

Hochschule für Angewandte Wissenschaften Hamburg

**Untersuchung einer Gewerbeabfallsortieranlage –  
Analyse der Sortierleistung und Identifizierung von  
Entwicklungsmöglichkeiten**

Bachelorarbeit vorgelegt von

Tim Milewski

Matr. Nr. [REDACTED]

Hamburg, den 29.09.2023

Erstgutachterin: Frau Prof. Dr. Carolin Floeter

Zweitgutachter: Herr M. Sc. Stefan Bock



## Danksagung

Der größte Dank gilt meinen Eltern, die mich auf meinem Weg stets unterstützt und ermutigen haben. Danke Mama und Papa, dass es Euch gibt! Danken möchte ich auch meinem kleinen Bruder Benni und meinen Großeltern für all die Unterstützung.

Für die fachliche Unterstützung danke ich Carolin Floeter herzlich, die mich nicht nur auf dem Weg der Bachelorarbeit, sondern auch während des Studiums unterstützt hat.

Auch danke ich Stefan Bock, der sich bereit erklärt hat, als Zweitgutachter an dieser Bachelorarbeit mitzuwirken.

Der Bestsort Hamburg danke ich für die Möglichkeit und zeitliche Unterstützung des Erstellens dieser Arbeit.

Zudem danke ich all meinen Freunden und Kommilitonen für die schöne Zeit während der letzten Jahre, die mich nicht nur fachlich, sondern auch persönlich wachsen lassen hat. Danke Euch!



## Zusammenfassung

Diese Bachelorarbeit befasst sich mit der Untersuchung einer Gewerbeabfallsortieranlage. Das gewählte Fallbeispiel ist die Anlage der Bestsort Hamburg GmbH und Co. KG. Es wurden unterschiedliche Sortierleistungen untersucht sowie die Reinheit von einigen ausgewählten Sortierungen.

Nach der Zerkleinerung der Abfälle, werden diese in einem Rüttelsieb klassifiziert und in drei unterschiedliche Korngrößen gesiebt: kleiner als 50 mm, 50 bis 250 mm und größer als 250 mm. Die Sortierung der Materialien des Unterkorns, kleiner als 50 mm, beschränkt sich auf die Aussortierung von Metallen. Eine wirtschaftliche Sortierung ist aufgrund der kleinen Korngröße nicht realisierbar. Das Mittelkorn welches die Sortierung der Partikel von 50 bis 250 mm beinhaltet, sortiert Metalle, Ersatzbrennstoff (EBS), Papier, Pappe und Kartonagen (PPK) sowie Holz aus. Im Überkorn, welches Materialien größer als 250 mm enthält, werden Wertstoffe händisch aussortiert. Eisenhaltige Metalle werden nachgeschaltet mit einem Eisenabscheider aus dem Abfallstrom gewonnen.

Die Ergebnisse ergaben, dass die Sortierleistung stark von der Abfallzusammensetzung abhängt. So schwanken die Werte der Sortierung bei einigen Fraktionen stark. Die Reinheiten ausgewählter Fraktionen wurden untersucht bewertet.

Als Handlungsempfehlungen zur Steigerung der Sortierleistungen wird ein Ausbau der Nahinfrarot (NIR)-Sortierung in dieser Arbeit geprüft. Für eine Weiterentwicklung des Überkorns ist eine Verkleinerung der Handsortierung und der Einsatz von NIR-Geräten zu empfehlen. Die NIR-Sortierung kann dabei unterstützen, die häufig vorkommenden Wertstoffe wie Holz und PPK aus dem Abfallstrom zu sortieren. Es empfiehlt sich eine andere Zerkleinerung der Materialien. Bei einer geringeren Korngröße des Überkorns, ist eine erfolgreichere NIR-Sortierung zu erwarten. Zusätzlich müsste hierfür das Sieb angepasst werden um eine geeignete Aufteilung des Materials für das Mittel- und Überkorn zu erreichen.

## Abstract

This Bachelor thesis is about the investigation of a commercial waste sorting plant. The Bestsort Hamburg GmbH & Co. KG is the chosen facility for this case study. It contains different sorting capacities and also the purity of specific chosen fractions.

After crushing the waste in pieces, it gets classified in three different sizes. Smaller than 50 mm, 50 up to 250 mm and larger than a size of 250 mm. The sorting of the material for smaller than 50 mm contains only the metal sorting. An economical sorting is not feasible because of the small grain size. The medium grain, which is sorting from 50 up to 250 mm sorts metals, refuse derived fuel, paper, cardboard and wood. In the oversize sorting, which is bigger than 250 mm, recyclables are sorted out by hand. Only ferrous metal are sorted out by an iron separator.

The results showed, that the performance in sorting depends on the waste composition. The purity of selected fractions was evaluated.

To improve the sorting performance it is recommended to expand the use of near-infrared sorting technology. For the oversize grain a downsizing of the handsorting and implementing near-infrared sorting could improve the performance by assisting in sorting the common recyclables. A size reduction can improve the sorting process for the oversize grain. To achieve that, the screen would have to be improved to distribute the material in a suitable way to the medium and oversize grains.

# I. Inhaltsverzeichnis

Danksagung .....	
Zusammenfassung .....	I
Abstract .....	II
I. Inhaltsverzeichnis .....	III
II. Abkürzungsverzeichnis .....	VI
III. Abbildungsverzeichnis.....	VI
IV. Tabellenverzeichnis .....	VII
1. Einleitung.....	1
1.1 Abfallentsorgung in Deutschland .....	1
1.1.1 Private Müllverbringung .....	2
1.1.2 Gewerbliche Abfallverbringung.....	2
1.2 Abfallrecht.....	2
1.2.1 Kreislaufwirtschaftsgesetz.....	3
1.2.2 Gewerbeabfallverordnung.....	3
1.3 Fallbeispiel Bestsort Hamburg GmbH & Co. KG.....	4
2. Material und Methoden.....	5
2.1 Sortieranlage Bestsort Hamburg GmbH & Co. KG .....	5
2.1.1 Materialannahme .....	5
2.1.2 Materialvorsortierung.....	5
2.1.3 Materialzerkleinerung .....	6
2.1.4 Klassierung des Abfallstroms.....	7
2.1.5 Sortierung des Abfallstroms .....	8
2.1.6 Unterkornsartierung .....	8
2.1.6.1 Eisenabscheider.....	9
2.1.6.2 Nicht-Eisenabscheider .....	9

2.1.6.3	Weiterbehandlung .....	10
2.1.7	Mittelkornsortierung.....	11
2.1.7.1	Nahinfrarotsortierung.....	11
2.1.7.2	Ersatzbrennstoffgewinnung .....	13
2.1.7.3	Papiersortierung .....	13
2.1.7.4	Holzsortierung.....	14
2.1.7.5	Händische Nachsortierung.....	14
2.1.7.6	Nicht-Eisen-Abscheider .....	14
2.1.8	Überkornsortierung .....	15
2.1.8.1	Eisenabscheider.....	15
2.1.9	Zusammenführung der Mittel- und Überkornsortierung.....	16
2.1.9.1	Windsichtung .....	16
2.2	Versuchsdesign und Durchführung.....	16
3.	Ergebnisse .....	19
3.3	Darstellung der Messergebnisse .....	19
3.1.1	Unterkornsortierung.....	19
3.1.2	Mittelkornsortierung .....	20
3.1.3	Überkornsortierung.....	21
3.3	Auswertung der Messergebnisse .....	22
3.2.1	Unterkornsortierung .....	22
3.2.2	Mittelkornsortierung.....	23
3.2.3	Überkornsortierung .....	27
3.2.4	Stoffstromauswertung .....	30
4.	Diskussion.....	32
4.1	Interpretation der Auswertung in den Anlagenbetrieb.....	32
4.1.1	Unterkornauswertung.....	32
4.1.2	Mittelkornauswertung .....	33
4.1.3	Überkornsortierung .....	34



4.2	Herausforderungen der Validierung .....	35
4.3	Optimierungsmöglichkeiten zur Steigerung der Effizienz .....	36
4.3.1	Herausforderungen und Realisierbarkeit der Optimierungsmöglichkeiten.....	37
5.	Fazit.....	38
6.	Literaturverzeichnis .....	39
V.	Eidesstattliche Erklärung .....	41

## II. Abkürzungsverzeichnis

EBS	Ersatzbrennstoff
GewAbfV	Gewerbeabfallverordnung
KrWG	Kreislaufwirtschaftsgesetz
NIR	Nahinfrarot
PE	Polyethylen
PP	Polypropylen
PPK	Papier, Pappe und Kartonagen

## III. Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Abfallhierarchie (eigene Darstellung).....	3
Abbildung 2: Sortierprozess der Bestsort Hamburg GmbH & Co. KG (eigene Darstellung) ...	8
Abbildung 3: FE-Sortierung (Martens, 2010).....	9
Abbildung 4: NE-Abscheider (Martens, 2010).....	10
Abbildung 5: Schematische Darstellung der NIR-Sortierung (Tomra).....	12
Abbildung 6: Windsichtung (eigene Darstellung).....	16
Abbildung 7: Messergebnisse Unterkornsortierung (eigene Darstellung).....	23
Abbildung 8:Sortierleistung Mittelkorn FE-Abscheider (eigene Darstellung).....	24
Abbildung 9: Sortierleistung Mittelkorn NE-Abscheider (eigene Darstellung).....	24
Abbildung 10: Reinheit Mittelkorn PPK (eigene Darstellung).....	25
Abbildung 11: Reinheit Mittelkorn EBS (eigene Darstellung).....	26
Abbildung 12: Sortierleistung Mittelkorn Handnachsartierung (eigene Darstellung).....	26
Abbildung 13:Sortierleistung Überkorn Folie (eigene Darstellung).....	27
Abbildung 14:Sortierleistung Überkorn Papier (eigene Darstellung).....	28
Abbildung 15: Sortierleistung Überkorn Holz (eigene Darstellung).....	28
Abbildung 16: Sortierleistung Überkorn Metalle (eigene Darstellung).....	29
Abbildung 17: Sortierleistung Überkorn FE-Abscheider (eigene Darstellung).....	30

## IV. Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: Sortierung Mittelkorn .....	14
Tabelle 2: Sortierung Überkorn .....	15
Tabelle 3: Messergebnisse Unterkorn FE .....	19
Tabelle 4: Messergebnisse Unterkorn NE .....	19
Tabelle 5: Messergebnisse Unterkorn Sand .....	19
Tabelle 6: Messergebnisse Mittelkorn FE .....	20
Tabelle 7: Messergebnisse Mittelkorn NE .....	20
Tabelle 8: Messergebnisse Mittelkorn Papier .....	20
Tabelle 9: Messergebnisse Mittelkorn EBS .....	21
Tabelle 10: Messergebnisse 1 Mittelkorn Nachsortierung .....	21
Tabelle 11: Messergebnisse 2 Mittelkorn Nachsortierung .....	21
Tabelle 12: Messergebnisse Überkorn Folie .....	21
Tabelle 13: Messergebnisse Überkorn Papier .....	22
Tabelle 14: Messergebnisse Überkorn Holz .....	22
Tabelle 15: Messergebnisse Überkorn Metalle .....	22
Tabelle 16: Messergebnisse Überkorn FE-Abscheider .....	22
Tabelle 17: Auswertung Unterkorn .....	23
Tabelle 18: Auswertung Mittelkorn FE-Abscheider .....	23
Tabelle 19: Auswertung Mittelkorn NE-Abscheider .....	24
Tabelle 20: Auswertung Mittelkorn PPK .....	25
Tabelle 21: Auswertung Mittelkorn EBS .....	25
Tabelle 22: Auswertung 1 Mittelkorn Nachsortierung .....	26
Tabelle 23: Auswertung 2 Mittelkorn Nachsortierung .....	26
Tabelle 24: Auswertung Überkorn Folie .....	27
Tabelle 25: Auswertung Überkorn Papier .....	27
Tabelle 26: Auswertung Überkorn Holz .....	28
Tabelle 27: Auswertung Überkorn Metalle .....	29
Tabelle 28: Auswertung Überkorn FE-Abscheider: .....	29
Tabelle 29: Darstellung der Daten aus dem Stoffstrom .....	30
Tabelle 30: Recyclingquote .....	31



# 1. Einleitung

Im Jahr 2016 gab es ein Abfallaufkommen von ca. 2,02 Milliarden Tonnen, für das Jahr 2050 werden derzeit 3,4 Milliarden Tonnen prognostiziert (Kaza, 2018). Abfälle gelten laut dem Bundesministerium für wirtschaftliche Zusammenarbeit und Entwicklung als „eine potenzielle Rohstoffquelle, die angesichts globaler Ressourcenverknappung an Bedeutung gewinnt“ (BMZ, 2020). Die richtige Sortierung von Abfällen ist grundlegend, um eine umweltbewusste und nachhaltige Ressourcenschonung in Deutschland zu betreiben. 2015 wurden durch die angefallenen Abfälle in Deutschland ca. 11 Millionen Tonnen Kohlenstoffdioxid-Äquivalent freigesetzt. Hingegen waren es 1990 noch ca. 40 Millionen Tonnen. Grund sind neben der Verminderung von Deponierungen und die Sortierung von Abfällen. Zusätzlich werden mehr Abfälle stofflich und thermisch recycled, was den Kohlenstoffdioxidausstoß reduziert (UBA, 2021). Eine Gewerbeabfallsortieranlage ist eine Vorbehandlungsanlage, welche von allen Unternehmen und gewerblichen Entsorgern vor der thermischen Verwertung angefahren werden muss (GewAbfV, 2017). Ziel dieser Bachelorarbeit ist, die Sortieranlage des Bestsort Hamburg auf die Sortierleistung und -reinheit zu analysieren. Aus den Ergebnissen sollen Handlungsempfehlungen zur Leistungssteigerung der Sortierung erarbeitet werden um die Sortieranlage weiterzuentwickeln. Die Steigerung der Effizienz bedeutet konkret, dass die Recyclingquote steigt oder der Durchsatz der Abfallmenge erhöht wird. Dabei soll zwischen folgenden Wertstoffen differenziert werden: Folie, Pappe, Papier, Holz, Hartkunststoffe, eisenhaltige Metalle und Nicht-Eisenmetalle. Auch relevant ist, wie effektiv die maschinelle Sortierung der NIR-Geräte arbeitet in Bezug auf Sortierleistung und Reinheit arbeitet. Zudem sollen Lösungsansätze entwickelt werden, um mehr Wertstoffe aus dem Anlagenmaterial zu gewinnen.

In der Diskussion werden die Realisierbarkeit und die Herausforderungen der Analyse, aber auch der Umsetzung von Optimierungen der Sortieranlage beleuchtet.

## 1.1 Abfallentsorgung in Deutschland

Im Jahr 2021 wurden in der Bundesrepublik Deutschland ca. 411,5 Millionen Tonnen Abfälle erzeugt und entsorgt. Seit 2018 ist eine fallende Tendenz im deutschen Abfallaufkommen zu

verzeichnen (Destatis, 2023). Im Jahr 2020 machten mit 55,4% die Bau- und Abbruchabfälle den größten Teil aus. Sekundärabfälle (13,9%) und Siedlungsabfälle (12,3%) reihen sich dahinter an. Die Verwertungsquote der Deutschen Abfallbranche lag 2020 bei 81,7%. Anteilig gingen 70,1% in den Bereich des stofflichen Recyclings und 11,6% in die thermische Verwertung. (Destatis, 2023)

### 1.1.1 Private Müllverbringung

Im privaten Abfallsektor fielen 2021 40,2 Tonnen Abfall an, pro Kopf ergibt das ca. 483kg (Destatis, 2022). Jede\*r Bürger\*in in Deutschland ist verpflichtet, den im Haushalt anfallenden Müll zu trennen. Verpackungsmüll, welcher in der gelben Tonne zuzuordnen ist, landet teilweise noch in dem Restmüll. So werden potentielle Wertstoffe nicht dem stofflichen Recycling zugeführt sondern der thermisch verwertet. Aber auch die gelbe Tonne verzeichnete teilweise bis zu 40% Abfälle, welche falsch von den Verbraucher\*innen zugeordnet worden sind (Umweltbundesamt, 2020).

### 1.1.2 Gewerbliche Abfallverbringung

Im Jahr 2020 waren die Gewerbeabfälle der zweitgrößte Sektor im Deutschen Abfallaufkommen. Es wurde eine Menge von 47,4 Millionen Tonnen erfasst. Gewerbeabfälle setzen sich aus den in einem Unternehmen anfallenden Abfällen zusammen, wobei es sich primär um Produktionsabfälle handelt (Umweltbundesamt, 2022).

## 1.2 Abfallrecht

Um den Umgang mit Abfällen in Deutschland und der Europäischen Union (EU) zu regeln, wurden Gesetze und Verordnungen erlassen. Neben dem Kreislaufwirtschaftsgesetz (KrWG), welches das Kernelement des deutschen Abfallrechts bildet, wird in dem folgenden Abschnitt die Gewerbeabfallverordnung (GewAbfV) in seinen Grundzügen erläutert. Fokus liegt dabei auf den Punkten, die relevant für den Betrieb einer Gewerbeabfallsortieranlage sind (BMUV, 2020).

### 1.2.1 Kreislaufwirtschaftsgesetz

Das KrWG verfolgt das Ziel, „die Kreislaufwirtschaft zur Schonung der natürlichen Ressourcen zu fördern und den Schutz von Mensch und Umwelt bei der Erzeugung und Bewirtschaftung von Abfällen sicherzustellen“ (KrWG, 2012). Rechtsverbindlich wurde das Gesetz am 1. Juni 2012. Unter anderem definiert das KrWG in §3, welche Gegenstände unter bestimmten Umständen als Abfälle zu betrachten sind. Es regelt den Umgang mit Abfällen, die Lagerung und die Verwertung. Zudem gibt das Gesetz vor, wann und in welchem Maße Abfälle zu trennen sind. Das KrWG beschreibt zudem die Abfallhierarchie Deutschlands in §6 (1) (KrWG, 2012). Die Abfallhierarchie ist in der Abbildung 1 dargestellt.



Abbildung 1: Abfallhierarchie (eigene Darstellung)

Um die Umwelt und den Menschen zu schonen, hat es oberste Priorität, das Entstehen von Abfall zu vermeiden. Ist das nicht möglich, wird eine Wiederverwendung angestrebt. Wichtig bei der Einordnung in der Abfallhierarchie ist, dass hierbei das Wohl des Menschen und der Umwelt maßgebend sind. Zudem beeinflussen die Faktoren Wirtschaftlichkeit und technische Realisierbarkeit die Maßnahmen der Abfallbehandlung.

### 1.2.2 Gewerbeabfallverordnung

Die am 1. August 2017 eingeführte Gewerbeabfallverordnung befasst sich mit dem Umgang von gewerblichen Siedlungsabfällen und Bau- sowie Abbruchabfällen. Speziell für die

Vorbehandlungsanlagen ist festgehalten, welche Anforderungen sie erfüllen müssen. Anlagenbetreiber sind dazu verpflichtet, Papier, Pappe, Karton, Kunststoffe, Metall und Holz auszusortieren. Zudem ist es vorgeschrieben, eine Sortierquote von mindestens 85 Masseprozent zu gewährleisten. Dieser Wert ist im Durchschnitt je Kalenderjahr einzuhalten. Unterschreitet der Betrieb die Kennzahl in zwei Monaten des Kalenderjahres um mehr als 10%, so ist er verpflichtet zu begründen, weshalb der Wert unterschritten wurde. Zusätzlich muss aufgezeigt werden, wie er die jährliche Sortierquote einhalten kann. Nach der Darstellung der nötigen Umstellung ist es vorgeschrieben, den Zeitraum für die Maßnahmen bekannt zu geben.

Neben der Sortierquote ist ebenfalls die Recyclingquote von dem Betrieb zu ermitteln und festzuhalten. Die Quote darf den Wert von 30 Masseprozent nicht unterschreiten. Liegt der Wert in einem Kalenderjahr unter dem Schwellenwert, ist dies der Behörde zu melden.

Vorbehandlungsanlagen sind verpflichtet, Abfälle, welche nicht in die Recyclingquote fallen, wenn möglich in die Verwertung zur Energieerzeugung zu verbringen. Anlagenbetreiber müssen zusätzlich gefährliche Abfälle einer passenden Verwertung zuführen (GewAbfV, 2017).

### 1.3 Fallbeispiel Bestsort Hamburg GmbH & Co. KG

Die Bestsort Hamburg GmbH & Co. KG ist eine Gewerbeabfallsortieranlage in Hamburg-Billbrook. Die Anlage sortierte gemischte Gewerbeabfälle in die unterschiedlichen Fraktionen. Ziel der Anlage ist es, möglichst viele Wertstoffe auszusortieren und in den stofflichen Recyclingkreislauf zu bringen. Aufgrund der technischen Ausstattung und Verwendung von modernen Sortierverfahren wie NIR-Sortierung eignet sich dieses Fallbeispiel für die Erstellung dieser Bachelorarbeit.



## 2. Material und Methoden

Das Folgende Kapitel beinhaltet die Darstellung des Sortierprozesses der Sortieranlage. Es wird ebenfalls beleuchtet, wie der Untersuchungsrahmen und das Versuchsdesign ausgewählt werden.

### 2.1 Sortieranlage Bestsort Hamburg GmbH & Co. KG

Die Sortieranlage hat eine Zulassung der jährlichen Sortiermenge von 95.000 t. Sie wurde im Jahr 2006 fertiggestellt und seitdem stetig weiterentwickelt. Dabei wird das Ziel verfolgt, mehr Abfälle zu sortieren und die Recyclingquote zu steigern. Angeliefert werden Gewerbeabfälle. Diese enthalten u. A. Produktionsreste aber auch gewerbliche Siedlungsabfälle.

#### 2.1.1 Materialannahme

Angelieferte Abfälle werden unter dem dafür vorgesehenen Abfallschlüssel angenommen, gewogen und durch Mitarbeiter\*innen dokumentiert. Zur Dokumentation gehört es, die enthaltenen Materialien aufzulisten, Fotos zu machen und die Qualität der Anlieferung festzustellen. Dabei wird zwischen vier Qualitätsstufen unterschieden. Diese hängt davon ab, wie groß der Anteil an Wertstoffen ist, welche Wertstoffe sind und wie feucht die Materialien sind. Hieraus ergibt sich der Tonnenpreis für die Anlieferung. Je besser die Qualität ist, desto günstiger ist der Preis für die Lieferanten.

#### 2.1.2 Materialvorsortierung

Die angelieferten Abfälle werden vor der Zerkleinerung von den Mitarbeiter\*innen mithilfe eines Baggers vorsortiert. Nicht verarbeitungsfähige Abfälle wie Reifen, Steine, Fensterrahmen, Kühlschränke und weitere Störstoffe werden aussortiert und als nicht anlagenfähiges Material deklariert. Handelt es sich um Restmüll, wird dieser gesondert in Containern für die spätere thermische Verwertung gelagert. Kühlaggregate und andere Elektro- sowie Küchengeräte werden ebenfalls gesondert gesammelt. Das häufige Kühlmittel

in Kühlschränken ist toxisch und würde bei einer Freisetzung die Umwelt belasten und die Mitarbeiter\*innen gefährden. Kühlaggregate werden nach der Aussortierung zu darauf spezialisierten Unternehmen verfrachtet, wo eine fachgerechte Entsorgung stattfindet. Weitere Gefahrenstoffe wie Öle, Kraftstoffe, Druckbehälter, Akkus und andere gesundheits- bzw. umweltgefährdende Chemikalien werden ebenfalls aussortiert und bis zur Abholung sicher gelagert. Die Verwertung findet durch jeweilige Fachentsorger und -aufbereiter statt. Abfälle, die zwar ein Wertstoff wie z.B. Eisenstangen sind, aber aufgrund ihrer Größe nicht zerkleinert werden können, werden ebenfalls vor der Zerkleinerung aussortiert. In diesem Fall dem bei dem Eisenschrott gelagert und später vermarktet.

### 2.1.3 Materialzerkleinerung

Abfälle, die nach der Vorsortierung als anlagenfähig ausgewiesen wurden, werden mit einem Bagger in den Vorzerkleinerer befördert. Der Vorzerkleinerer besteht aus einem Trichter und einem Tisch. Der Trichter hat die Aufgabe, das Material der eigentlichen Zerkleinerungseinheit, dem Tisch, zuzuführen. Der Tisch besteht aus zwei Wellen mit jeweils sechs Messern, welche versetzt angeordnet sind. Durch eine Rotation der beiden Wellen wird das Material „zerrissen“ und zerkleinert. Außerdem werden Abfallsäcke durch die Messer geöffnet, um den Inhalt für die Sortierung zugänglich zu machen. Das bewirkt, dass mit Material gefüllte Säcke geöffnet und die enthaltenen Wertstoffe sortiert werden können. Auch wird das Material zerkleinert. Das Material wird ebenfalls zerkleinert, was dazu führt, dass es sich in unterschiedliche Korngrößen aufteilt und somit sortiert werden kann. .

Angetrieben wird der Vorzerkleinerer von zwei Elektromotoren, welche über ein Hydraulikaggregat die Wellen in Bewegung versetzen. Um Störungen zu vermeiden, drehen sich die Wellen nicht durchgängig in eine Richtung, sondern wechseln nach 20 Umdrehungen die Drehrichtung. Der Wechsel der Drehrichtung verhindert, dass sich Materialien um die Wellen wickeln und diese blockieren. Die Störungsbehebung des Vorzerkleinerers kann bis zu zwei Stunden in Anspruch nehmen. Durch einen Stillstand der Anlage entstehen Verluste, die durch eine richtige Bedienung vermieden werden können. Der Stillstand des Vorzerkleinerers bedeutet, dass die Materialien ohne Zerkleinerung in die Sortieranlage gelangen und somit wenig Material im Mittelkorn ankommt und das Überkorn überfüllt ist. Daher sind eine regelmäßige Wartung und die richtige Beschickung der Maschine durch ausgebildete Fachkräfte essentiell.

#### 2.1.4 Klassierung des Abfallstroms

Nach der Zerkleinerung und einer ersten Vorsortierung des anlagenfähigen Materials wird der vermischte Abfall über Förderbänder zu einem Rüttelsieb transportiert. In einer Höhe von ca. 8m wird das Material in das 3 m breite Sieb befördert. Zu Beginn der Siebung wird der Feinanteil, das sogenannte Unterkorn, aus dem Abfallstrom entfernt. Durch eingesetzte Filterplatten mit einer Bemessung von je 50 mm in Breite und Länge wird das Material ausgetragen. Materialien, die eine geringere Breite und Länge als die Sieböffnung haben, aber eine Tiefe von mehr als 50mm, werden teilweise mit ausgetragen. Durch die ständige Rüttelbewegung des Siebs entsteht eine Entmischung des Materials. Einwirkende Kräfte wie Gravitationskraft und Fliehkraft bewegen größere Materialien nach oben und kleinere Partikel unterhalb der Größeren (Stieß, 2009). In dem Abfallstrom können so Feinanteile, welche auf größeren Materialien befinden nach unten bewegen und gezielt durch den Siebeinsatz des Unterkorns ausklassiert werden.

Nach der ersten Materialabscheidung folgt die Absiebung des Mittelkorns. Korngrößen von 50- 250 mm werden in dem Rüttelsieb aus dem Stoffstrom durch eine Entmischung nach unten transportiert. Da bereits bei der Absiebung des Unterkorns eine Entmischung stattfand, hat sich das potentielle Mittelkornmaterial in dem Abfallgemisch nach unten bewegt und kann so besser aus dem Strom ausgetragen werden.

Das nicht ausklassierte Material ist das Überkorn. Es fällt am Ende des Rüttelsiebs raus und wird per Förderband in die Sortieranlage transportiert. Die Größe der Materialien beträgt mindestens 250mm. Da es sich bei der Entmischung in dem Rüttelsieb um keine ideale Entmischung handelt, kommt es vor, dass Materialien aus dem Unterkorn im Mittel- oder Überkorn landen. Ebenfalls kann Material, welches auf die Korngröße bezogen in das Mittelkorn gehört, als Überkorn das Sieb verlassen. Der Grund dafür ist, dass sich unterschiedlich große Gegenstände ineinander verhaken, aufgrund von Feuchtigkeit aneinanderhaften oder sich aufgrund der nicht idealen Entmischung nicht nach unten bewegen.

Aufgrund der Rüttelbewegung wird viel Staub aus dem Material in die Luft getragen, weshalb das Sieb mit einer Entstaubungsanlage arbeitet. Die Entstaubung sorgt dafür, dass ein Großteil des Staubes aus der Luft im Sieb entfernt wird. Dadurch wird der Eintrag von Partikeln in die Umgebung gemindert und die Belastung für Flora und Fauna gesenkt.

## 2.1.5 Sortierung des Abfallstroms

Der Abfall ist in drei Fraktionen der Korngröße klassiert. Um nun die enthaltenen Wertstoffe der jeweiligen Ströme in wirtschaftlichem Maße auszusortieren, sortieren Magnete Nahinfrarot-Geräte und Mitarbeiter\*innen, abhängig von der Korngröße, die Abfälle. Das schematische Anlagenfließbild ist in Abbildung 2 aufgezeigt.

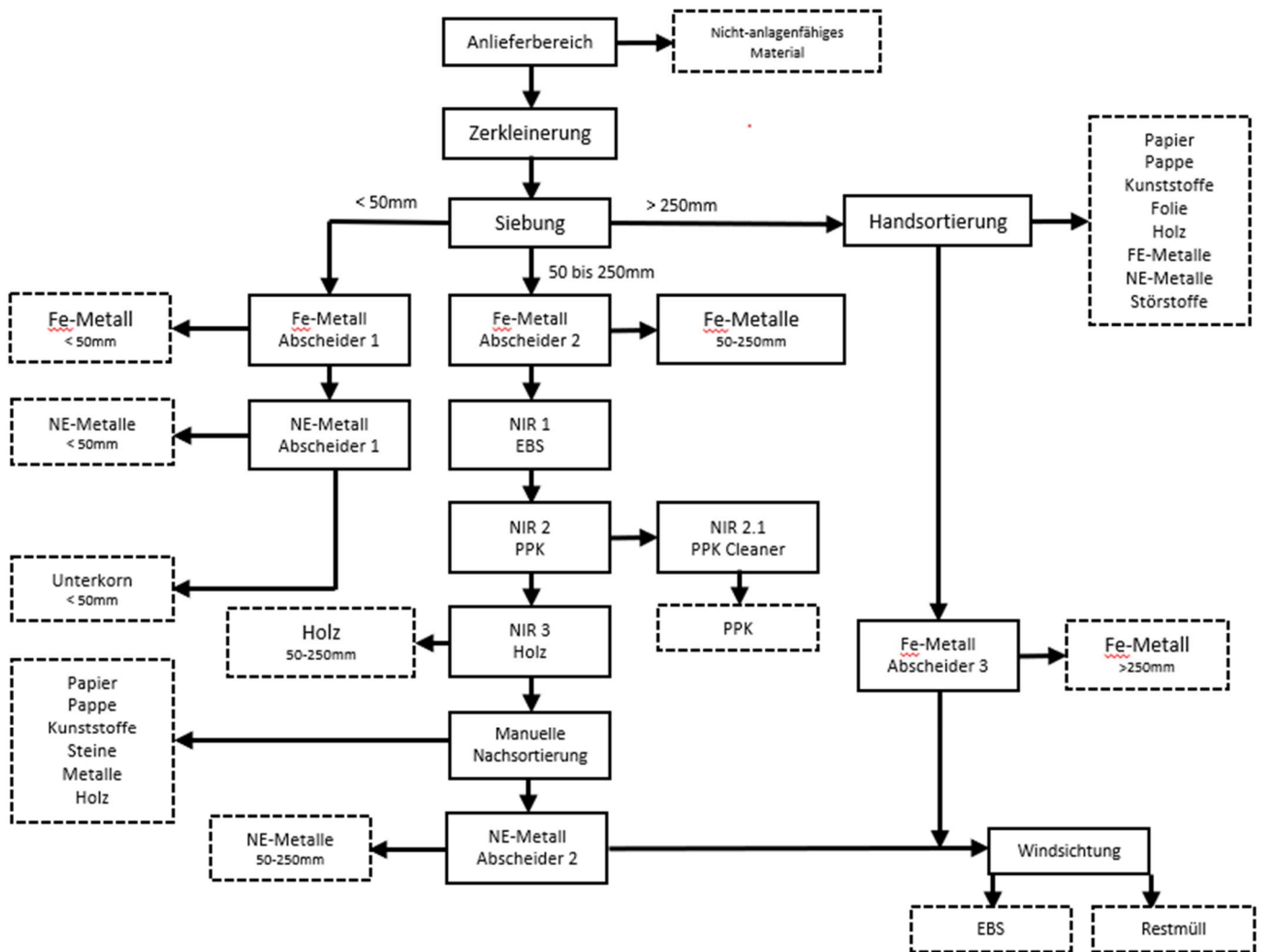


Abbildung 2: Sortierprozess der Bestsort Hamburg GmbH & Co. KG (eigene Darstellung)

## 2.1.6 Unterkornsartierung

Das aus dem Abfallstrom ausgetragene Unterkorn wird mit einem unterhalb des Siebes liegenden Förderbands zu einem Eisen- und Nicht-Eisen Abscheider transportiert. Zudem

befindet sich am Ende des Förderbands ein Abstreifer. Die Aufgabe des Abstreifers ist es, sehr feine Partikel, wie Sand, die am Förderband haften, von dem Band zu entfernen.

#### 2.1.6.1 Eisenabscheider

Zur Sortierung des Unterkorns werden eisenhaltige Wertstoffe aussortiert. Dafür ist über dem Förderband eine Magnettrommel installiert. Um einen magnetischen Kern bewegt sich kreisförmig eine Trommel, an der vor allem ferromagnetische Stoffe durch das Magnetfeld haften. Das magnetische Material bleibt so lange an der Trommel, bis es das Magnetfeld des Permanentmagneten verlässt (Martens, 2010). In Abbildung 3 ist zu sehen, wie die Abscheidung des Materials aus dem Stoffstrom unter Verwendung einer Magnettrommel funktioniert.

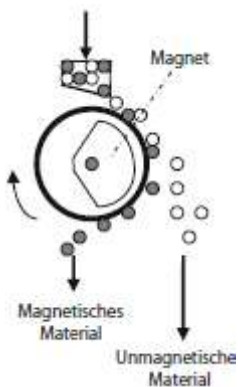


Abbildung 3: FE-Sortierung (Martens, 2010)

Das durch die Magnettrommel aussortiert Material fällt in einen Container und wird später als Schrott vermarktet und in einem Unternehmen aufbereitet und stofflich recycled. Besonders gut können eisenhaltige Metalle aus dem Materialstrom sortiert werden.

#### 2.1.6.2 Nicht-Eisenabscheider

Nach der Aussortierung des ferromagnetischen Materials werden Metalle aus dem Stoffstrom herausgezogen, welche eine geringe bis keine Magnetisierbarkeit aufweisen. Um solche Metalle zu eliminieren, wird eine Wirbelstromsortierung verwendet. Der Wirbelstrom wird in den Metallen durch ein rotierendes Magnetfeld bedingt. Durch die Ladungsverschiebung

entsteht ein magnetisches Feld, welches dem des rotierenden Magneten entgegensteht und die NE-Metalle abstößt. Durch das Abstoßen gleicher magnetischer Pole werden die Metalle ausgeschieden. Um den Austrag der Metalle zu gewährleisten, muss die Trommel, auf welcher das Material aufliegt, eine höhere Rotationsgeschwindigkeit aufweisen, als die Poltrommel. Die schematische Darstellung einer Wirbelstromsortierung ist in der folgenden Abbildung 4 dargestellt. Metalle wie Aluminium, dessen Legierungen und Kupfer besitzen eine hohe Leitfähigkeit und werden, abhängig von ihrer Korngröße, gut mit einer Wirbelstromsortierung aussortiert (Martens, 2010). Die aussortierten Metalle werden ebenfalls gesammelt, anschließend vermarktet und stofflich verwertet.

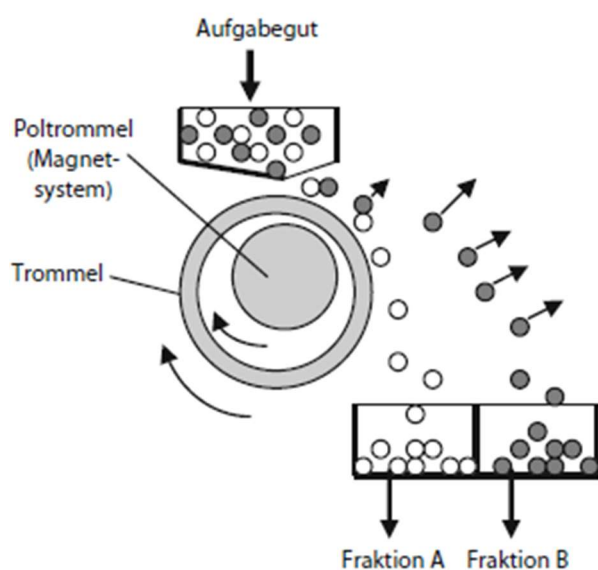


Abbildung 4: NE-Abscheider (Martens, 2010)

### 2.1.6.3 Weiterbehandlung

Das übrig gebliebene Material wird in einer Box gelagert. Aus dem Strom des Unterkorns wurden eisenhaltige und nicht-eisenhaltige Metalle mittels Abscheidern entfernt. Das restliche Material enthält Kunststoffe, Papier, Holz und weitere Stoffe. Aufgrund der kleinen Korngröße von  $< 50\text{mm}$  ist eine weitere Sortierung wirtschaftlich nicht möglich. Das Material wird gesammelt und zu 100% thermisch verwertet. Abnehmer ist beispielsweise die Altera Lägerdorf GmbH & Co. KG, die das Material für die Verbrennung in einer Betonfabrik vorbereiten und Verbrennungsanlagen im Hamburger Umfeld.

### 2.1.7 Mittelkornsortierung

Die Mittelkornsortierung besteht aus den Abfällen, die eine Korngröße von 50 bis 250mm aufweisen. Kleine Teilchen mit einer Partikelgröße von  $< 50\text{mm}$ , welche bei der Siebung nicht in das Unterkorn gelangt sind, können ebenfalls enthalten sein. Aber auch Materialien, welche deutlich länger als 250mm, aber im Querschnitt unter 250mm gelangen in das Mittelkorn. Seile und Etikettenbänder treten häufig in der Mittelkornsortierung als Störstoff aus.

Zu Beginn wird das Mittelkorn auf eisenhaltige Abfälle, unter Verwendung eines Überbandmagnets, sortiert. Das Material wird anschließend unter Verwendung von Nahinfrarot (NIR)-Technologie sortiert. Zu Beginn wird Ersatzbrennstoff (EBS) aussortiert um den Materialstrom zu reduzieren. Im Anschluss wird Papier, Pappe und Kartonagen (PPK) aussortiert und mit einem weiteren NIR das PPK von noch enthaltenen Störstoffen getrennt. Nach der Ausfrachtung des EBS und des PPK, wird das Holz mit NIR-Technik aus dem Materialstrom aussortiert. Als letzter Schritt der Mittelkornsortierung, sortiert ein\*e Mitarbeiter\*in das Material händisch nach.

#### 2.1.7.1 Nahinfrarotsortierung

Für bestimmte Partikelgrößen eignet sich eine Sortierung mit NIR-Maschinen. Die Maschine besteht aus einer Scannereinheit und einer Ventilleiste (Tomra, 2023). Der Scanner befindet sich über dem Förderband um die Materialien zu erkennen. Eine schematische Darstellung ist in Abbildung 5 zu erkennen. Hierzu wird konstantes weißes Licht auf das Förderband gestrahlt und die darauf liegenden Materialien absorbieren einen Teil dieses Lichts. Jedes Material hat bestimmte Wellenlängen, welche es absorbiert. Die Intensität und die Wellenzahl der Absorption ist abhängig von dem molekularen Aufbau des Moleküls. Jedes Molekül hat bei bestimmten Wellenzahlen ein bestimmtes Absorptionsspektrum. Es entsteht durch das Anregen von Atome und den Bindungen innerhalb des Moleküls. Neben den Normalschwingungen wie beispielsweise Kippschwingungen, Deformationsschwingungen und Valenzschwingungen, ergeben sich aus dem Zusammenwirken der Normalschwingungen Kombinationsschwingungen. Bereits ein Molekül wie Formaldehyd besitzt sechs Normalschwingungen. Mit steigender Atomzahl nimmt auch die Anzahl der möglichen Normalschwingungen zu (Hecht, 2019).

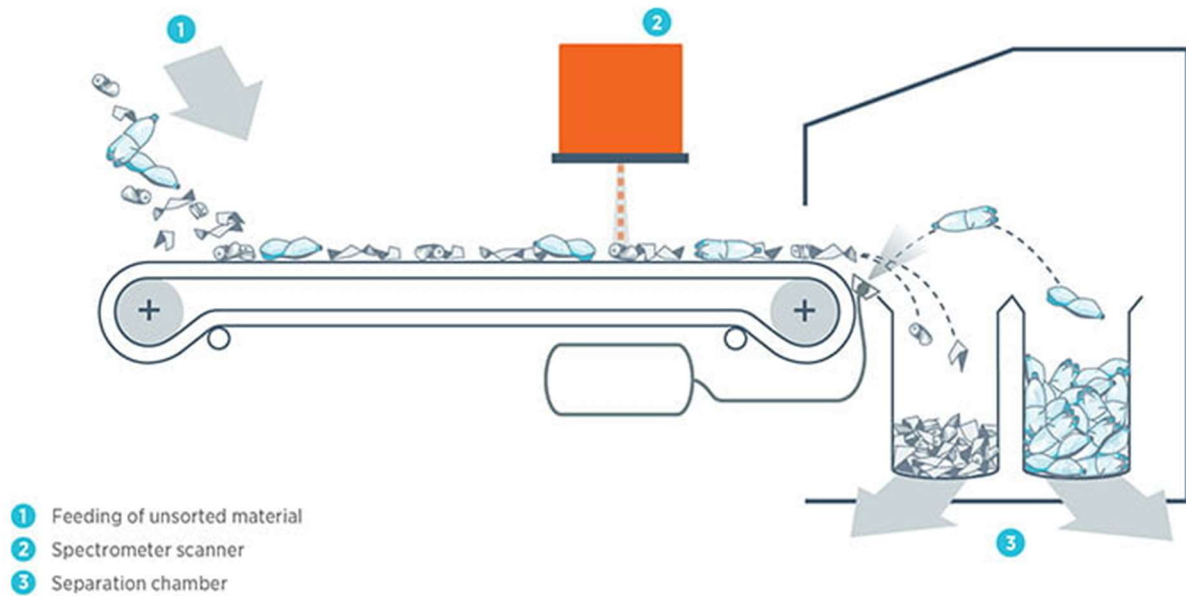


Abbildung 5: Schematische Darstellung der NIR-Sortierung (Tomra)

Die reflektierte Strahlung wird von der Scannereinheit der NIR-Maschine aufgenommen und zu einem Absorptionsspektrum verarbeitet. Das Spektrum des Materials wird mit den Spektren aus einer Datenbank der NIR-Geräte verglichen und somit identifiziert (Tomra). Nach der Erkennung wird überprüft, ob das Material aus dem Stoffstrom sortiert werden soll. Handelt es sich um das gesuchte Material, wird ein Signal an die Düsenleiste gegeben und per Luftstoß aus dem Abfallstrom geschossen (Tomra).



### 2.1.7.2 Ersatzbrennstoffgewinnung

Im ersten Schritt der vollautomatischen Sortierung wird Ersatzbrennstoff (EBS) aus dem Stoffstrom aussortiert. Das NIR-Aggregat ist so eingestellt, dass es folgende Materialien ausschießt:

- Polyethylen (PE)
- Polypropylen (PP)
- Textilien
- Tetrapacks
- Schaumstoff
- Styropor

Von dem NIR-Gerät aussortiertes EBS wird in einen unter der Sortierung liegenden Bunker befördert und anschließend zusammen mit dem EBS aus dem Überkorn gelagert. Das EBS wird dem thermischen Recycling zugeführt, um u.A. in Kraftwerken Wärme oder Strom zu erzeugen.

### 2.1.7.3 Papiersortierung

Das zweite NIR-Gerät sortiert Papier, Pappe und Kartonagen (PPK) aus. Aufgrund der Vermischung der drei Materialien wird es auch B-Papier genannt.

Um eine hohe Reinheit des PPK zu erzielen, wird das aussortierte Material mit einem zweiten NIR-Gerät gereinigt. Hierbei sortiert das Aggregat alles, was nicht zur PPK gehört. Hintergrund ist, dass der Anteil an Papier deutlich höher ist als der der Störstoffe. Somit wird viel Energie gespart, da die Druckluft nur verwendet wird um Störstoffe auszusortieren. Auch ist der zweite NIR-Sortierer besser ausgestattet. Er nutzt zusätzlich Lasertechnik um im 3D Bereich zu arbeiten. Da PPK häufig flach sind, unterstützt der Laser bei der Ausbringung der Störstoffe. Eine weitere Sonderausstattung ist die Farbkamera, mit der gezielt Farben erkannt werden können. Da häufig gelbe Etikettenbänder (folienbeschichtetes Papier) fälschlicherweise als Papier vom NIR-Gerät erkannt werden, sorgt die Farbkamera für eine deutliche Zuordnung als Störstoff.

#### 2.1.7.4 Holzsortierung

Im letzten Schritt der NIR-Sortierung wird das Holz aus dem Materialstrom entfernt. Da das Holz eine größere Dichte als EBS und PPK ausweist, wird hier eine Ventilleiste mit größeren Ventilen verwendet und auch mit einer größeren Luftmenge gearbeitet. Durch den Mehr-Einsatz von Luft kommt es zu fehlerhaften Aussortierungen von Folien, Papier und anderen leichten Materialien. Damit diese nicht mit dem Holz aussortiert werden, sorgt eine Leichtstoffabsaugung für eine zusätzliche Reinigung des Holzes.

#### 2.1.7.5 Händische Nachsortierung

Im letzten Schritt der Mittelkornsortierung sortiert ein\*e Mitarbeiter\*in das übrig gebliebene Material nach. Ziel ist es, nicht von den Maschinen erfasste Wertstoffe auszusortieren und Störstoffe zu entfernen. Die aussortierten Stoffe sind der folgenden Tabelle 1 zu entnehmen.

*Tabelle 1: Sortierung Mittelkorn*

<b>Wertstoffe</b>	<b>Störstoffe</b>
Papier	Steine
Pappe	Gefahrstoffe
Holz	/
Kunststoffe	/
Metalle	/

#### 2.1.7.6 Nicht-Eisen-Abscheider

Um den Anteil an NE-Metallen im EBS zu reduzieren werden diese nach der Überkornsortierung maschinell nachträglich aussortiert. Es handelt sich um das gleiche Bauteil wie unter Kapitel 2.1.6.2 für das Unterkorn beschrieben. Die NE-Abscheidung wurde bewusst an das Ende der Sortierung gebaut, da bei einer geringeren Bandbelegung die NE-Metalle besser aussortiert werden. Zudem werden wenig Störstoffe wie Folie mit aussortiert.

## 2.1.8 Überkornsortierung

In der Überkornsortierung wird Material der Korngröße >250mm händisch sortiert. Hierfür sind vier Mitarbeiter\*innen zuständig. In der ca. 30m langen Sortierbühne werden neben den in Tabelle 2 aufgelisteten Wertstoffen Stör- und Gefahrstoffe aussortiert.

*Tabelle 2: Sortierung Überkorn*

<b>Wertstoffe</b>
Papier (weiß)
Pappe
Eimer und Kanister
Eisenmetalle
Nichteisenmetalle
Folie
Holz

Alle Materialien, bis auf die Metalle, werden nach der Aussortierung über sogenannte Fallgatter in die Bunker befördert. Die Metalle werden in der Sortierung gelagert. Der/die Vorarbeiter\*in der Sortierung sortiert die Metalle nach. Er trennt hierbei zwischen: Aluminium-Geschirr, V2A-Edelstahl, Kupfer, Haushaltskabel, Messing und Elektroschrott. Sobald der Lagerplatz ausgelastet ist, werden die Metalle aus der Sortierung transportiert um vermarktet zu werden. Das Papier wird auch A-Papier genannt, es handelt sich um rein weißes Papier.

### 2.1.8.1 Eisenabscheider

Um das Material als ein EBS zu vermarkten, wird wie bei der Mittelkornsortierung unter Verwendung eines Überbandmagnets eisenhaltiger Schrott aussortiert. Der Grund, das FE-Materialein erst nach der Sortierung aus dem Stoffstrom ausgeschleust werden ist, dass sich vor der Handsortierung zu viel Material auf dem Förderband befindet. Der Magnet könnte hierbei kaum etwas aussortieren oder würde viele Fehlsortierung verursachen. Ebenfalls würden große Teile aufgrund ihres hohen Gewichtes von mehr als 5kg nicht vom Überbandmagnet erfasst werden, da das Magnetfeld nicht stark genug ist. Große Eisenteile werden von den Mitarbeiter\*innen in der Handsortierung aussortiert.

## 2.1.9 Zusammenführung der Mittel- und Überkornsartierung

Im Anschluss der Mittel- und Überkornsartierung werden beide Materialströme zusammengeführt.

### 2.1.9.1 Windsichtung

Um das EBS-Vormaterial von schweren niederchalarischen Materialien zu trennen, wird unter Verwendung eines Gebläses das Material sortiert. In Abbildung 6 ist eine schematische Darstellung der Windsichtung zu sehen. Je nach Bedarf kann die Zusammensetzung in Bezug auf die Dichte der beiden Fraktion geändert werden. Hierzu wird eine bewegliche Mauer versetzt um die Verteilung des leichten und schweren Materials zu ändern. Grund für die Trennung ist, dass Verbrennungsanlagen das EBS aufgrund der höheren Brennwerte nicht verarbeiten können. Die schwereren Anteile in dem Abfall hingegen weisen geringere Werte auf und sind für den Verbrennungsprozess geeignet.

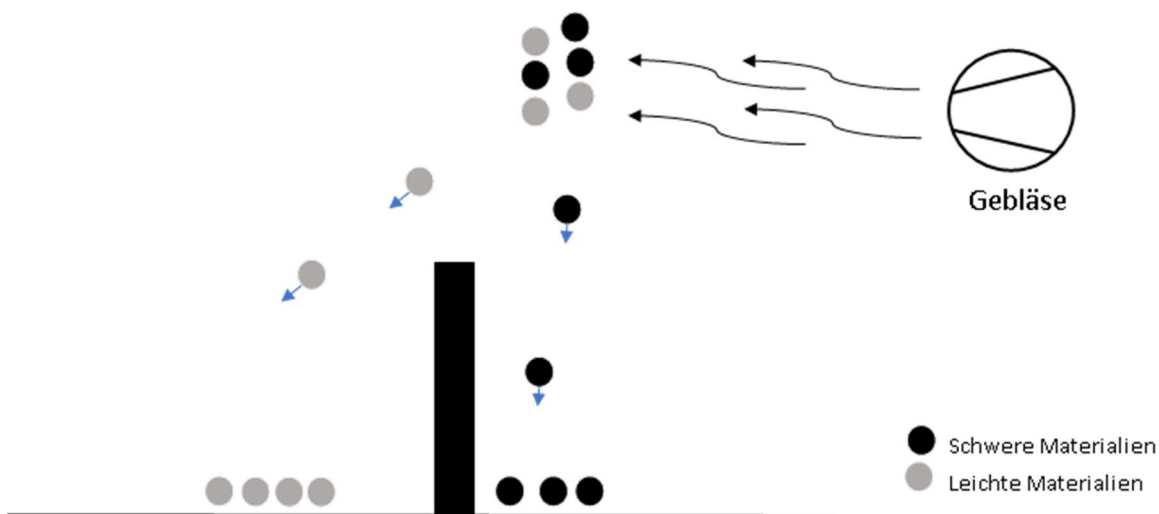


Abbildung 6: Windsichtung (eigene Darstellung)

## 2.2 Versuchsdesign und Durchführung

Ziel ist es, die Sortierleistung der Anlage zu erfassen und zu bewerten. Dazu wird festgelegt, welche Parameter für die Auswertung relevant sind.

Unterteilt ist die Sortierung in drei Bereiche. Das Unterkorn bis 50 mm, das Mittelkorn von 50 bis 250 mm und das Überkorn mit über 250 mm.

In der Unterkornsortierung sind die relevanten Parameter die Sortierleistung der FE- und der NE-Abscheider. Auch soll ermittelt werden, wie viel Unterkorn übrigbleibt. Um die Sortierleistung zu ermitteln, werden die jeweiligen Fraktionen gewogen. Dafür werden die Sammelbehälter der FE- und NE-Sortierung geleert, das Leergewicht ermittelt und am Ende der Laufzeit gewogen. Der Transport der Behälter erfolgt mit einem Gabelstapler. Das restliche Unterkorn wird ebenfalls vor der Laufdauer geleert und am Ende mit einem Radlader aufgenommen und gewogen. Für die Ermittlung des Nettogewichts werden die Leergewichte der Behälter und des Radladers ermittelt.

Die Sortierleistung des Mittelkorns beinhaltet, wie das Unterkorn, eine FE- und NE-Metallsortierung. Zudem soll der Austrag des EBS, des PPK, des Holzes und der händischen Nachsortierung analysiert werden. Die FE- und die NE-Metalle werden in einem Container gesammelt und die Brutto- sowie Nettogewichte ermittelt. Zudem ist die der Austrag und die Reinheit des Papiers und des EBS relevant. Für die Bestimmung der Sortierleistung des EBS wird das Material gewogen und der Zeitraum der Messung festgehalten. Um den Austrag der Fraktion PPK zu ermitteln, werden die Wiegescheine ausgewertet. Eine Messung an der Anlage ist möglich, aber wird genauer, wenn die Abfahren über einen längeren Zeitraum ausgewertet werden. Um die Reinheit des EBS und des Papiers zu bestimmen, werden Proben des aussortierten Materials gesammelt und händisch zwischen dem Zielmaterial und Störstoffen getrennt. Das Holz kann in der NIR-Sortierung nicht analysiert werden. Es wird zusammen mit dem aussortierten Holz aus der Überkornsortierung gelagert. In der händischen Nachsortierung sind die Sortierleistung des Papiers, der Pappe, des Holzes und der Metalle relevant. Die Fraktion der aussortierten Kunststoffe ist erfahrungsgemäß so gering, dass eine Analyse nicht stattfindet. In der Nachsortierung werden die Materialien in Behältern gesammelt und mit einer Kofferwaage gewogen. Die Waage hat eine Genauigkeit von 10 g. Zudem wird das Leergewicht der Behälter ermittelt um das Nettogewicht der Materialien zu erhalten.

Im Überkorn werden die aussortierten FE-Metalle in einem Container gesammelt und anschließend gewogen. Es werden Zeitraum und Leergewicht festgehalten, um die Sortierleistung zu berechnen. Die Wertstoffe Folie, Papier, Pappe und Holz werden im normalen Anlagenbetrieb direkt in die Bunker transportiert. Für die Sortiersuche werden Papier, Pappe und Holz in Behältern gesammelt und anschließend mit einer Kofferwaage

gewogen, das Leergewicht der Behälter wird ebenfalls gemessen. Da die Folie aufgrund ihrer Größe und der geringen Dichte nicht gut in den Behältern gelagert werden kann, wird sie in dem Bunker gesammelt und mit einem Radlader gewogen.

### 3. Ergebnisse

Im Folgenden werden die Ergebnisse der Versuche dargestellt. Dabei wird auf die Messergebnisse der Unterkorn, Mittelkorn und Überkornsortierung eingegangen. In Kapitel 3.2 wird des Weiteren die Auswertung dieser Ergebnisse, sowie die Stoffstromauswertung veranschaulicht.

#### 3.3 Darstellung der Messergebnisse

##### 3.1.1 Unterkornsortierung

Die Ergebnisse der Unterkornsortierung umfasst die FE-, NE-Metalle und die Fraktion Sand. Für die FE-Metalle im Unterkorn wurden die in Tabelle 3 gezeigten Werte ermittelt.

*Tabelle 3: Messergebnisse Unterkorn FE*

<b>Material</b>	<b>Datum</b>	<b>Gewicht [t]</b>	<b>Leergewicht [t]</b>	<b>Nettogewicht [t]</b>	<b>Laufzeit [h]</b>
FE-Metall	31.08.2023	6,42	6,27	0,15	1,5
FE-Metall	06.09.2023	8,61	7,98	0,63	6,58
FE-Metall	07.09.2023	6,73	6,27	0,46	4,5

Die Messwerte für die aussortierten NE-Metalle der Unterkornfraktion sind in der folgenden Tabelle 4 enthalten.

*Tabelle 4: Messergebnisse Unterkorn NE*

<b>Material</b>	<b>Datum</b>	<b>Gewicht [t]</b>	<b>Leergewicht [t]</b>	<b>Nettogewicht [t]</b>	<b>Laufzeit [h]</b>
NE-Metall	31.08.2023	6,07	6,06	0,01	2
NE-Metall	06.09.2023	7,91	7,77	0,14	6,5
NE-Metall	07.09.2023	6,12	6,04	0,08	4,17

Die Ergebnisse für den Sand sind in der folgenden Tabelle 5 abgebildet.

*Tabelle 5: Messergebnisse Unterkorn Sand*

<b>Material</b>	<b>Datum</b>	<b>Gewicht [t]</b>	<b>Leergewicht [t]</b>	<b>Nettogewicht [t]</b>	<b>Laufzeit [h]</b>
Sand	31.08.2023	6,08	6,07	0,01	2
Sand	06.09.2023	7,88	7,76	0,12	6,66
Sand	07.09.2023	6,06	6,04	0,02	4,25

### 3.1.2 Mittelkornsortierung

Untersucht wurden im Mittelkorn die Sortierleistung der FE- und NE-Metalle. Das EBS und die Fraktion PPK wurden auf die Reinheit untersucht. Die Messergebnisse sind im Folgenden abgebildet.

Tabelle 6 zeigt die Versuchsergebnisse der FE-Metallsortierung. Dabei wurde aus dem Brutto- und dem Leergewicht das Nettogewicht ermittelt.

*Tabelle 6: Messergebnisse Mittelkorn FE*

Datum	Bruttogewicht [t]	Leergewicht	Nettogewicht [t]	Laufdauer [h]
05.09.2023	18,35	15,88	2,470	7,2
11.09.2023	18,42	15,18	3,240	6,5
13.09.2023	19,970	15,210	4,560	11,25

Für die NE-Metalle des Mittelkorns sind in Tabelle 7 die Messergebnisse.

*Tabelle 7: Messergebnisse Mittelkorn NE*

Datum	Bruttogewicht [t]	Leergewicht [t]	Nettogewicht [t]	Laufdauer [h]
05.09.2023	0,18	0,15	0,030	1,1
11.09.2023	0,23	0,15	0,080	2
19.09.2023	0,25	0,15	0,100	2,67

Die Messergebnisse zur Bestimmung der Reinheit der Papiersortierung sowie die Sortierung des EBS sind in Tabelle 8 und 9 dargestellt.

*Tabelle 8: Messergebnisse Mittelkorn Papier*

Datum	Bruttogewicht Papier [kg]	Bruttogewicht Störstoffe [kg]	Nettogewicht Papier [kg]	Nettogewicht Störstoffe [kg]
05.09.2023	4,30	0,46	4,22	0,38
11.09.2023	7,54	0,66	7,46	0,58
15.09.2023	4,14	0,44	4,06	0,36



*Tabelle 9: Messergebnisse Mittelkorn EBS*

Datum	Bruttogewicht EBS [kg]	Bruttogewicht Störstoffe [kg]	Nettogewicht EBS [kg]	Nettogewicht Störstoffe [kg]
05.09.2023	3,46	1,24	3,38	1,16
11.09.2023	5,67	2,41	5,59	2,33
15.09.2023	4,02	0,68	3,94	0,60

Für die erste Messung der händischen Nachsortierung wurden die in Tabelle 10 abgebildeten Messwerte ermittelt.

*Tabelle 10: Messergebnisse 1 Mittelkorn Nachsortierung*

	Holz		Pappe	Papier	Metalle
<b>Laufzeit [h]</b>	1,42				
<b>Bruttogewicht [kg]</b>	49,80	38,50	42,03	28,72	47,88
<b>Behältergewicht [kg]</b>	12,83	11,94	12,30	11,41	7,26
<b>Nettogewicht [kg]</b>	36,97	26,56	29,73	17,31	40,62
<b>Summe [kg]</b>	63,53		/	/	/

Im Folgenden sind die Werte der zweiten Messung in Tabelle 11 dargestellt.

*Tabelle 11: Messergebnisse 2 Mittelkorn Nachsortierung*

	Holz	Pappe	Papier	Metalle
<b>Laufzeit [h]</b>	1,08			
<b>Bruttogewicht [kg]</b>	47,54	31,22	22,31	34,21
<b>Behältergewicht [kg]</b>	12,81	12,04	12,45	8,02
<b>Nettogewicht [kg]</b>	34,73	19,18	9,86	26,19

### 3.1.3 Überkornsartierung

Die Ergebnisse der Überkornsartierung werden im Folgenden abgebildet.

Für die Sortierung der Folie ergaben sich folgende Messwerte der Tabelle 12.

*Tabelle 12: Messergebnisse Überkorn Folie*

Datum	Bruttogewicht [t]	Leergewicht	Nettogewicht [t]	Laufdauer [h]
05.09.2023	19,31	18,59	0,720	6,7
11.09.2023	19,26	18,51	0,750	6,5
19.09.2023	18,73	18,56	0,170	1,75

Bei der Papiersortierung wurden die in Tabelle 13 folgenden Werte ermittelt.

*Tabelle 13: Messergebnisse Überkorn Papier*

Datum	Bruttogewicht [kg]	Leergewicht [kg]	Nettogewicht [kg]	Laufdauer [h]
05.09.2023	61,60	24,79	36,81	1,42
11.09.2023	19,30	7,87	11,43	0,67
19.09.2023	46,59	39,40	7,19	1

Für das Holz der Handsortierung wurden die in Tabelle 14 dargestellten Werte ermittelt.

*Tabelle 14: Messergebnisse Überkorn Holz*

Datum	Bruttogewicht [kg]	Leergewicht [kg]	Nettogewicht [kg]	Laufdauer [h]
05.09.2023	412,26	110,22	302,04	1,42
11.09.2023	34,78	11,56	23,22	0,67
19.09.2023	102,04	46,55	55,49	1

In Tabelle 15 sind die Messwerte für die Metallsortierung dargestellt.

*Tabelle 15: Messergebnisse Überkorn Metalle*

Datum	Bruttogewicht [kg]	Leergewicht [kg]	Nettogewicht [kg]	Laufdauer [h]
05.09.2023	76,76	24,86	51,90	1,42
11.09.2023	29,7	7,88	21,82	0,67
19.09.2023	30,33	21,47	8,86	1

Die folgende Tabelle 16 enthält die Messwerte der FE-Sortierung.

*Tabelle 16: Messergebnisse Überkorn FE-Abscheider*

Datum	Bruttogewicht [t]	Leergewicht [t]	Nettogewicht [t]	Laufdauer [h]
05.09.2023	0,61	0,39	0,220	1,2
12.09.2023	0,85	0,39	0,460	2,4
14.09.2023	0,87	0,38	0,490	2,5

### 3.3 Auswertung der Messergebnisse

#### 3.2.1 Unterkornsartierung

Um eine Aussage über die Sortierleistung des Unterkorns zu erhalten, wird das aussortierte Material in Relation zur Anlagenlaufzeit gesetzt. Daraus ergeben sich die Durchsätze in  $\frac{\text{kg}}{\text{h}}$ . In Tabelle 17 sind die Durchsätze dargestellt:

Tabelle 17: Auswertung Unterkorn

Material	Durchsatz [kg/h]	Durchsatz [kg/h]	Durchsatz [kg/h]
NE-Metall	5,00	21,54	19,20
Sand	5,00	18,02	4,71
Eisen	100,00	95,70	102,22

Die Abbildung 7 zeigt die Durchsätze der drei Fraktionen.

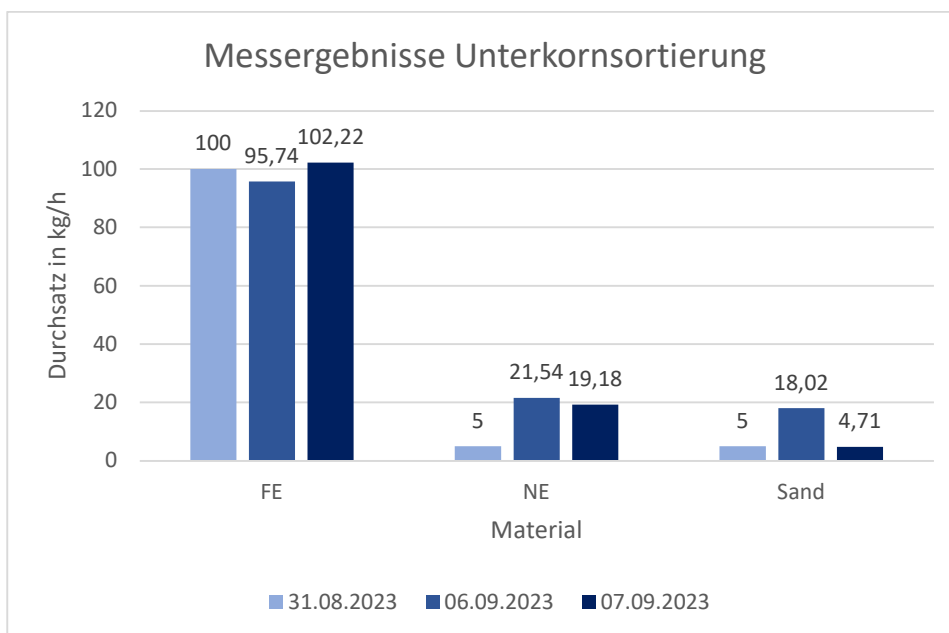


Abbildung 7: Messergebnisse Unterkornsartierung (eigene Darstellung)

### 3.2.2 Mittelnkornsartierung

In der Mittelnkornsartierung werden die Durchsätze der Metalle und die Reinheiten des PPK und EBS untersucht.

Die Tabelle 18 zeigt die Sortierleistung der FE-Metalle in der Mittelnkornsartierung.

Tabelle 18: Auswertung Mittelnkorn FE-Abscheider

Datum	Durchsatz [t/h]
05.09.2023	0,343
11.09.2023	0,498
13.09.2023	0,405

Die Sortierleistung der FE-Metalle ist in der Abbildung 8 grafisch ausgewertet.

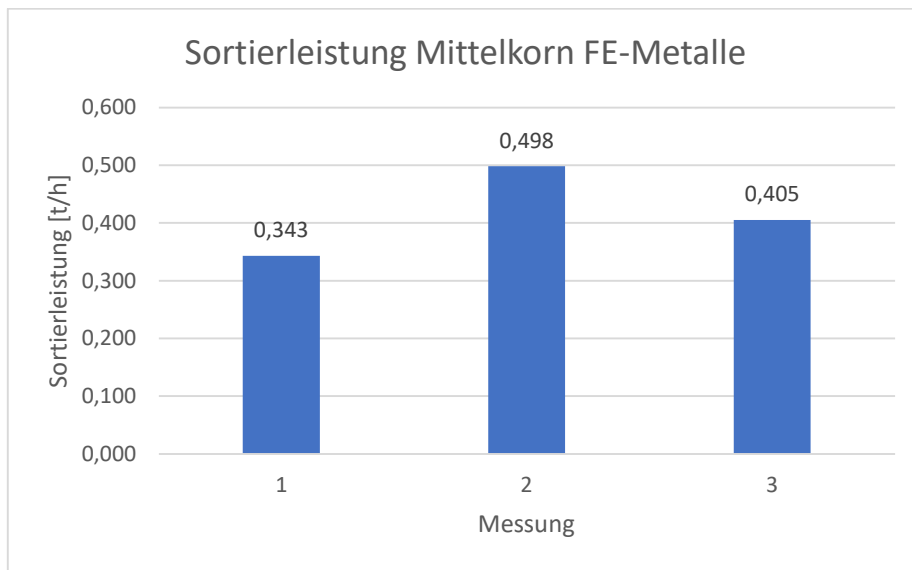


Abbildung 8: Sortierleistung Mittelkorn FE-Abscheider (eigene Darstellung)

Für die NE-Metallsortierung ergeben sich die in Tabelle 19 dargestellten Durchsätze.

Tabelle 19: Auswertung Mittelkorn NE-Abscheider

Messung	Datum	Durchsatz [t/h]
1	05.09.2023	0,027
2	11.09.2023	0,040
3	19.09.2023	0,037

Die Abbildung 9 stellt die Durchsätze der NE-Metalle da.

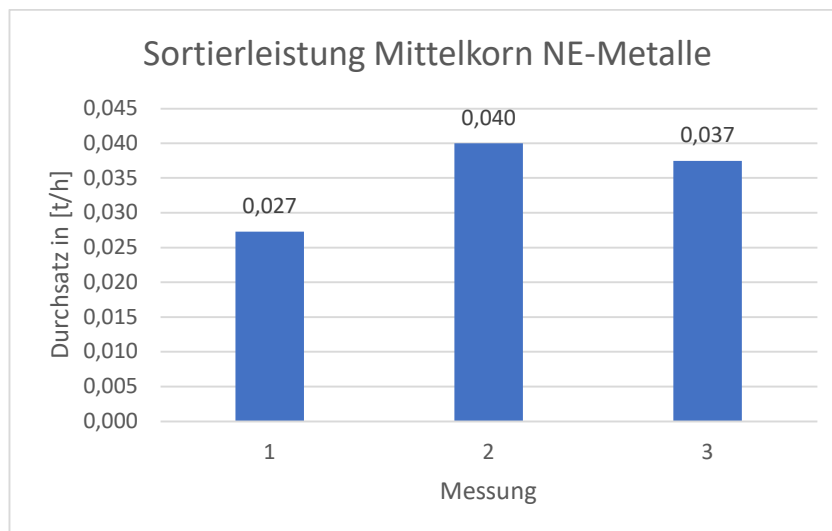
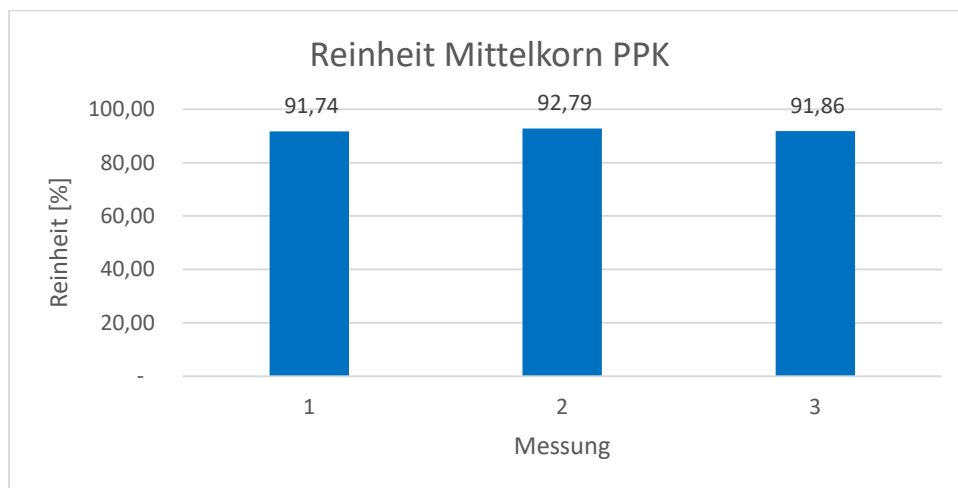


Abbildung 9: Sortierleistung Mittelkorn NE-Abscheider (eigene Darstellung)

Die Auswertung der Reinheit der PPK-Sortierung ist in Tabelle 20 und Abbildung 10 abgebildet.

*Tabelle 20: Auswertung Mittelkorn PPK*

Messung	Datum	Reinheit [%]
1	05.09.2023	91,74
2	11.09.2023	92,79
2	15.09.2023	91,86



*Abbildung 10: Reinheit Mittelkorn PPK (eigene Darstellung)*

Für das EBS ergaben sich die in Tabelle 21 und Abbildung 11 dargestellten Reinheiten.

*Tabelle 21: Auswertung Mittelkorn EBS*

Messung	Datum	Reinheit [%]
1	05.09.2023	74,45
2	11.09.2023	70,58
2	15.09.2023	86,78

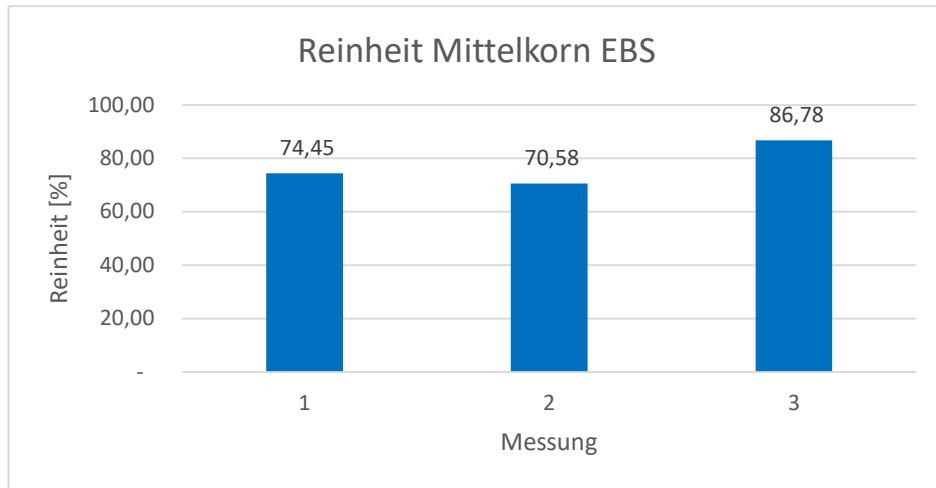


Abbildung 11: Reinheit Mittelkorn EBS (eigene Darstellung)

Für die Sortierleistung der händischen Nachsortierung im Mittelkorn ergeben sich die Tabelle 22 und 23 sowie in Abbildung 12 dargestellten Werte.

Tabelle 22: Auswertung 1 Mittelkorn Nachsortierung

Material	Holz	Pappe	Papier	Metalle
Sortierleistung [kg/h]	44,74	20,94	12,19	28,61

Tabelle 23: Auswertung 2 Mittelkorn Nachsortierung

Material	Holz	Pappe	Papier	Metalle
Sortierleistung [kg/h]	32,16	17,76	9,13	24,25

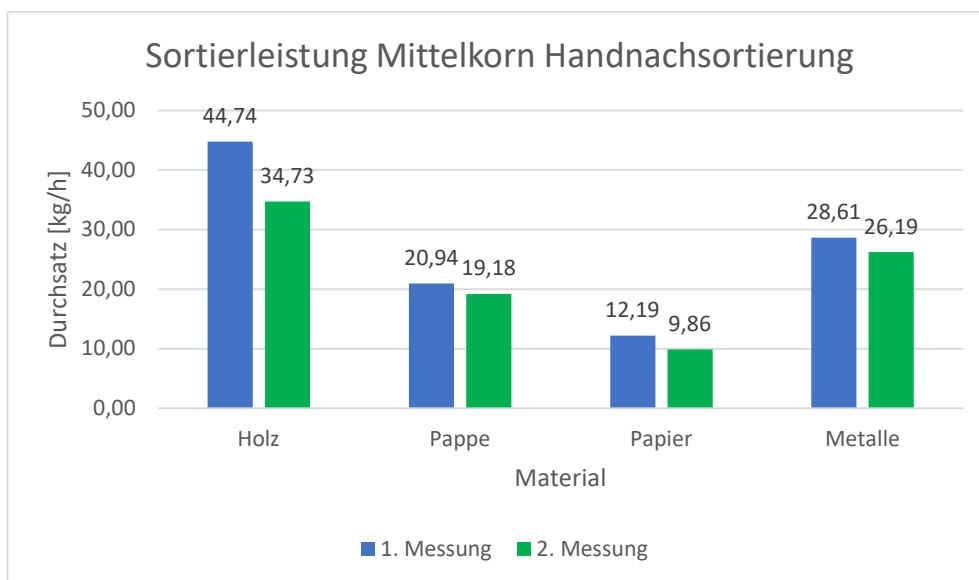


Abbildung 12: Sortierleistung Mittelkorn Handnachsartierung (eigene Darstellung)

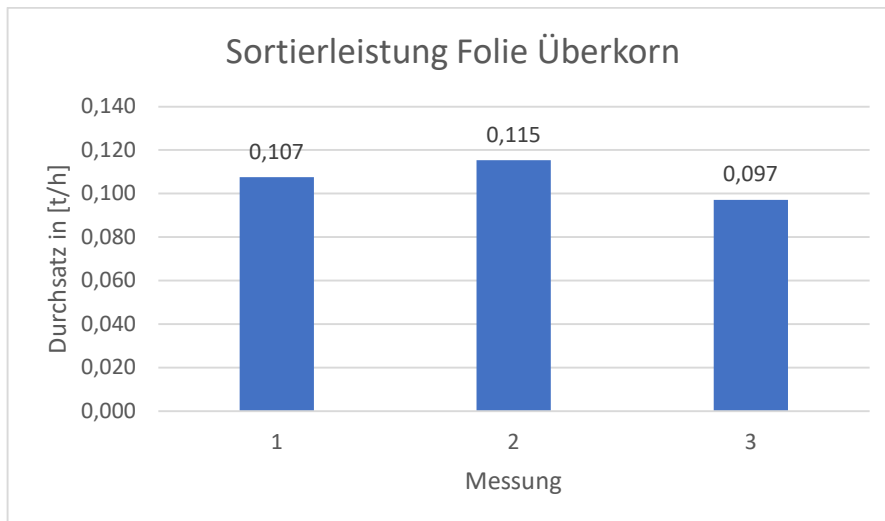
### 3.2.3 Überkornsortierung

Die Auswertung der Überkornsortierung beinhaltet die Sortierleistung des Papiers, des Holz, der Folie und der per Hand aussortierten Metalle. Zudem wird die Sortierleistung des FE-Abscheiders ausgewertet.

Die Werte für die Sortierung der Folie sind in der Tabelle 24 und der Abbildung 13 dargestellt.

*Tabelle 24: Auswertung Überkorn Folie*

Messung	Datum	Durchsatz [t/h]
1	05.09.2023	0,107
2	11.09.2023	0,115
3	19.09.2023	0,097



*Abbildung 13: Sortierleistung Überkorn Folie (eigene Darstellung)*

Die Auswertung der Messergebnisse Papiersortierung sind in Tabelle 25 und Abbildung 14 abgebildet.

*Tabelle 25: Auswertung Überkorn Papier*

Messung	Datum	Durchsatz [kg/h]
1	05.09.2023	25,92
2	11.09.2023	17,06
3	19.09.2023	7,19

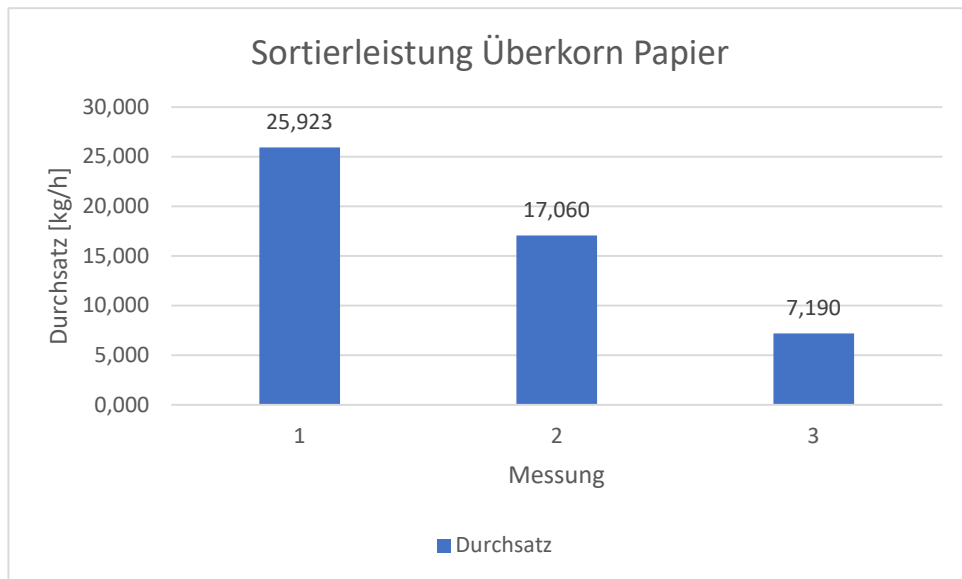


Abbildung 14: Sortierleistung Überkorn Papier (eigene Darstellung)

In Tabelle 26 und Abbildung 15 sind die ausgewerteten Messergebnisse der Holzsortierung dargestellt.

Tabelle 26: Auswertung Überkorn Holz

Messung	Datum	Durchsatz [kg/h]
1	05.09.2023	212,70
2	11.09.2023	34,66
3	19.09.2023	55,49

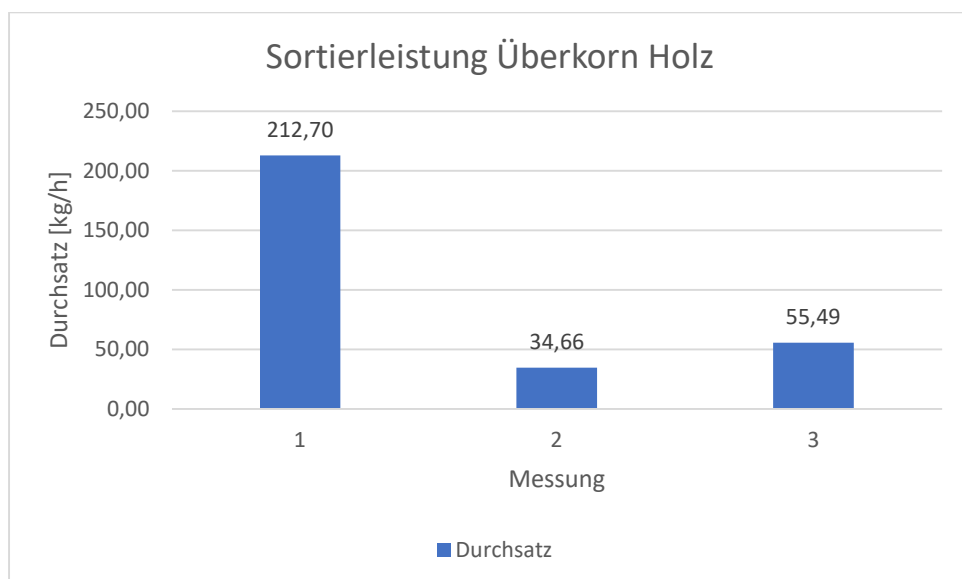


Abbildung 15: Sortierleistung Überkorn Holz (eigene Darstellung)



Für die händische Aussortierung der Metalle ergaben sich die in Tabelle 27 und Abbildung 16 errechneten Auswertungsergebnisse.

Tabelle 27: Auswertung Überkorn Metalle

Messung	Datum	Durchsatz [kg/h]
1	05.09.2023	36,55
2	11.09.2023	32,57
3	19.09.2023	8,86

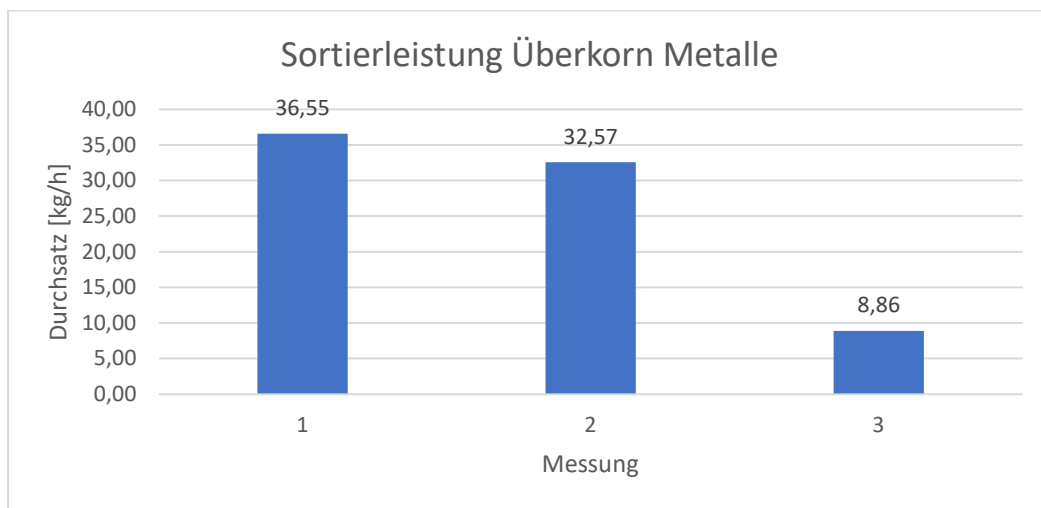


Abbildung 16: Sortierleistung Überkorn Metalle (eigene Darstellung)

Als letzte Fraktion der Überkornsortierung wurde die Sortierleistung des FE-Abscheiders am Ende der Überkornsortierung ausgewertet. Die Ergebnisse sind in Tabelle 28 und Abbildung 17 dargestellt.

Tabelle 28 Auswertung Überkorn FE-Abscheider:

Messung	Datum	Durchsatz [t/h]
1	05.09.2023	0,183
2	12.09.2023	0,192
3	14.09.2023	0,196

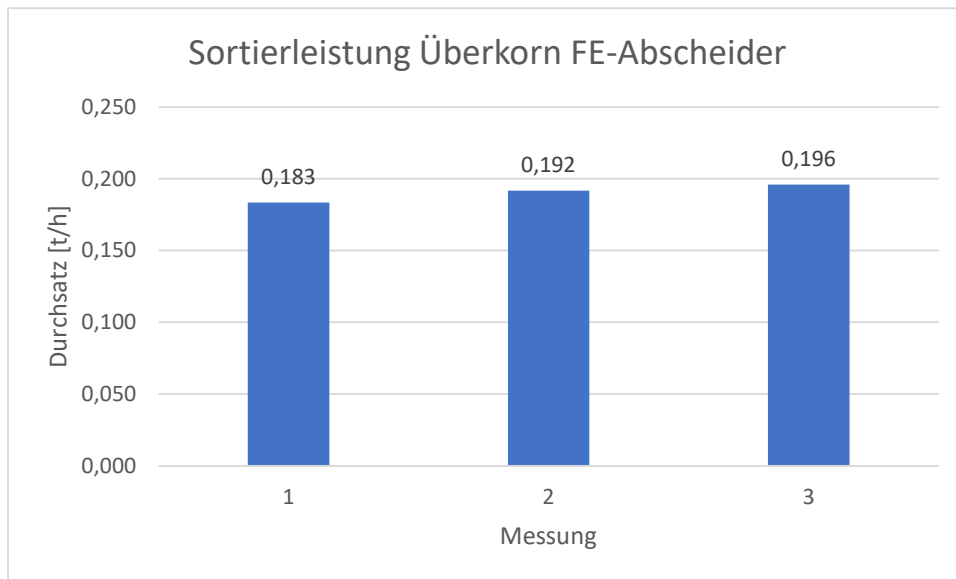


Abbildung 17: Sortierleistung Überkorn FE-Abscheider (eigene Darstellung)

### 3.2.4 Stoffstromauswertung

Anhand der Menge der Lagerbestände und der Abfuhr berechnet die Bestsort Hamburg GmbH monatlich die aussortierte Menge. In der folgenden Tabelle 29 sind die Monate Mai, Juni und Juli abgebildet. Zudem wurden die Werte durch die monatliche Anlagenlaufzeit geteilt, im Anschluss wurde der Mittelwert der drei Monate berechnet.

Tabelle 29: Darstellung der Daten aus dem Stoffstrom

Material	Sortierleistung Mai [t/h]	Sortierleistung Juni [t/h]	Sortierleistung Juli [t/h]	Mittelwert [t/h]
Pappe	0,089	0,046	0,204	0,113
A-Papier	0,017	0,020	0,000	0,012
PPK	0,395	0,574	0,586	0,519
Folien	0,146	0,001	0,256	0,134
Mischkunststoffe	0,004	0,004	0,000	0,003
Eimer und Kanister	0,019	0,012	0,025	0,019
Scherschrott	0,084	0,071	0,101	0,085
Schrott	0,490	0,555	0,483	0,509
Aluminium MBA	0,021	0,020	0,027	0,023
Aluminium Geschirr	0,010	0,004	0,012	0,009
V2A	0,000	0,003	0,007	0,003
Kupfer	0,000	0,000	0,000	0,000
Messing	0,000	0,002	0,000	0,001

Die Tabelle 30 zeigt die errechnete Recyclingquoten der Monate Mai bis Juli.

*Tabelle 30: Recyclingquote*

Monat	Mai	Juni	Juli
Recyclingquote nach GewAbfV	18,95%	18,33%	21,09%

Da keine Deponierung von Abfällen stattfindet, sondern alle Abfälle stofflich oder thermisch weiterverarbeitet werden, beträgt die Sortierquote 100%, dabei sind Gefahrstoffe nicht einberechnet.

## 4. Diskussion

Die Diskussion beinhaltet die Interpretationen der jeweiligen Sortierfraktionen in den Anlagenbetrieb. Zudem werden auf die Herausforderung der Validierung und Entwicklungsmöglichkeiten der Sortieranlage eingegangen.

### 4.1 Interpretation der Auswertung in den Anlagenbetrieb

Im Folgenden werden die Messergebnisse in den Anlagenbetrieb interpretiert. Dabei wird zwischen den Unterkorn, dem Mittelkorn und dem Überkorn in der Interpretation unterschieden.

#### 4.1.1 Unterkornauswertung

Der Durchsatz der FE-Sortierung ist mit einem Durchsatz von ca.  $100 \frac{\text{kg}}{\text{h}}$  in den drei Messungen nur gering abweichend. In der NE-Sortierung fallen die Sortierleistungen deutlich geringer aus. Der Austrag von NE-Metallen in der ersten Messung ( $5 \frac{\text{kg}}{\text{h}}$ ) weicht deutlich von den Ergebnissen der zweiten ( $21,54 \frac{\text{kg}}{\text{h}}$ ) und dritten Sortierung ( $19,18 \frac{\text{kg}}{\text{h}}$ ) ab. Die Abweichung kann mehrere Ursachen haben. Möglich ist, dass ein Fehler beim Wiegen und dem Festhalten der Messwerte aufgetreten ist. Auch kann es sein, dass die in dem Zeitraum sortierten Abfälle einen geringen Anteil an NE-Metallen beinhaltete. Da bei der zweiten und dritten Messung die Laufdauer deutlich höher war als bei der ersten Messung, ist davon auszugehen, dass der erste Wert bei der NE-Messung nicht dem realen Wert entspricht. Als einem realen Durchsatz nahekommenden Wert für die NE-Sortierung ist eine Sortierleistung von ca.  $20 \frac{\text{kg}}{\text{h}}$  anzunehmen. Der deutliche Unterschied zu der NE-Sortierung kann darin begründet werden, ein FE-Abscheider deutlich größere und schwerere Partikel als ein NE-Abscheider aussortieren kann. Zudem ist es erfahrungsgemäß im Anlagenbetrieb zu erkennen, dass die Abfälle weniger Aluminium enthalten. Die Ergebnisse des Sandes sind nicht sehr aussagekräftig. Der zweite Messwert weicht um mehr als den Faktor drei von den ersten und dritten ab. Der dritte Wert kann aufgrund der längeren Laufdauer eine höhere Zuverlässigkeit für eine Durchschnittsberechnung bieten.

#### 4.1.2 Mittelkornauswertung

Die Auswertung der Mittelkornsortierung beinhaltet die FE- und NE-Sortierleistung, die Sortierleistung der händischen Nachsortierung und die Reinheiten der Fraktionen EBS und PPK. Diese werden im Folgenden interpretiert und diskutiert.

Die Sortierleistung der FE-Metallmessungen bewegen sich zwischen  $0,343 \frac{t}{h}$  und  $0,498 \frac{t}{h}$ . Der dritte Messwert liegt mit  $0,405 \frac{t}{h}$  zwischen der ersten und zweiten Messung. Mit einer Laufzeit von 11,25 h ist die letzte Messung die längste. Der Unterschied in den Messungen ist bemessen auf die Laufzeit von 7,2 h, 6,5 h und 11,25 h recht stark. Möglich ist, dass die Anlage mit weniger Materialstrom arbeitete oder kleine Störungen hatte, die Sortierung einschränkten und somit die effektive Laufzeit geringer war. Zudem ist die genaue Abfallzusammensetzung schwierig zu bestimmen. Somit ist anzunehmen, dass sich die Sortierleistung in einem bei mehr als  $0,4 \frac{t}{h}$  aufhält.

Bei der NE-Sortierung variiert die die Sortierleistung zwischen  $0,027$  und  $0,04 \frac{t}{h}$ . Hierbei ist die erste Messung mit einer Laufzeit von 1 h der abweichende Wert. Die Abweichung kann durch die geringe Laufzeit entstanden sein. Durch die kurze Dauer hat eine Änderung der Zusammensetzung des Abfalls bei der Durchschnittsberechnung einen größeren Einfluss als bei längeren Laufzeiten.

Die Reinheit des EBS bewegt sich zwischen von 70,58 und 86,78 % in den Messungen. Dabei sind in den Messungen einzelne Abfallmaterialien ausschlaggebend. Ein fehlerhaft aussortiertes Stück Holz hat bei dem Umfang der Proben einen großen Einfluss auf die Reinheit. In welchem Bereich sich der wahre Wert bewegt ist schwierig zu bestimmen. Hierfür müsste der Umfang der Proben verändert werden. Durch z.B. mehr Proben mit einer größeren Masse könnte genauere Reinheit ermittelt und eine Fehlerbetrachtung auf mathematischer Ebene durchgeführt werden.

Hingegen ergeben die Auswertung der PPK-Reinheit sehr konstante Werte zwischen 91,74 und 92,79 %. Die maximale Abweichung beträgt 1,05%. Es ist anzunehmen, dass diese Werte der Realität entsprechen und die Sortierung abbilden.

Im Nachhinein hat sich herausgestellt, dass das NIR-Gerät eine längerfristige Störung in der Sensorik hatte. Damit ist es möglich, dass die Reinheit im Regelbetrieb noch höher ist.

Gestützt wird dies durch eine Analyse des Papiers aus dem Jahr 2022, in der die Reinheit bei zwei Versuchen über 98,5 % lag.

Bei der händischen Nachsortierung konnten nur zwei Sortierversuche unternommen werden. Die Sortierleistung für das Papier, die Pappe und das Metall sind hierbei relativ ähnlich. Bei dem Holz liegt die Abweichung hingegen bei  $10,01 \frac{\text{kg}}{\text{h}}$ . Die Abweichung im Bereich der Holzsortierung kann durch die Abweichung in der Abfallzusammensetzung zurückgeführt werden. Enthält der Abfall einen großen Anteil an Sperrmüll, steigt erfahrungsgemäß ebenfalls der Anteil an Holz.

#### 4.1.3 Überkornsartierung

Die Sortierleistung der Folie im Überkorn zeigt drei Werte, die relativ dicht beieinander liegen. Die Abweichung zwischen der minimalen und maximalen Sortierleistung liegt bei  $0,018 \frac{\text{t}}{\text{h}}$ . Der Durchsatz der aus dem Stoffstrom errechnet wurde, liegt über den gemessenen Werten. Man kann annehmen, dass sich der wahre Wert zwischen den gemessenen Werten und dem errechnet Wert von  $0,134 \frac{\text{t}}{\text{h}}$  liegt.

Bei der Auswertung der A-Papiersortierung ist zu erkennen, dass die drei Werte sich deutlich voneinander unterscheiden. Der Wert der Stoffstromrechnung liegt mit  $0,012 \frac{\text{t}}{\text{h}}$  zwischen den gemessenen Werten. Eine mögliche Sortierleistung lässt sich nicht bestimmen. Es ist anzunehmen, dass die tatsächliche Sortierleistung im unteren Bereich der Messungen liegt.

Auch der bei Holzsortierung zeigt sich eine deutliche Varianz in den Messwerten. Mit  $212,70 \frac{\text{kg}}{\text{h}}$  ist der erste Messwert deutlich größer als die zweite und dritte Messung mit  $34,66 \frac{\text{kg}}{\text{h}}$  und  $55,49 \frac{\text{kg}}{\text{h}}$ . Laut Aussage des Mitarbeiters in der Sortierung war der Anteil des Holzes für den Zeitraum der Messung außergewöhnlich hoch. Vor und nach dem Versuch war deutlich weniger Holz in dem Abfallstrom. Ein hoher Anteil an holzlastigen Abfällen wie Sperrmüll kann der Grund für den Ausreißerwert sein. Die Bestimmung einer Sortierleistung ist nicht möglich.

Bei der Sortierung der Metalle ist der dritte Messwert auffällig. Er ist deutlich geringer als die ersten beiden Messungen. Diese beiden weichen nur gering von einander ab und sind mit

36,55  $\frac{\text{kg}}{\text{h}}$  und 32,57  $\frac{\text{kg}}{\text{h}}$  dicht beieinander. Eine genaue Bestimmung ist nicht möglich, zu deuten ist aber ein realer Wert, der nah bei den Werten der ersten und zweiten Messung liegt.

Die Sortierleistung des nachgeschalteten FE-Abscheiders weist bei den drei Messungen eine maximale Differenz von 0,013  $\frac{\text{t}}{\text{h}}$  auf. Damit ist anzunehmen, dass der wahre Wert nicht viel von den gemessenen Werten abweicht und in der Nähe 0,183 bis 0,196  $\frac{\text{t}}{\text{h}}$  befindet.

## 4.2 Herausforderungen der Validierung

Zu Beginn der Bachelorarbeit wurden die zu untersuchenden Parameter an der Sortierung festgelegt. Jedoch stellte sich im Verlauf der Arbeit heraus, dass es nicht realisierbar ist, alle gewünschten Parameter zu messen. Der Restbestand des restlichen Unterkorns konnte nicht bestimmt werden. Ebenfalls war eine Durchsatzmessung des EBS aus der Mittelkornsortierung nicht realisierbar. Das Holz der NIR-Sortierung fällt in den gleichen Bunker wie das Holz der Überkornsortierung, somit war es nicht möglich, dies zu messen. Zudem war der Durchsatz für Hartkunststoffe sowie Eimer und Kanister sehr gering (Tabelle 29) und nicht zuverlässig messbar. Eimer und Kanister haben ebenfalls eine sehr geringe Sortierleistung. Die Werte in Tabelle 29 für die Metalle ergeben sich aus den Abfuhrwiegungen der Anlage. Die Sortierleistung der einzelnen Metalle wie Messing und Kupfer ließ sich nicht bestimmen. Grund ist, dass die Metalle in der Überkornsortierung gemischt gelagert werden und später nachsortiert werden. Daher wurde sich dagegen entschieden, diese Fraktionen zu untersuchen. Weiter wurden nicht an jedem Tag diese Wertstoffe aussortiert, da dafür eine hohe Mitarbeiter\*innenzahl in der Sortierung vorhanden sein musste. Leider war dies sehr selten der Fall und schränkte Versuche in diesem Bereich sehr ein.

Die Planung der Versuche war frühzeitig beendet, jedoch mussten die Termine und Zeiten häufig verschoben oder reduziert werden, da Störungen, Wartungen oder Reparaturen an der Sortieranlage ein großer Störfaktor waren.

Herausfordernd war ebenfalls, dass die Sortierleistungen innerhalb der einzelnen Fraktionen häufig voneinander abweicht. Eine exakte Bestimmung der Sortierleistung erweist sich sehr schwierig. Dafür müssten die Versuche in einem noch größeren Maßstab durchgeführt werden um genauere Werte zu ermitteln. Zusätzlich müsste das Anlagenmaterial vor der Siebung und

Sortierung analysiert werden. Dies ist aufgrund der Größe, Menge und der unterschiedlichen Abfallzusammensetzung mit einem sehr hohen Aufwand verbunden, der den Umfang dieser Bachelorarbeit deutlich überschreitet.

### 4.3 Optimierungsmöglichkeiten zur Steigerung der Effizienz

Die Effizienz zu steigern bedeutet konkret, dass die Recyclingquote steigt oder der Durchsatz der Abfallmenge erhöht wird. Wie in Tabelle 30 zu sehen, hat die Sortieranlage eine Recyclingquote berechnet nach der GewAbfV von 18,33 % bis 21,09 %.

Um die Quote zu steigern, bedarf es einem Umbau oder einer Umstellung in der Sortierung des Mittel- und Überkorns. Eine Optimierung im Unterkorn ist aufgrund der kleinen Partikelgröße nicht wirtschaftlich zu erreichen.

Das Mittelkorn weist im Bereich der NIR-Sortierung eine hohe Bandbelegung auf, teilweise mehr als 50 %. Eine optimale Sortierung ergibt sich aus Erfahrungsberichten bei einer Bandbelegung zwischen 20 und maximal 25 %. Um diesen Wert zu erreichen, muss der Materialstrom halbiert werden oder die Sortiertechnik erheblich ausgebaut werden.

Das Mittelkorn sortiert derzeit ein EBS aus, welches der thermischen Verwertung zugeführt wird. Stattdessen ist eine Sortierung von PE und PP Folien zukunftsorientierter, zudem steigt dadurch die Recyclingquote. Die Nachfrage nach Kunststoffen für Pyrolyse verfahren nimmt stetig zu. Durch die Pyrolyse können erneuerbare Kraftstoffe in gasförmigem und flüssigem Zustand gewonnen werden. Da für die chemische Pyrolyse ein sehr reines Material gefordert wird, müsste die Sortierung für dieses Material mit mindestens einem NIR-Gerät mehr ausgestattet werden.

Die Sortierung im Überkorn hat für alle Wertstoffe eine sehr hohe Reinheit, da die Materialien händisch aussortiert werden, Fehlwürfe entstehen kaum. Um als Anlagenbetreiber flexibler zu werden, wäre eine Umstellung auf Sortiermaschinen möglich. Für diese ist die Korngröße entscheidend. Materialien größer als 250 mm sind schwierig mittels NIR-Technik zu sortieren. Es würde eine zweite Mittelkornsortierung aufgebaut werden müssen. Um genügend Material der Korngröße von 50 bis 250 mm zu produzieren, muss der Vorzerkleinerer umgebaut oder ausgetauscht werden.



#### 4.3.1 Herausforderungen und Realisierbarkeit der Optimierungsmöglichkeiten

Um die Mittelkornsortierung auszubauen und die Bandbelegung zu verringern, müssen mehr NIR-Geräte verbaut werden. Weniger Abfall auf der Anlage zu verarbeiten ist wirtschaftlich keine Option. Der Erweiterungsbau um zwei NIR-Geräte inkl. Förderbandtechnik und anderen Anbauten beläuft sich auf ca. 800.000 bis 1.000.000 €. Ob eine solche Investition sich auszahlt ist schwer vorhersehbar. Die Marktpreise für Wertstoffe schwanken seit der Corona-Pandemie und den Unruhen im Ukrainischen-Russischen Krieg stark. Ohne Betrachtung der Kosten ist ein Umbau technisch gut realisierbar. Die Sortierhalle verfügt über ausreichend Platz um die Sortierung auszubauen.

Der Umbau der Überkornsortierung in eine zweite Mittelkornsortierung wäre deutlich umfangreicher. Neben dem Umbau der Vorzerkleinerers, ca. 250.000€, muss das Rüttelsieb angepasst werden, um die Verteilung auf beide Mittelkornlinien gleichmäßig zu verteilen. Um den Abfall zu sortieren, müsse mindestens vier NIR-Geräte verbaut werden, um die gesetzlichen Vorgaben der GewAbfV über die Aussortierung einzuhalten. Der Rückbau der Überkornsortierung sowie der Neubau einer zweiten Mittelkornsortierung würden sich nach Schätzungen der Bestsort Hamburg GmbH & Co. KG auf ca. 2.000.000 € belaufen. Der Vorteil an einer maschinellen Sortierung besteht vor allem in der gleichbleibenden Leistung und der Laufzeit. Zudem kann eine Maschine mehrere Materialien gleichzeitig aussortieren und ist sehr flexibel. Die Flexibilität der NIR-Geräte bewirkt, sich dem Wertstoffmarkt anzupassen. Steigt der Preis eines Wertstoffes A und sinkt der des Stoffes B, so kann die Anlage so umprogrammiert werden, dass der Stoff A mehr und in einer höheren Qualität aussortiert wird.

## 5. Fazit

Die Bachelorarbeit untersuchte die Sortierleistung und Reinheiten von unterschiedlichen Fraktionen der Gewerbeabfallsortieranlage. Dabei konnten erfolgreich Werte ermittelt werden, die als realistisch anzunehmen sind. Da es in der Abfallzusammensetzung häufig zu Unterschieden kommt, gibt es bei einigen Materialien eine hohe Fluktuation in den Auswertungen.

Um dort genauere Werte zu ermitteln müssen mehr Versuche für die jeweiligen Fraktionen durchgeführt werden. Dabei müssen mehr Faktoren betrachtet werden, wie der Anteil der Zerkleinerung, die Abfallzusammensetzung vor der Sortierung und die Auslastung der Förderbänder.

Die in Kapitel 4.2 diskutierten Werte der Unterkorn-, Mittelkorn- und Überkornsortierung geben Aufschluss über mögliche Werte der Sortieranlage. Dabei wird eine Recyclingquote von ca. 21 % in einem der betrachteten Monate erreicht. Da die Sortieranlage alle Abfälle sortiert, liegt die Sortierquote bei 100%. Ziel ist die Beibehaltung und Steigerung der Recyclingquote auf lange Sicht. Eine Weiterentwicklung der Sortiereinheiten, insbesondere die Verwendung von NIR-Geräten sind sinnvolle Schritte um dies zu erreichen. Durch eine Optimierung der Bandbelegung und Anpassung der Korngröße im Überkorn können in Zukunft die Abfälle noch effizienter recycled werden.

In Zukunft kann eine andere Verwendung des EBS interessant werden. Es enthält bereits einen hohen Anteil an Polyolifinen. Durch Anpassung der NIR-Geräte kann der Anteil von Polyolifinen erhöht und der Anteil an Störstoffen reduziert werden. Durch Pyrolyse können so Kraftstoffe und anderen Energieträger gewonnen werden und den Kohlenstoffdioxidausstoß vermindern (Zeller et al.). Um die Klimaziele der EU zu erreichen kann dies ein wichtiger Schritt in der Abfallbranche sein.

## 6. Literaturverzeichnis

BMUV (2020): Kreislaufwirtschafts- und Abfallrecht in Deutschland. Online verfügbar unter <https://www.bmuv.de/themen/kreislaufwirtschaft/abfallrecht-national>, zuletzt aktualisiert am 02.07.2023, zuletzt geprüft am 26.09.2023.

BMUV (2022): Kreislaufwirtschaftsgesetz. Online verfügbar unter <https://www.bmuv.de/gesetz/kreislaufwirtschaftsgesetz>, zuletzt aktualisiert am 13.09.2022, zuletzt geprüft am 14.09.2023.

Bundesministerium für wirtschaftliche Zusammenarbeit und Entwicklung (2020): Vom Abfall zur Kreislaufwirtschaft. Online verfügbar unter <https://www.bmz.de/de/themen/abfallwirtschaft>, zuletzt geprüft am 13.09.2023.

Destatis (2022): Neue Rekordmenge an Haushaltsabfällen im Jahr 2021. Online verfügbar unter [https://www.destatis.de/DE/Presse/Pressemitteilungen/2022/12/PD22\\_546\\_321.html](https://www.destatis.de/DE/Presse/Pressemitteilungen/2022/12/PD22_546_321.html), zuletzt geprüft am 20.09.2023.

Destatis (2023a): Abfallaufkommen im Jahr 2021 um 0,6 % niedriger als im Vorjahr. Online verfügbar unter [https://www.destatis.de/DE/Presse/Pressemitteilungen/2023/06/PD23\\_213\\_321.html](https://www.destatis.de/DE/Presse/Pressemitteilungen/2023/06/PD23_213_321.html), zuletzt aktualisiert am 02.06.2023, zuletzt geprüft am 26.09.2023.

Destatis (2023b): Abfallwirtschaft. Online verfügbar unter [https://www.destatis.de/DE/Themen/Gesellschaft-Umwelt/Umwelt/Abfallwirtschaft/\\_inhalt.html](https://www.destatis.de/DE/Themen/Gesellschaft-Umwelt/Umwelt/Abfallwirtschaft/_inhalt.html), zuletzt aktualisiert am 02.06.2023, zuletzt geprüft am 26.09.2023.

Europäisches Parlament (18.04.2017): GewAbfV(3). Online verfügbar unter [https://www.gesetze-im-internet.de/gewabfv\\_2017/](https://www.gesetze-im-internet.de/gewabfv_2017/), zuletzt geprüft am 24.09.2023.

Hecht, Thomas (2019): Physikalische Grundlagen der IR-Spektroskopie. Wiesbaden: Springer Fachmedien Wiesbaden, zuletzt geprüft am 25.09.2023.

Kaza, Silpa (2018): What a waste 2.0. A global snapshot of solid waste management to 2050. Washington DC: World Bank Group (Urban development series). Online verfügbar unter <https://openknowledge.worldbank.org/entities/publication/d3f9d45e-115f-559b-b14f-28552410e90a>, zuletzt geprüft am 17.09.2023.

KrWG: Kreislaufwirtschaftsgesetz. Online verfügbar unter <https://www.gesetze-im-internet.de/krwg/BJNR021210012.html>, zuletzt geprüft am 17.09.2023.

Martens, Hans (2010): Recyclingtechnik. Fachbuch für Lehre und Praxis. Heidelberg: Spektrum Akademischer Verlag, zuletzt geprüft am 26.09.2023.

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

Michael Zeller et al:

Zeller\_ChemischesRecyclingKunststoffhaltigerAbfällePotenzialDerPyrolyse\_BAEK2021\_Proceedingsbeitrag. Unter Mitarbeit von Michael Zeller, Hans Leibold, Niklas Netsch, Frank Richter, Dieter Stapf. Online verfügbar unter Nicht verfügbar, zuletzt geprüft am 26.09.2023.

Tomra (Nicht verfügbar): Autosort. Online verfügbar unter <https://languagesites.tomra.com/de-de/sorting/recycling/products/autosort/>, zuletzt geprüft am 26.09.2023.

Umweltbundesamt (2020): Ohne Mülltrennung kein Recycling. Online verfügbar unter <https://www.umweltbundesamt.de/themen/ohne-muelltrennung-kein-recycling>, zuletzt geprüft am 23.09.2023.

Umweltbundesamt (2021): Klimaverträgliche Abfallwirtschaft. Online verfügbar unter <https://www.umweltbundesamt.de/daten/ressourcen-abfall/klimavertraegliche-abfallwirtschaft#abfallbehandlung-schutzt-heute-das-klima>, zuletzt geprüft am 27.09.2023

Umweltbundesamt (2022): Abfallaufkommen. Hg. v. Umweltbundesamt. Online verfügbar unter <https://www.umweltbundesamt.de/daten/ressourcen-abfall/abfallaufkommen#deutschlands-abfall>, zuletzt aktualisiert am 13.10.2022, zuletzt geprüft am 14.09.2023.

## V. Eidesstattliche Erklärung

Ich, Tim Milewski, versichere hiermit, dass ich die vorliegende Bachelorarbeit ohne Fremde Hilfe selbstständig verfasst und nur die angegebenen Quellen und Hilfsmittel verwendet habe. Wortwörtlich oder dem Sinn nach aus anderen Werken entnommene Stellen sind unter Angabe der Quellen kenntlich gemacht.

Datum:

Unterschrift: \_\_\_\_\_

Tim Milewski