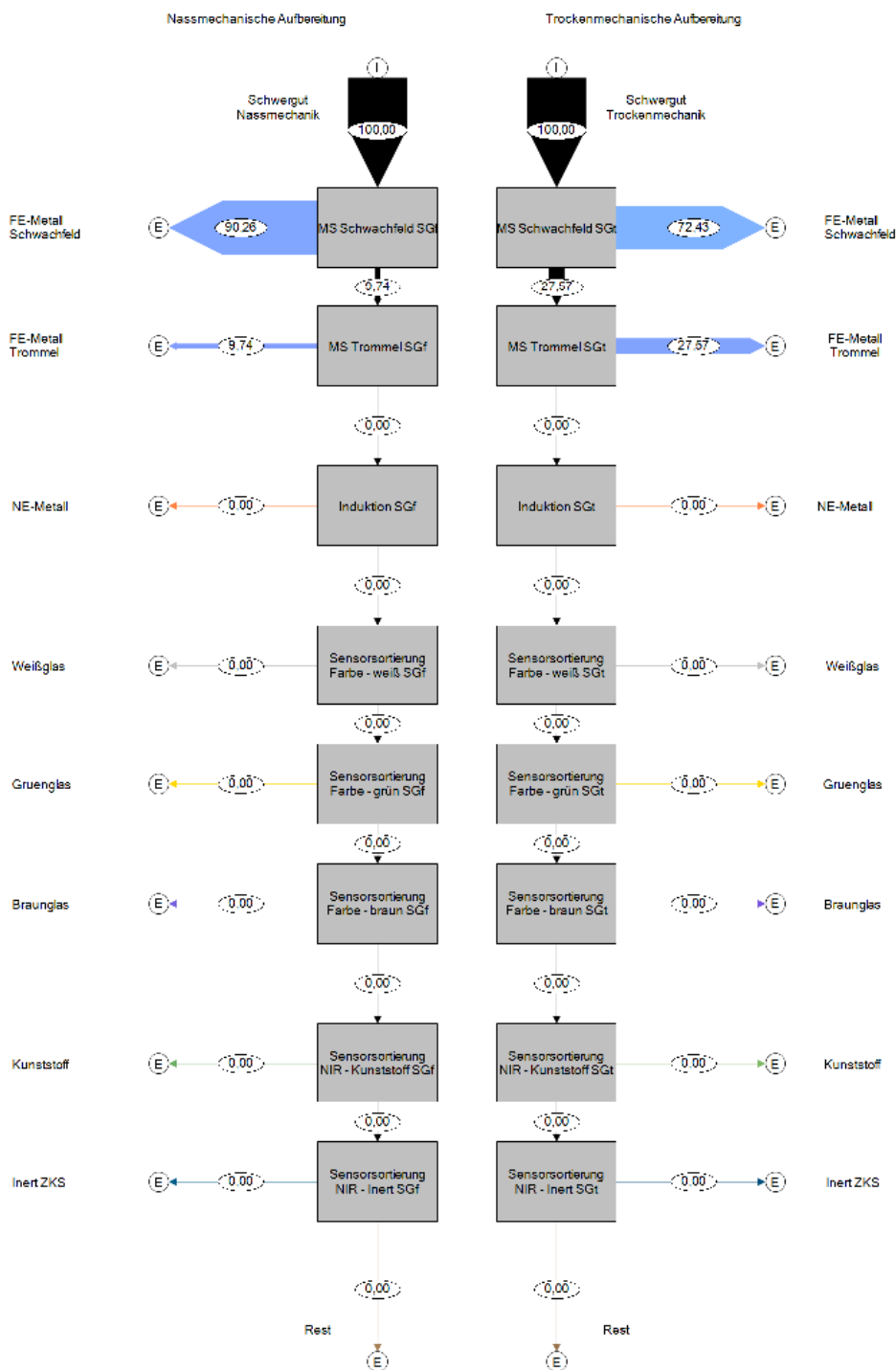


Abbildung 81: Stoffflussanalyse der Eisen-Metalle in kg/h·m (eigene Darstellung).

Fließbild Vergleich Nass-/Trockenmechanische Aufbereitung

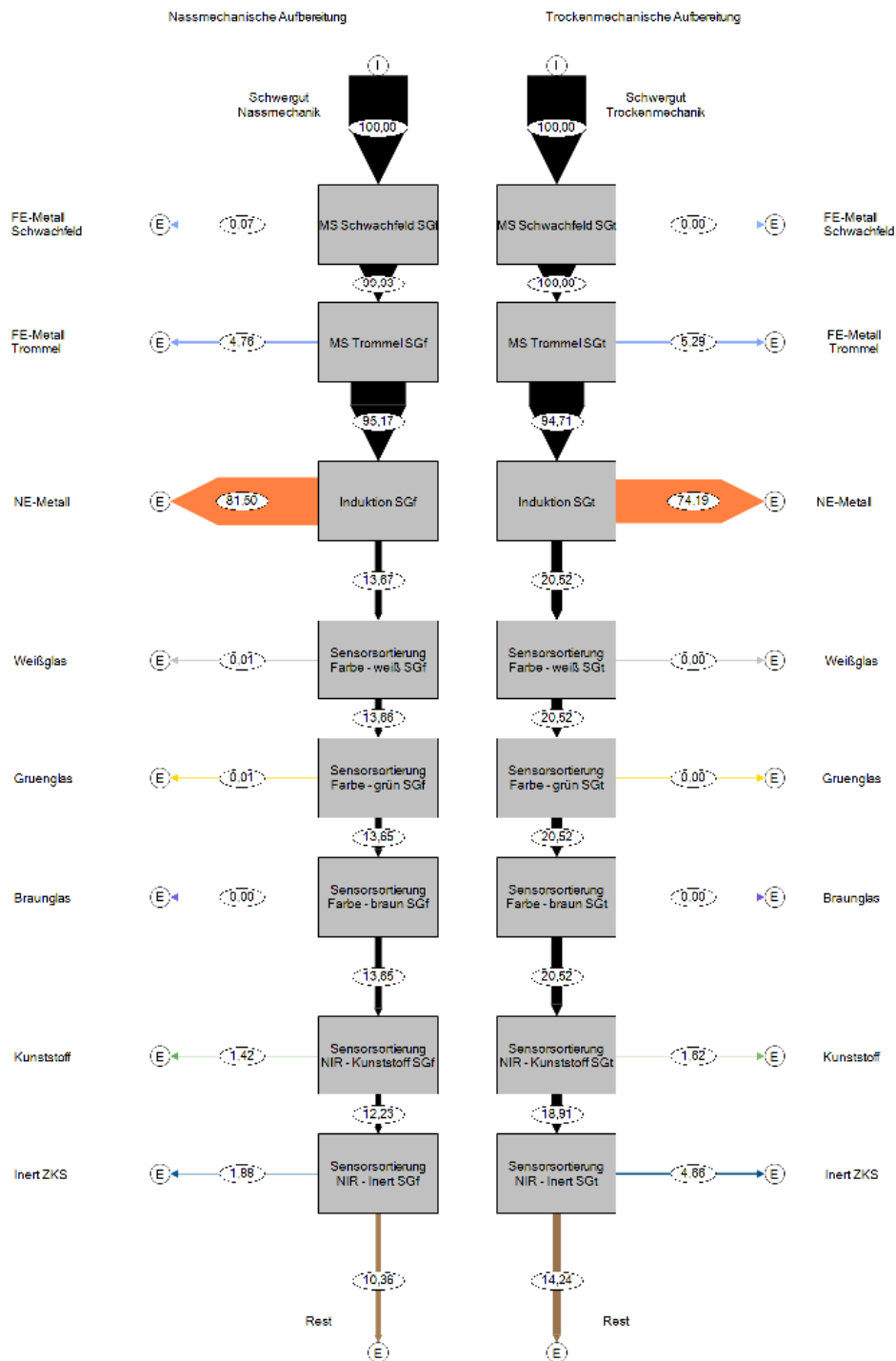


Abbildung 82: Stoffflussanalyse der NE-Metalle in kg/h·m (eigene Darstellung).

Fließbild Vergleich Nass-/Trockenmechanische Aufbereitung

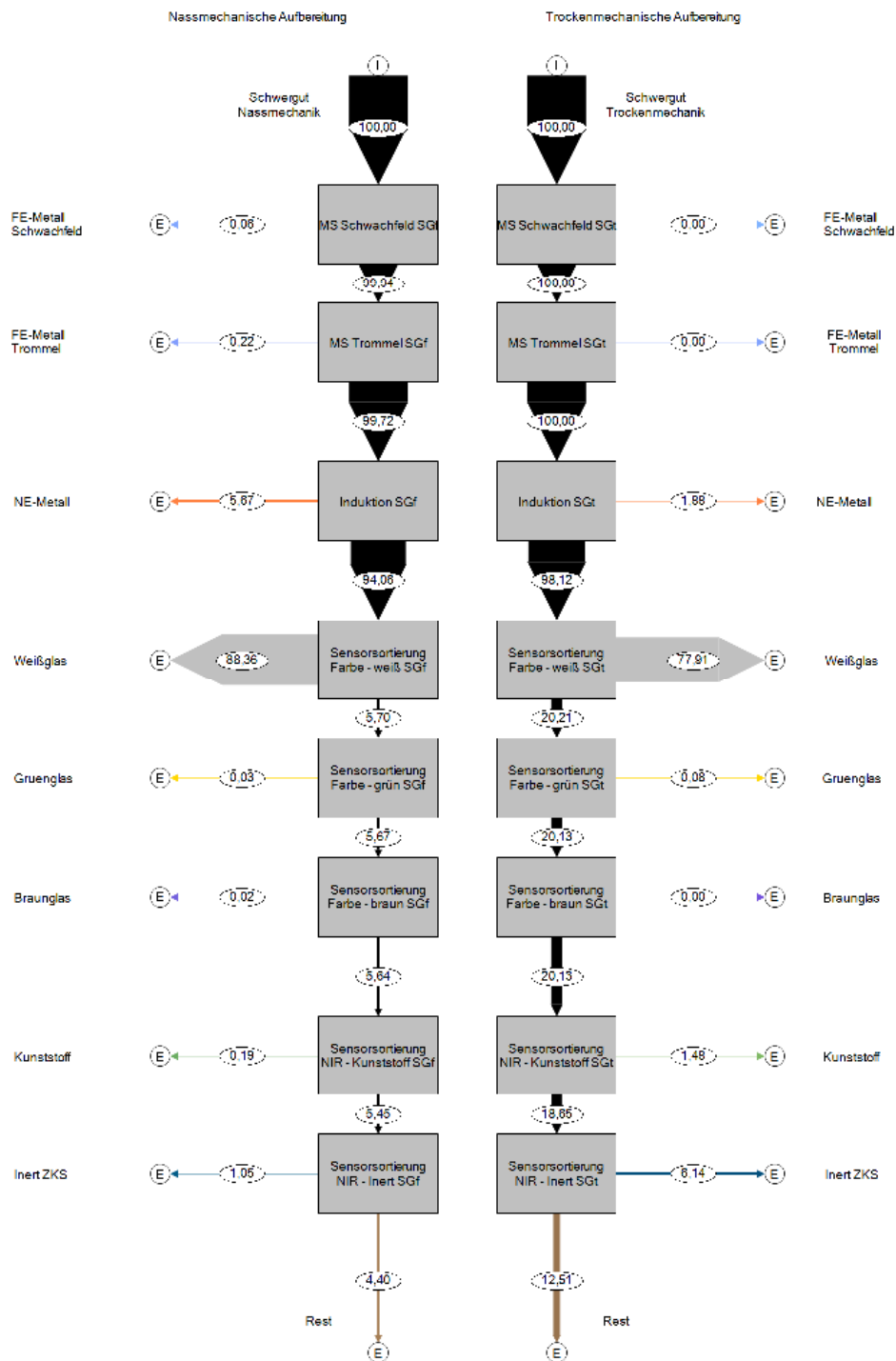


Abbildung 83: Stoffflussanalyse von Weißglas in kg/h-m (eigene Darstellung).

Fließbild Vergleich Nass-/Trockenmechanische Aufbereitung

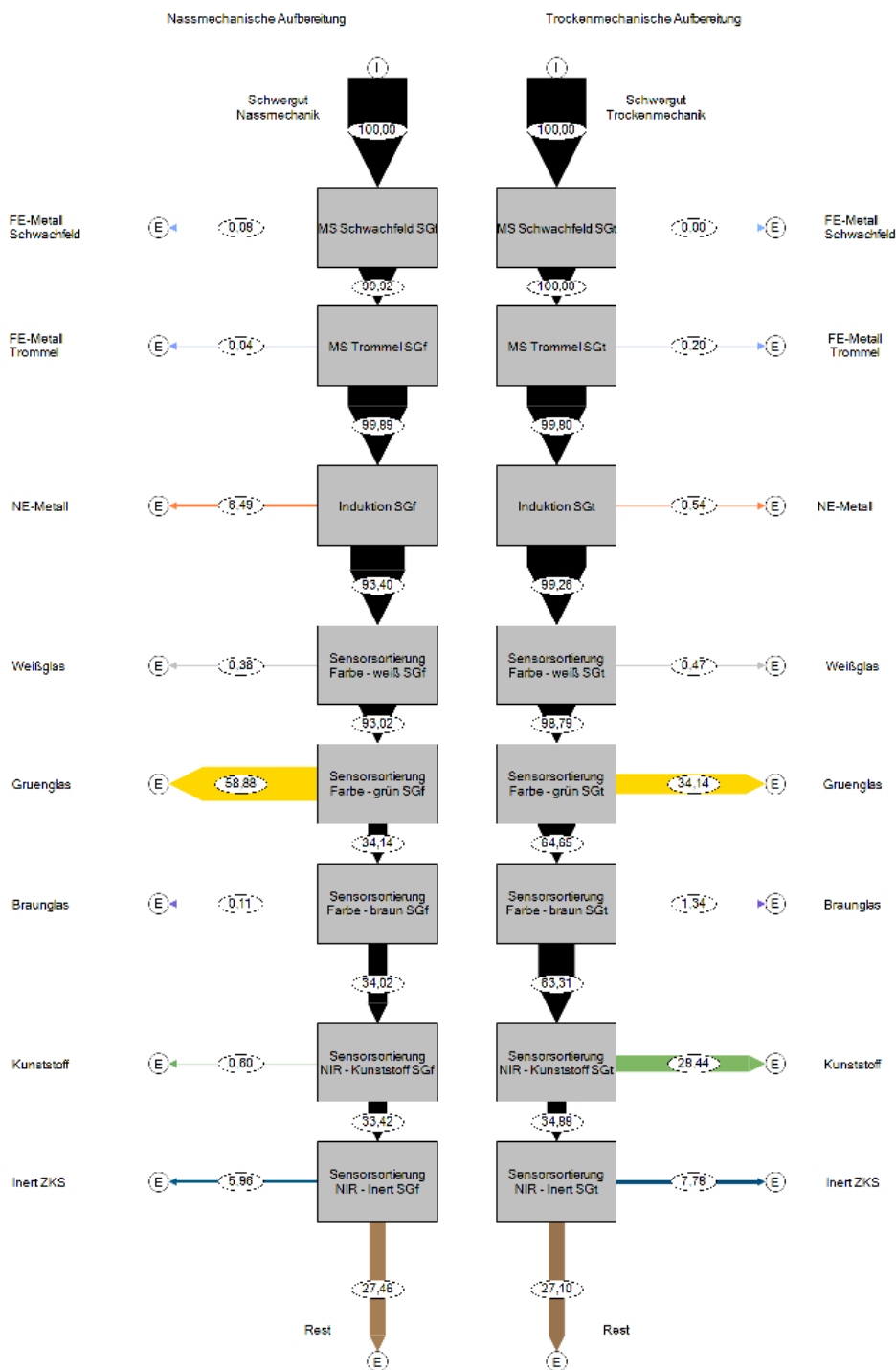


Abbildung 84: Stoffflussanalyse von Grünglas in kg/h-m (eigene Darstellung).

Fließbild Vergleich Nass-/Trockenmechanische Aufbereitung

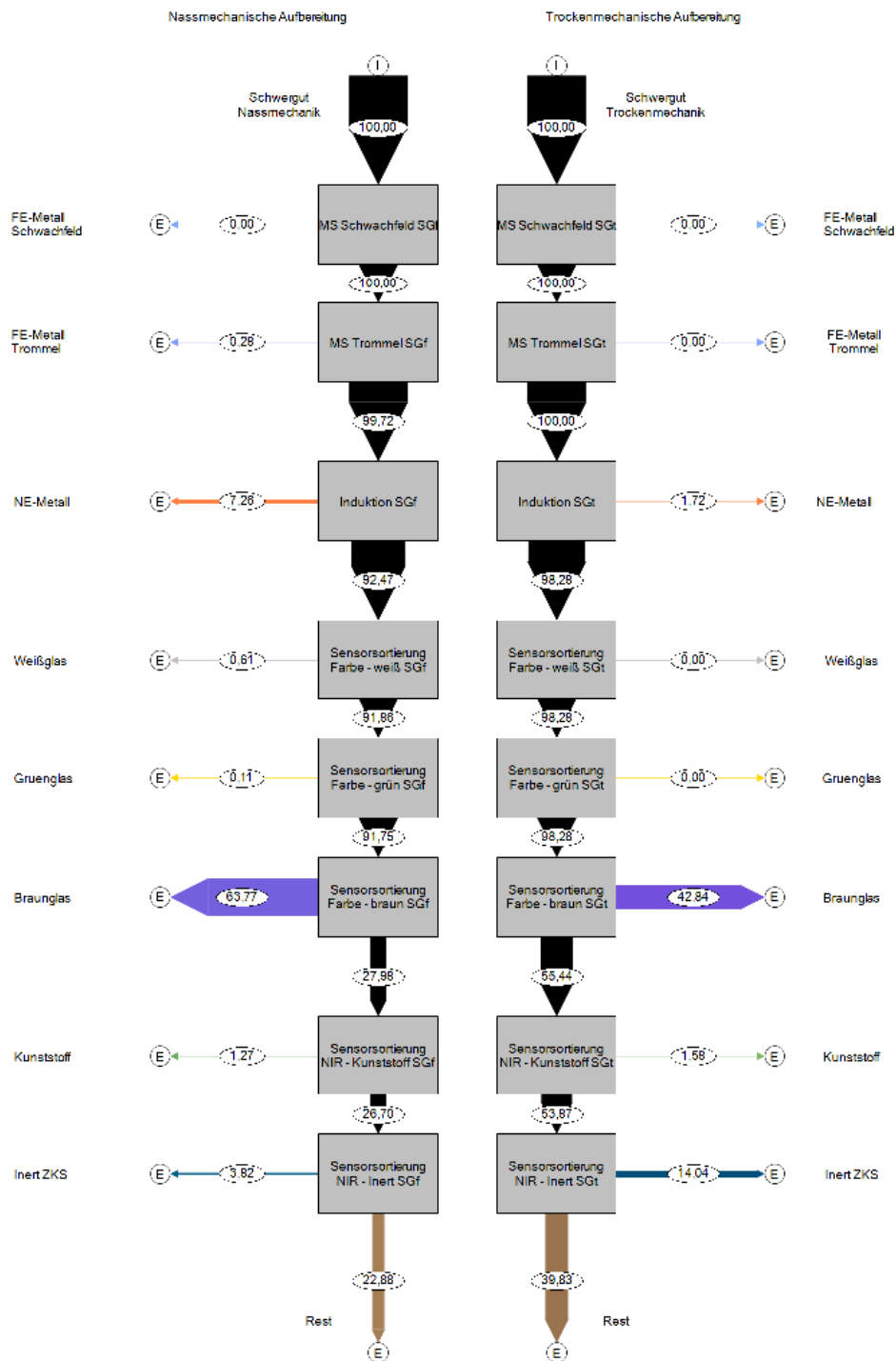


Abbildung 85: Stoffflussanalyse von Braunglas in kg/h·m (eigene Darstellung).

Fließbild Vergleich Nass-/Trockenmechanische Aufbereitung

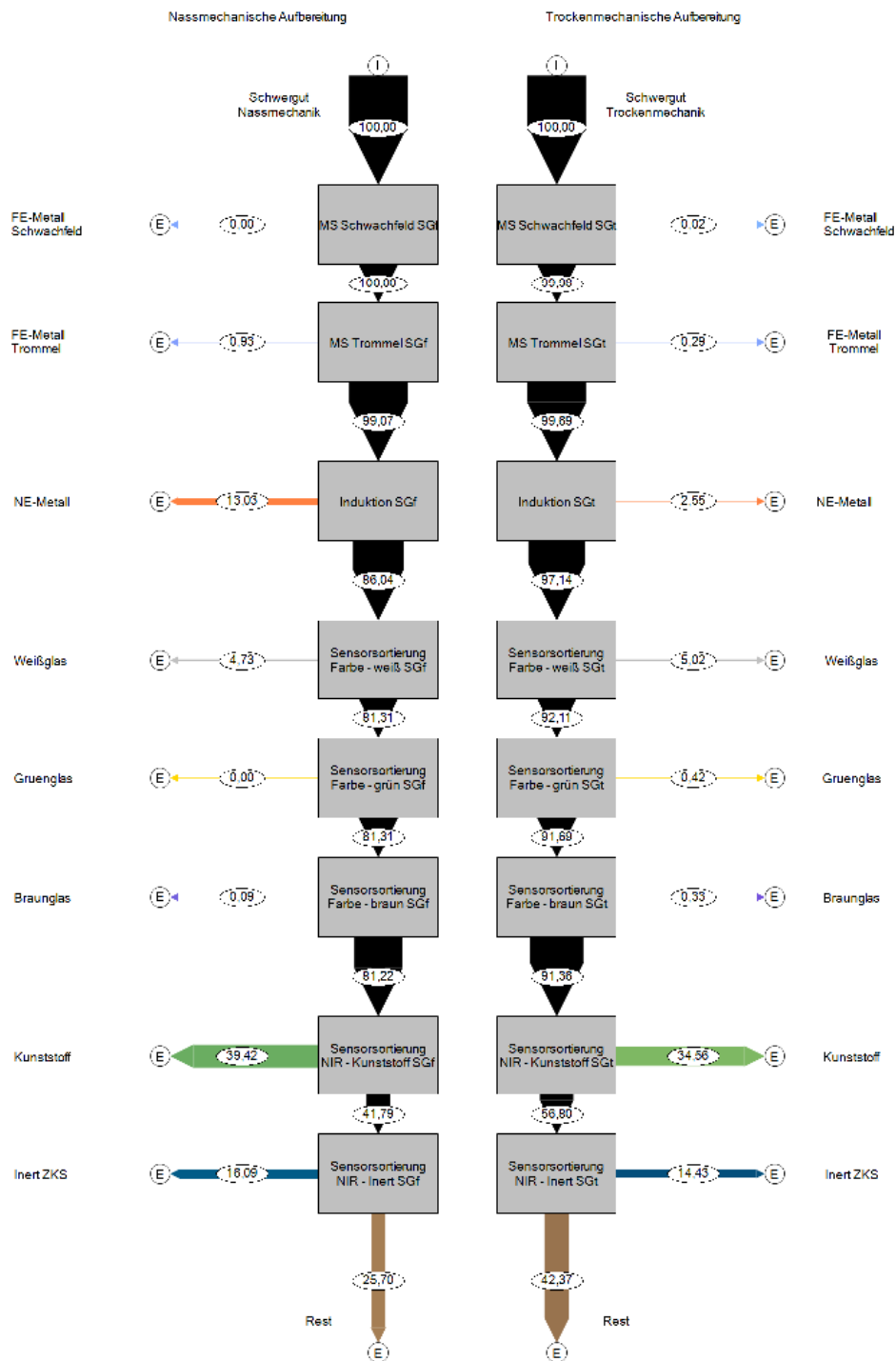


Abbildung 86: Stoffflussanalyse von Kunststoff in kg/h·m (eigene Darstellung).

Fließbild Vergleich Nass-/Trockenmechanische Aufbereitung

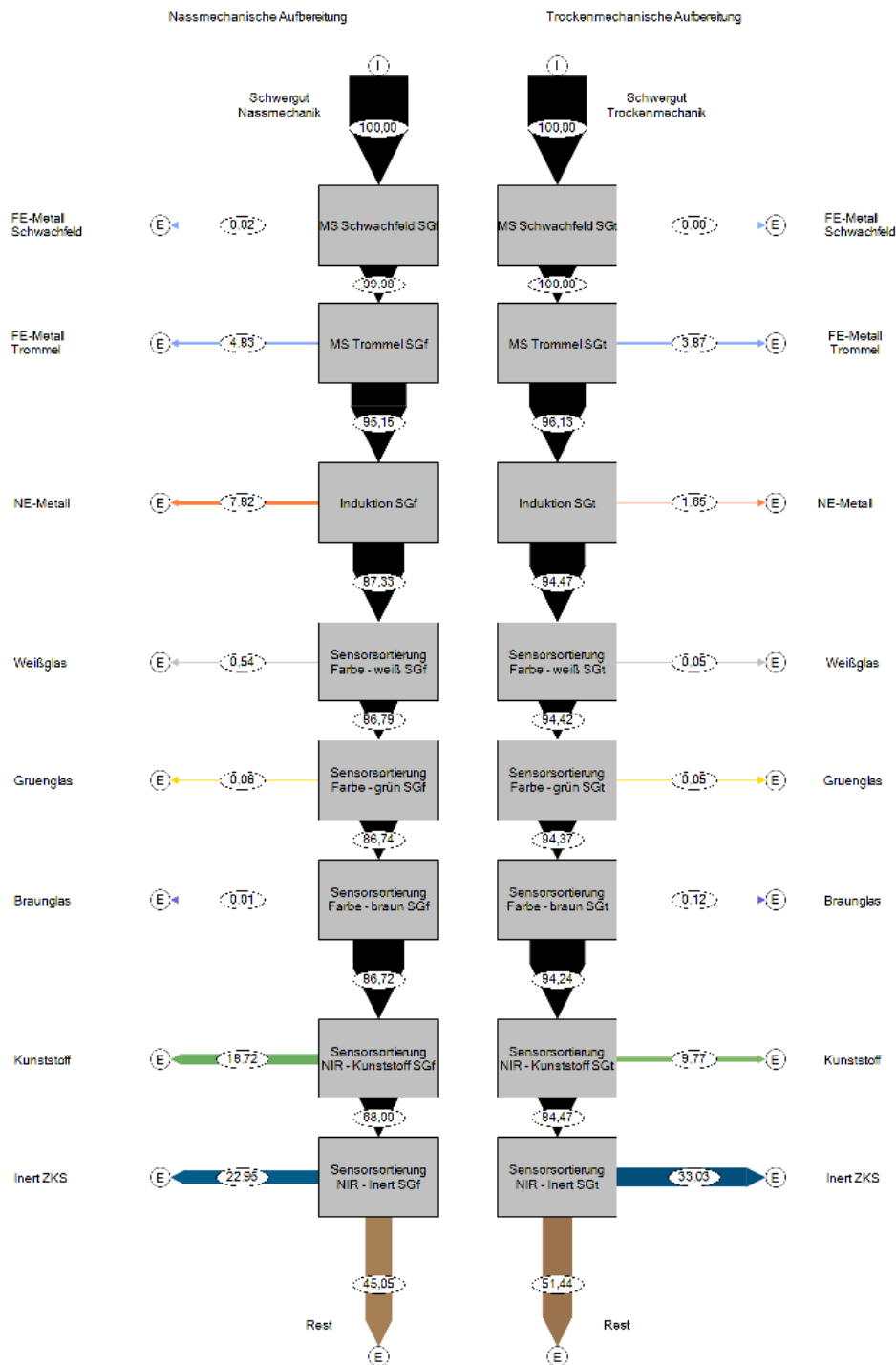


Abbildung 87: Stoffflussanalyse von Inertstoffen in kg/h·m (eigene Darstellung).

Fließbild Vergleich Nass-/Trockenmechanische Aufbereitung

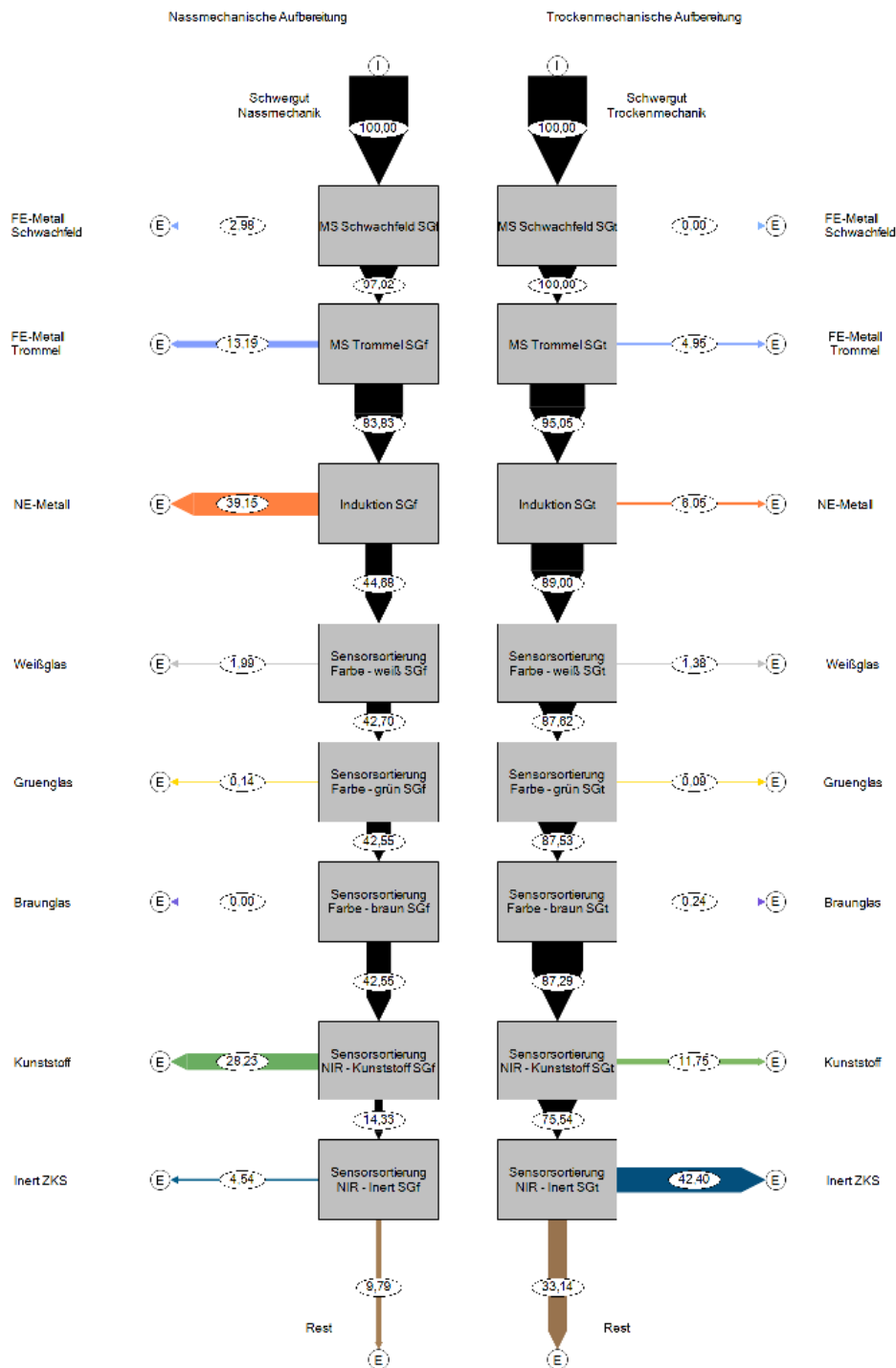


Abbildung 88: Stoffflussanalyse von Flusen (links) bzw. Gewölle (rechts) in kg/h-m (eigene Darstellung).

Fließbild Vergleich Nass-/Trockenmechanische Aufbereitung

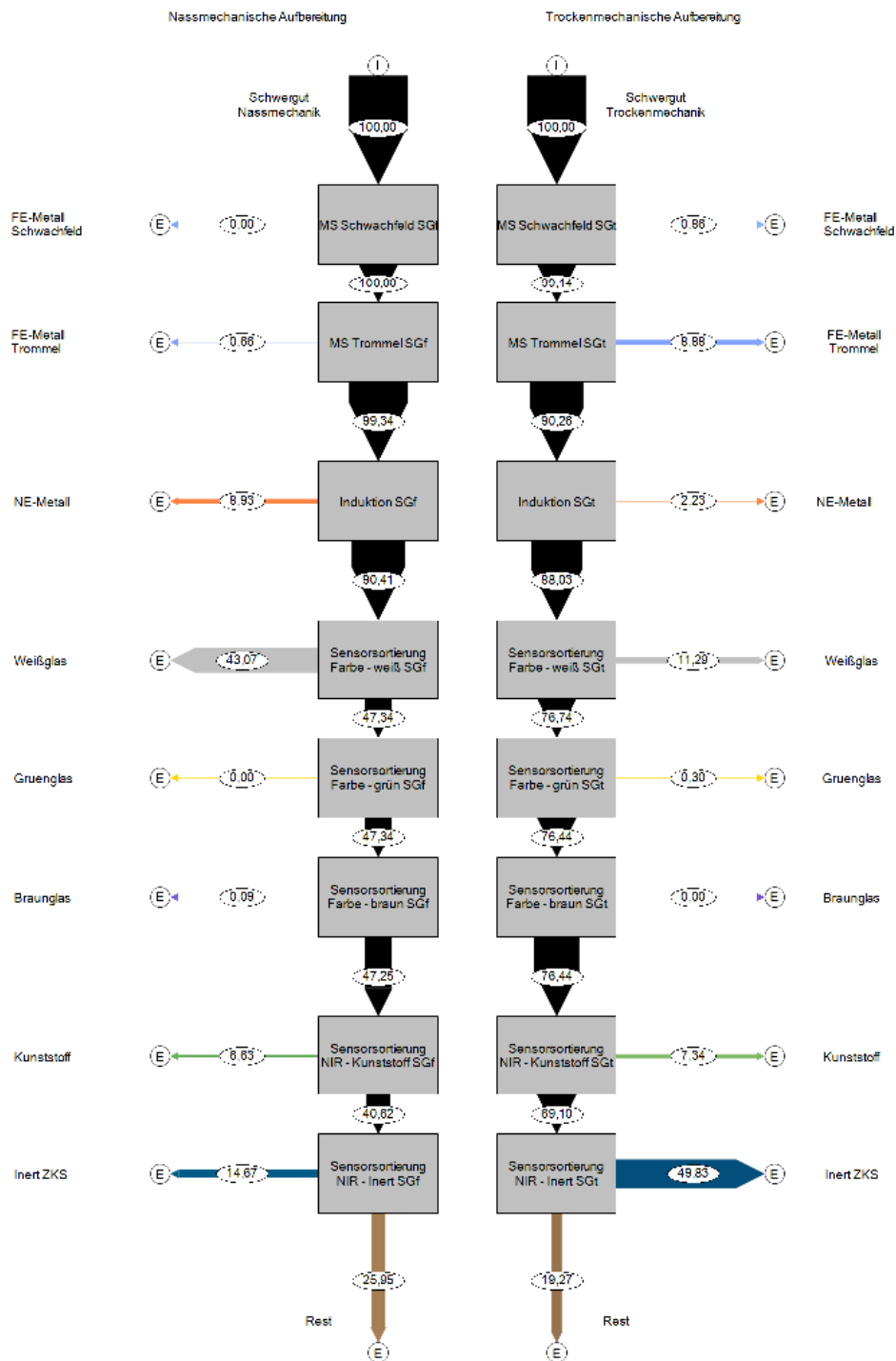


Abbildung 89: Stoffflussanalyse des Sortierrests in kg/h-m (eigene Darstellung).

Fließbild Vergleich Nass-/Trockenmechanische Aufbereitung

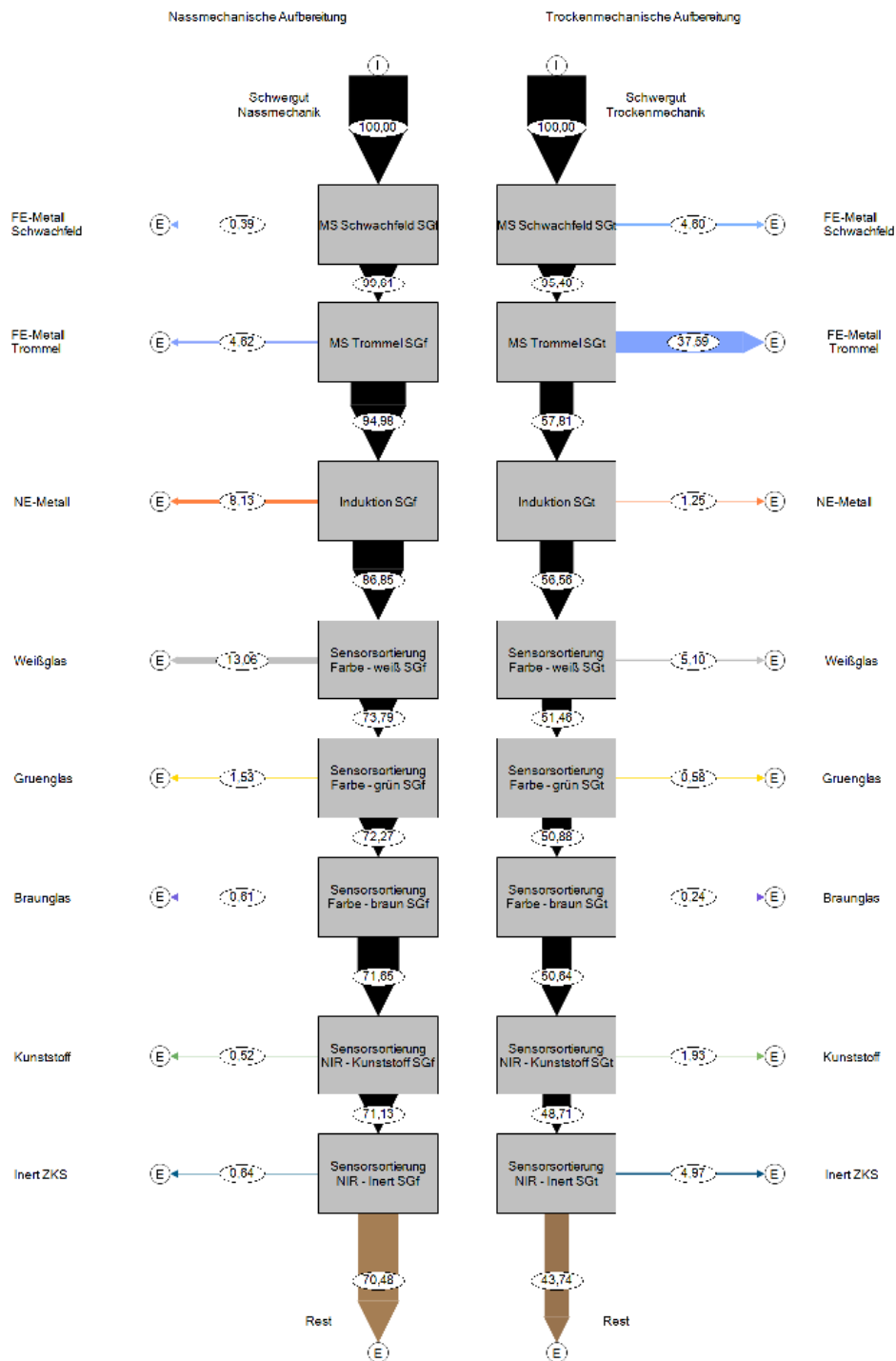


Abbildung 90: Stoffflussanalyse der Feinfraktion in kg/h-m (eigene Darstellung).

Fließbild Vergleich Nass-/Trockenmechanische Aufbereitung

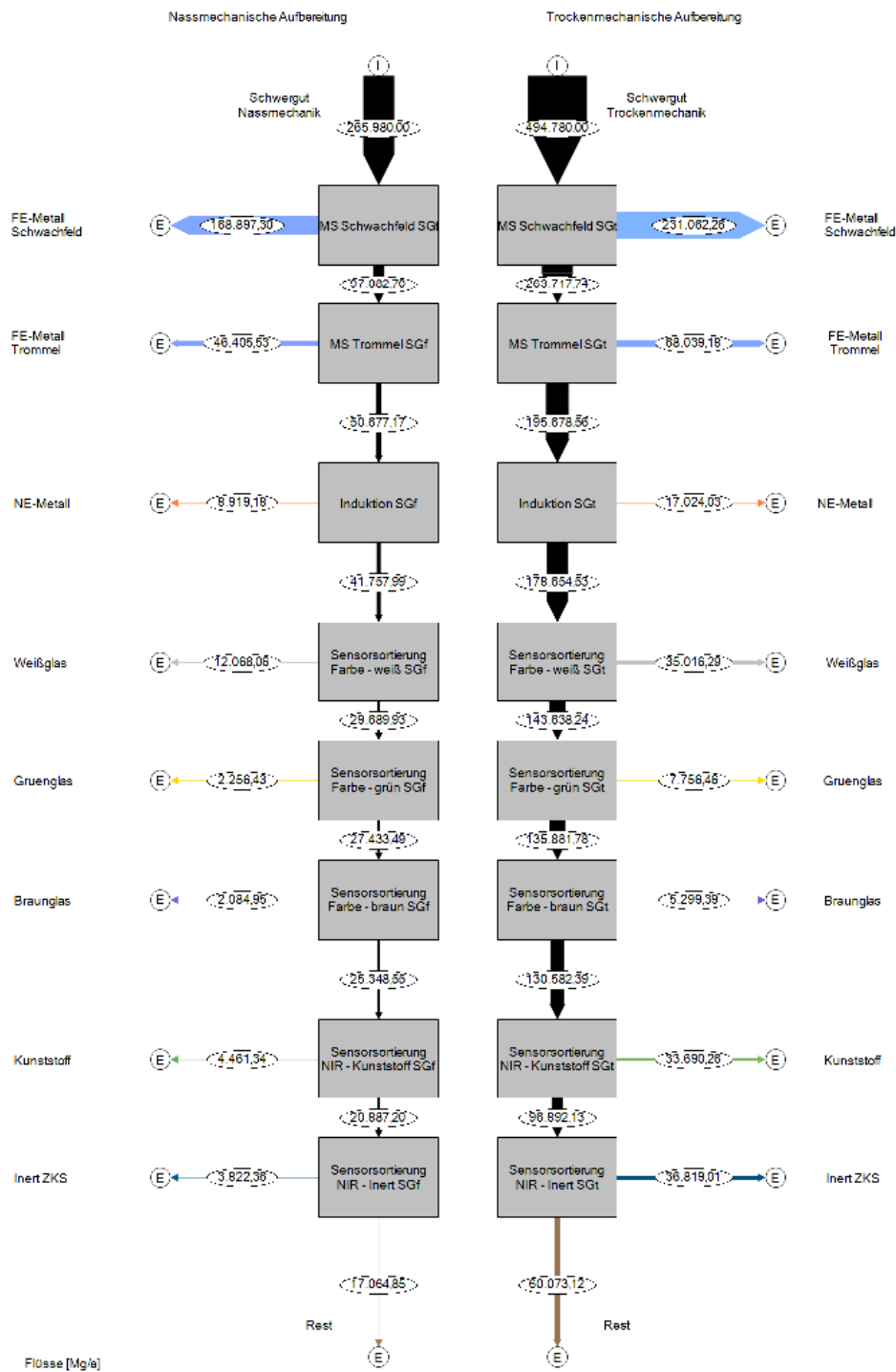


Abbildung 91: Massenbilanz bezogen auf das Gesamtaufkommen des Restmülls in Österreich (eigene Darstellung).

Fließbild Vergleich Nass-/Trockenmechanische Aufbereitung



Abbildung 92: Massenbilanz bezogen auf das Gesamtabfallaufkommen des Restmülls in der Steiermark (eigene Darstellung).