



Lehrstuhl für Abfallverwertungstechnik und Abfallwirtschaft

Masterarbeit

The background features a large, faint watermark of the University of Leoben seal. The seal is circular and contains a shield with various symbols, including a hammer and pickaxe, a stork, and a lion. The text 'UNIVERSITAS LEOBENSIS' is visible around the perimeter of the seal.

Sensorbasierte Steuerung eines
Wirbelstromscheiders mittels
elektromagnetischer Induktion

Alexander Weber, BSc

Februar 2023



EIDESSTÄTLICHE ERKLÄRUNG

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

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

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

Datum 09.02.2023

Unterschrift Verfasser/in
Alexander Weber

DANKSAGUNG

Mein Dank gilt an erster Stelle meinem Betreuer Herrn Prof. Dipl.-Min. Dr.rer.nat. Daniel Vollprecht, für die Freiheiten bei der Gestaltung der vorliegenden Arbeit und stetiger Unterstützung auf wissenschaftlicher Ebene. Er war mir bei Fragen sofort mit seiner Expertise zur Stelle und auch die Diskussion zur Thematik haben sehr beim Fertigstellen meiner Arbeit geholfen.

Ein großer Dank gilt Frau Dipl. Ing. Sabine Schlögl, welche mir zu jeder Zeit mit ihrem Fachwissen mit Rat und Tat zu Seite gestanden ist. Dank ihres großen Einsatzes und ihr Fachwissen wurde jede auftretende Problemstellung gelöst.

Ein weiterer Dank gilt der Firma EVK DI Kerschhaggl GmbH, da sie zum einem die benötigten Sensoren zur Verfügung gestellt haben und zum anderen, ihr Technikum für Versuche zur Verfügung gestellt haben.

Der Firma STADLER Anlagen möchte ich für das zur Verfügung stellen ihres Technikums in Slowenien, sowie den fachlichen Rat bei der Durchführung der Versuche danken. Insbesondere möchte ich mich bei Frau MSc. Annika Ludes für ihre tatkräftige Unterstützung bei der Planung und Durchführung der Versuchsreihen bedanken.

Desweiteren möchte ich mich bei der Österreichischen Forschungsförderungsgesellschaft (FFG) bedanken, die das Forschungsprojekt EsKorte (Entwicklung und Erprobung eines sensorgestützten Stoffstromüberwachungssystems) im Rahmen des Programms „Produktion der Zukunft“ unter Projektnummer 977341 fördert.

Kurzfassung

Sensorbasierte Steuerung eines Wirbelstromscheiders mittels elektromagnetischer Induktion

Durch das Kreislaufwirtschaftspaket der EU soll bis 2030 bei Metallverpackungen eine Recyclingquote von 60 % erreicht werden. Zur Erreichung dieser Ziele für Österreich ist die Einführung der gemeinsamen Sammlung aller Leichtverpackungen inklusive Metallverpackungen ab 2025 relevant. Dadurch ändert sich die Inputzusammensetzung in Leichtverpackungs- (LVP) Anlagen, was Auswirkungen auf die Sortiereffizienz haben kann. Zur Abscheidung von Nichteisen- (NE) Metallen ist der Wirbelstromscheider in Verwendung, bei welchem es verschiedene verstellbare Parameter gibt, die in der Praxis für LVP-Material jedoch noch nicht systematisch untersucht wurden.

Ziel dieser Arbeit ist es, herauszufinden, ob es möglich ist, mithilfe von Metallsensoren die optimalen Einstellungen des Wirbelstromscheiders zu finden und diesen auf Basis der Sensordaten zu steuern. Dafür wurden zunächst Vorversuche zum Metallsensor und zum Wirbelstromscheider durchgeführt, um relevante Parameter zu ermitteln. Bei den Hauptversuchen im Technikumsmaßstab wurden die Outputströme eines Wirbelstromscheiders mithilfe eines Metallsensors überwacht. Besonderes Augenmerk wurde auf die Parameter Förderbandgeschwindigkeit vor dem Wirbelstromscheider und Polradgeschwindigkeit des Wirbelstromscheiders gelegt.

Es hat sich gezeigt, dass bei einer Bandgeschwindigkeit von bis zu 2,0 m/s und bei einer Polradgeschwindigkeit von mindestens 1.600 rpm das beste Verhältnis von Ausbringen zu Reinheit erzielt wird. Der Vergleich der Sensordaten mit der Handsortierung hat gezeigt, dass beide Methoden zum selben Ergebnis kommen. Somit kann festgehalten werden, dass es möglich ist, mithilfe von Sensordaten die besten Einstellungen zu finden und basierend darauf das Aggregat zu steuern.

Abstract

Sensor-based control of an eddy current separator using electromagnetic induction

The EU's circular economy package aims to achieve a recycling rate of 60% for metal packaging by 2030. For Austria to achieve these targets, the introduction of joint collection of all lightweight packaging, including metal packaging, from 2025 is relevant. This will change the input composition in lightweight packaging plants, which may have an impact on sorting efficiency. For the separation of non-ferrous metals, the eddy current separator is in use, with which there are various adjustable parameters, that have not yet been systematically investigated in practice for lightweight packaging material.

The aim of this work is now to find out whether it is possible to find the optimum settings of the eddy current separator with the aid of metal sensors and to control it based on the sensor data. To this end, preliminary tests were first carried out on the metal sensor and the eddy current separator to determine relevant parameters. In the main pilot-scale tests, the output currents of an eddy current sensor were monitored using a metal sensor. Particular attention was paid to the parameters of conveyor belt speed before the eddy current separator and pole wheel speed of the eddy current separator.

It has been shown that the best yield to purity ratio is achieved at a belt speed of up to 2.0 m/s and at a high pole wheel speed of at least 1600 rpm. Comparison of sensor data with manual sorting has shown that both methods give the same result. Thus, it can be concluded that it is possible to find the best settings with the help of sensor data and to control the aggregate based on this.

Inhaltsverzeichnis

	Seite
1 EINLEITUNG	3
1.1 Problemstellung	4
1.2 Zielsetzung	4
2 THEORIETEIL	5
2.1 Sammlung.....	5
2.1.1 Bisheriges Sammelsystem in Österreich.....	5
2.1.2 Änderungen im Sammelsystem	7
2.2 Zusammensetzung gesammelter Abfälle	9
2.2.1 Verpackungsarten.....	10
2.3 Recycling	11
2.4 Sortierung	13
2.4.1 Sortierschritte vor der Metallabscheidung	15
2.4.2 Wirbelstromscheider	19
2.5 Stoffstrommonitoring.....	20
2.5.1 Metalldetektion.....	22
2.5.2 Monitoring und Steuerung von Wirbelstromscheidern.....	24
3 MATERIAL UND METHODEN	27
3.1 Vorversuche Metallsensor	27
3.1.1 Probenmaterial	27
3.1.2 Versuchsaufbau.....	29
3.1.3 Durchführung.....	30
3.1.4 Versuchsauswertung	31
3.2 Vorversuche Wirbelstromscheider	33
3.2.1 Probenmaterial	33
3.2.2 Versuchsaufbau.....	34
3.2.3 Durchführung.....	38
3.2.4 Versuchsauswertung	39
3.3 Hauptversuche.....	39
3.3.1 Probenmaterial	40
3.3.2 Versuchsaufbau.....	42
3.3.3 Durchführung.....	45
3.3.4 Versuchsauswertung	50

4	ERGEBNISSE UND DISKUSSION	55
4.1	Vorversuche Metallsensor	55
4.2	Vorversuche Wirbelstromscheider	60
4.3	Hauptversuche.....	63
4.3.1	Analyse Reliabilität der Sensoren	64
4.3.2	Pixelgewicht.....	69
4.3.3	Potential des Stoffstrommonitorings.....	71
4.3.4	Pouches.....	77
4.3.5	Stoffstrommonitoring.....	80
4.3.6	Validierung des Metallsensors für Stoffstrommonitoring.....	86
5	ZUSAMMENFASSUNG UND AUSBLICK	90
6	VERZEICHNISSE	92
6.1	Literatur.....	92
6.2	Abkürzungsverzeichnis	96
6.3	Tabellen.....	97
6.4	Abbildungen.....	98
	ANHANG	I

1 Einleitung

Im Jahr 2019 wurden 30.689 t an Altmetallverpackungen (enthalten in Leichtverpackungs (LVP)-Abfall) und 165.445 t an LVP-Abfall aus Haushalten gesammelt. LVP Abfall ist der Überbegriff für Verpackungen aus Kunststoff, Papier, Karton, Pappe, Holz, Metall, Glas oder Textilien, welche mit der gelben Tonne oder dem gelben Sack getrennt gesammelt werden (BMK 2022b).

Die Europäische Union hat 2018 das Kreislaufwirtschaftspaket veranlasst. Das Hauptziel dieses Paketes ist die Abfallvermeidung und dieser soll nur recycelt werden, wenn eine Abfallvermeidung nicht möglich ist. Das geforderte Recycling soll mithilfe von festgelegten Zielen geschehen, welche durch Recyclingquoten verwirklicht werden und in der österreichischen Gesetzgebung durch das Abfallwirtschaftsgesetz und die Verpackungsverordnung verankert sind (Europäische Kommission 2018, BMK 2021a).

Bisher hat es eine gemeinsame Recyclingquote für Eisenmetalle und Aluminium gegeben, diese müssen künftig einzeln berechnet werden. Hier wird laut Expertenmeinung die 60 % Quote für Aluminium eine Herausforderung werden. Zur Erreichung der Quotenziele sollen sogenannte Smarte Container, welche Füllstandsensoren und Sensoren zur Charakterisierung des Abfalles besitzen, beitragen. Außerdem werden Verpackungskennzeichnungen wie zum Beispiel Fluoreszenzmarker, wichtig sein, um ein Tracking über den gesamten Produktlebenszyklus der Verpackungen zu ermöglichen. Ein wichtiger Schritt, um die Recyclingziele zu erreichen, ist die Einführung der gemeinsamen Sammlung für LVP-Kunststoffe ab 2023, inklusive Metallverpackungen ab 2025. Auch das zukünftige Pfandsystem für PET-Flaschen und Dosen in Österreich wird zum Erreichen der Ziele wichtig sein. Außerdem wird von Experten die Erhöhung von Mindestmehrwegquoten und das Ende der thermischen Verwertung von unbehandelten Abfällen gefordert. Eine weitere Möglichkeit zur Steigerung der Recyclingquote wäre die finanzielle Förderung beim vermehrten Einsatz von Sekundärrohstoffen für die Herstellung von neuen Verpackungen (ÖWAV 2020).

Österreich hatte 2017 eine Recyclingquote bei Getränkedosen von 79 %, welche noch über der durchschnittlichen Recyclingquote aus Europa mit 72,8 % lag, jedoch unter den Spitzenreitern wie Deutschland, Norwegen oder Finnland, welche sogar eine Recyclingquote von bis zu 98 % erreichten (Recyclingmagazin 2019).

In LVP-Aufbereitungsanlagen werden die Wertstoffe mittels Sortierung gewonnen. Hier ist es wichtig, dass sich in den Produkten so wenig Störstoffe wie möglich befinden. Außerdem ist es essenziell, dass ein Großteil der Wertstoffe als solcher erkannt und ausgeschleust werden. Falls dies nicht der Fall ist, gehen die Wertstoffe im Reststrom verloren und stellen einen Wertverlust dar (Kranert 2017).

Eine Optimierung von LVP-Anlagen ist durch die Recyclingquoten indirekt rechtlich vorgeschrieben, es ist jedoch auch aus ökologischer Sicht sinnvoll. So benötigt die Herstellung

von Primäraluminium 167,1 MJ/kg, Sekundäraluminium im Vergleich dazu nur 5,2 – 10,6 MJ/kg. Damit ergibt sich durch das Recycling eine Energieeinsparung von bis zu 95 %. Zudem werden bei recyceltem Aluminium pro t produziertem Material 10 t CO₂ weniger ausgestoßen, was einer Einsparung von 85 % entspricht. Bei der Produktion von primärem Aluminium fallen mit 3,7 t pro t erzeugten Aluminium fast um eine Zehnerpotenz mehr feste Rückstände als bei der Sekundärproduktion an. Dadurch zeigt sich, dass eine Optimierung von LVP-Anlagen auch aus ökologischer Sicht sinnvoll ist (Kranert 2017, Antrekowitsch 2021).

1.1 Problemstellung

Die Inputzusammensetzung in LVP-Abfall Aufbereitungsanlagen ändert sich ab 2025 mit dem neuen Sammelsystem. Dadurch sind mehr Metalle im Stoffstrom zu erwarten. Zur Abscheidung der NE-Metalle ist der Wirbelstromscheider das zentrale Aggregat. Vor allem in Bezug auf einen Leichtverpackungsstrom wurde dieser bisher wissenschaftlich noch nicht genau untersucht. Für Wirbelstromscheider gibt es einige Einstellmöglichkeiten der verschiedenen Parameter. In der Praxis gibt es für diese Parameter Standardwerte, welche von den meisten Anlagenbetreibern einmalig statisch eingestellt werden. Somit ist auch keine Anpassung an etwaige Änderungen des Stoffstroms üblich, was dazu führt, dass nicht alle NE-Metalle ausgeschieden werden. Dies wirkt sich negativ auf die Recyclingquoten aus.

Gegenwärtig sind einige Bestandteile des LVP-Stoffstroms eine Herausforderung für die Anlagenbetreiber. Ein konkretes Beispiel hierfür sind mit Aluminium (Alu) beschichtete Standbodenbeutel („Pouches“), welche im Metallstrom ausgeschleust werden. In diesem Strom sind sie jedoch unerwünscht und reduzieren die Qualität der Outputströme. Pouches bestehen aus einer Kunststoffolie, welche mit einem Alufilm beschichtet sind. Dieser Kunststoffanteil ist im Alurecycling nicht erwünscht.

1.2 Zielsetzung

In dieser Arbeit soll untersucht werden, ob es mit Hilfe von Metallsensoren möglich ist, die optimale Einstellung der verschiedenen Parameter für einen Wirbelstromscheider zu finden. Es soll weiters überprüft werden, ob sich die Sensorik eignet, um den Wirbelstromscheider sensorbasiert zu steuern. Damit soll das Wertstoffausbringen und die Reinheit der erzeugten NE-Fraktion maximiert werden. Verbundverpackungen, die nur geringe Nichteisenmetallgehalte enthalten, wie z.B. Pouches sollen nicht in die NE-Fraktion gelangen, da sie von den Abnehmern als Störstoffe definiert werden.

2 Theorieteil

Alle Metalle und Legierungen mit einem Eisengehalt unter 50 % werden als NE-Metalle bezeichnet. Aluminium ist aufgrund seines geringen Gewichts, seiner hohen Festigkeit und der guten Wärmeleitfähigkeit ein viel genutzter Werkstoff. Deshalb wird in der Verpackungsindustrie das NE-Metall Aluminium sehr oft verwendet. In Nachfolgender Abbildung 1 ist der Weg, den eine Metallverpackung innerhalb ihres Lebenszyklus zurücklegt, zu erkennen (Antrekowitsch 2021, Kranert 2017).

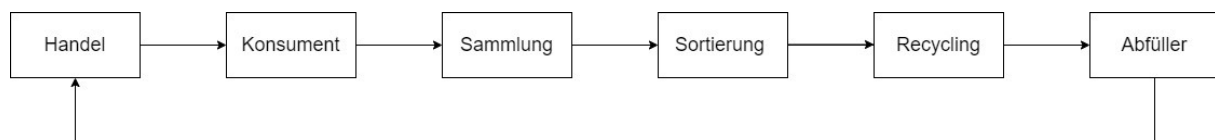


Abbildung 1: Kreislauf von NE-Metallen (Kranert 2017).

Für die Sammlung von Metallverpackungen gibt es zurzeit in Österreich noch viele verschiedene Varianten. Das Material wird dann mittels Sammelfahrzeug zu einer LVP-Anlage gebracht, bei der eine Sortierung in unterschiedliche Fraktionen erfolgt. Die NE-Metalle werden mit einem Wirbelstromscheider abgeschieden. Da die NE-Metalle einen im Vergleich zum Kunststoff höheren Wert besitzen, ist es wichtig, dass möglichst alle Dosen mit dem Wirbelstromscheider abgeschieden werden. Die Produktfraktion wird in Folge zu einem Recycling-Unternehmen transportiert, dort weiter aufbereitet und anschließend pyrometallurgisch recycelt. In weiterer Folge kann dieses Material wieder zur Herstellung neuer Verpackungen genutzt werden, welche vom Abfüller erworben und erneut befüllt werden können. Über den Handel landet die Metallverpackung schließlich wieder beim Konsumenten. Die einzelnen Schritte werden in den folgenden Kapiteln genauer erklärt (Bilitewski und Härdtle 2013).

2.1 Sammlung

2.1.1 Bisheriges Sammelsystem in Österreich

Aktuell gibt es in Österreich kein einheitliches System zur Sammlung von Leichtverpackungen. Derzeit existieren in Österreich 13 verschiedene Sammelsysteme, welche in Tabelle 1 aufgelistet sind (VOEB 2021).

Dabei gibt es drei verschiedenen Arten wie die Abfälle von den Haushalten zu den Sortieranlagen kommen (Pomberger 2020):

- **Holsystem:** Die Abfälle werden direkt vom Grundstück abgeholt und das Sammelfahrzeug muss jeden Haushalt einzeln anfahren. Vorteile sind der hohe Benutzerkomfort und die höhere Erfassungsquote für Wertstoffe. Ein Nachteil ist der große Sammelaufwand.
- **Bringsystem:** Es beinhaltet haushaltsnahe zentrale Sammelstellen, zu denen die Abfälle gebracht werden müssen. Das Sammelfahrzeug fährt die zentralen Sammelstellen an,

wodurch ein geringerer Sammelaufwand entsteht. Ein Nachteil sind die geringere Erfassungsquote und der höhere Fehlwurfanteil.

- **Abfallsammelzentrum (ASZ):** In einem ASZ werden voluminöse und gefährliche Abfälle gesammelt. Der Abfall muss in den meisten Fällen vom Nutzer hingebbracht werden.

Tabelle 1: Sammelsysteme in Österreich nach Art der Sammlung (VOEB 2021).

	Sammelart		
	zu Sammelstelle bringen	Haushaltsabholung	zu ASZ bringen
Leichtverpackungen aus Kunststoff	x	x	x
Plastikflaschen und Getränkekartons	x	x	
Metallverpackungen	x	x	x
Leichtverpackungen aus Kunststoff und Metall	x	x	
Plastikflaschen, Getränkekartons und Metallverpackungen	x	x	

Am Beispiel von Niederösterreich werden die Probleme des aktuellen Sammelsystems sichtbar, da Verpackungskunststoffe in unterschiedlichen Systemen gesammelt werden, wodurch keine konstante Inputzusammensetzung in den LVP-Sortieranlagen herrscht. Folgende Sammelsysteme mit den jeweiligen Identifikationsnummern existieren in Niederösterreich (Land Niederösterreich 2018):

- Leichtfraktion (910): Getrennte Sammlung von LVP im Bring- und Holsystem
- Kunststoffflaschen (915): Getrennte Sammlung von Kunststoffflaschen und Getränkeverbundverpackungen (GVK) im Bring- und Holsystem
- Kunststoffflaschen und Metallverpackungen (935): Gemeinsame Sammlung von Kunststoffflaschen und GVK gemeinsam mit Metallverpackungen im Holsystem
- Leichtfraktion und Metallverpackungen (930): Gemeinsame Sammlung von Leicht- und Metallverpackungen im Holsystem
- Wertstofftonne: Gemeinsame Sammlung aller Kunststoffe und anderer trockener Abfälle in der Wertstofftonne im Holsystem

In nachfolgender Abbildung 2 sind die unterschiedlichen Sammelsysteme den jeweiligen Bezirken in Niederösterreich zugeordnet. Dabei wird ausgelost, welche Sammelunternehmen für welche Regionen zuständig sind. Von 2023 bis 2027 wird LVP-Abfall in den meisten Bezirken in Niederösterreich von der Altstoff Recycling Austria AG (17 Bezirke) gesammelt werden. Die anderen Unternehmen sind die Interseroh Austria AG (3 Bezirke), die Reclay Systems GmbH (2 Bezirke) und die European Recycling Platform Austria GmbH (1 Bezirk) (BMK 2022a).



Abbildung 2: LVP-Sammelsysteme in Niederösterreich (Land Niederösterreich 2018).

2.1.2 Änderungen im Sammelsystem

Zur Quantifizierung der Recycling- und Sammelleistung gibt es eigene Kennzahlen (Vollprecht 2021). In Formel (1) ist die Berechnung der Sammelquote dargestellt.

$$\text{Sammelquote} = \frac{\text{Masse der getrennt gesammelten Abfälle}}{\text{Masse der anfallenden Abfälle}} \quad (1)$$

In Formel (2) ist zu erkennen, wie die Recyclingquote berechnet wird.

$$\text{Recyclingquote} = \frac{\text{Masse der rezyklierten Abfälle}}{\text{Masse der anfallenden Abfälle}} \quad (2)$$

Die relevanten Quoten sind entweder dem Abfallwirtschaftsgesetz, der Verpackungsverordnung oder EU-Richtlinien zu entnehmen. Diese gesetzlichen Rahmenbedingungen und verbindlichen Quoten sind ein wichtiger Treiber der Kreislaufwirtschaft. Die in den kommenden Jahren zu erfüllenden Quoten werden die Zusammensetzung von LVP-Material verändern. Das bedeutet, es wird sich nicht nur die Metallzusammensetzung des LVP-Abfalls ändern, sondern mit dem einher geht auch eine Veränderung des Kunststoffanteils im LVP-Abfall.

Sammelquoten und Pfandsystem

Bis 2025 sollen 60 % und bis 2030 85 % der lizenzierten Mengen von Kunststoffverpackungen gesammelt werden. Im Vergleich dazu sollen bis 2025 65 % und bis 2030 75 % der lizenzierten Aluminium- und Eisenmetallverpackungen gesammelt werden (BMK 2022b).

Die EU gibt vor, bis zum Jahr 2025 77 % der Kunststoffgetränkeflaschen getrennt zu sammeln und bis zum Jahr 2029 sogar 90 %. Aktuell beträgt die Quote in Österreich 70 %. Laut

Schätzung von Experten ist dies mit der Umstellung zu einem Pfandsystem möglich. (Haubenberger B. 2021, Europäisches Parlament 2019).

Unter Pfand versteht man einem Geldbetrag, den der Kunde bei einem Geschäft für eine Verpackung hinterlässt und diesen Geldbetrag wiederbekommt, sobald er die Verpackung retourniert. Ab dem Jahr 2025 gilt für Plastikflaschen und Getränkedosen in Österreich ein Einwegpfand. Glasflaschen und GVK sind davon jedoch nicht betroffen (ARA 2022).

Recyclingquoten

Die Recyclingquote für Kunststoffverpackungen soll laut EU-Vorgabe bis zum Jahr 2025 bei 50 % und bis zum Jahr 2030 bei 55 % liegen. Im Jahr 2021 lag die Quote für Kunststoffverpackungen in Österreich bei 25 % (Haubenberger B. 2021, BMK 2022b).

Die Recyclingquote für Aluminium soll bis zum Jahr 2025 bei 50 % und bis zum Jahr 2030 bei 60 % liegen. Zum Vergleich soll für Eisenmetalle bis zum Jahr 2025 die Recyclingquote bei 70 % und bis zum Jahr 2030 bei 80 % liegen (BMK 2022b).

Mehrwegquote

Bis 2025 sollen österreichweit 25 % der insgesamt in Verkehr gesetzten Getränke in Mehrwegflaschen verkauft werden und bis 2030 soll diese Zahl auf 30 % erhöht werden. Für Verkaufsstellen mit mehr als 400 m² Fläche sollen für definierte Gebinde (z.B.: Bier, Milch und Wasser) die Mehrwegquote bis 2024 auf 35 % und bis Jahresende 2025 auf 90 % erhöht werden (BMK 2021a).

Einheitliches Sammelsystem

Mit der neuen Novelle der Verpackungsverordnung vom 29.12.2021 soll es in Österreich ab 2023 ein einheitliches System zur Sammlung von LVP-Abfällen geben. Ab dem 01.01.2023 werden alle Kunststoffverpackungen einheitlich in einer Tonne gesammelt. Ab dem 01.01.2025 werden auch die Metallverpackungen gemeinsam mit Kunststoffverpackungen einheitlich gesammelt (ARA 2022).

Weitere Maßnahmen

Tabelle 2 zeigt weitere Maßnahmen der neuen Verpackungsverordnung. Ein Beispiel hieraus ist die eindeutige Kennzeichnung von Einweg- und Mehrweggetränkeverpackungen. Dies könnte zu einem Rückgang der Einwegverpackungen und somit auch von Aludosen führen (BMK 2022b).

In Tabelle 3 ist zu erkennen, dass wiederverwendbare Verpackungen ab 2022 meldepflichtig sind. Es ist davon auszugehen, dass der Anteil an diesen Produkten dadurch steigt und weniger Produkte nach dem einmaligen Gebrauch recycelt werden müssen (BMK 2022b).

Tabelle 2: Beispielhafte Maßnahmen aus der Verpackungsverordnung BGBl. Nr. 184/2014 mit jeweils zugehörigem Stichdatum (ARA 2022, Recycle Me 2022).

Maßnahme	gültig ab
deutliche Kennzeichnung von Einweg- und Mehrweggetränkeverpackungen in Verkaufsstellen	01.01.2022
Verbot- bzw. Kennzeichnungspflicht von Einwegkunststoffprodukten	n.n.
Verbot von oxoabbaubaren Kunststoffprodukten	n.n.
Fix verbundene Verschlüsse und Deckel bei Getränkebehälter	03.07.2024
Mindestrezyklatgehalt von 25 % bei PET Getränkeflaschen	2025
Mindestrezyklatgehalt von 30 % bei Einweg Kunststoff Getränkeflaschen	2025
Teilnahmepflicht an einem Sammel- und Verwertungssystem für alle Einwegkunststoffe	01.01.2023
Teilnahmepflicht an einem Sammel- und Verwertungssystem für gewerbliche Verpackungen (getrennt nach Sammelkriterien zu sammeln)	01.01.2023
Verpflichtung für Primärverpflichtete, nur mehr wiederverwendbare oder recyclingfähige Kunststoffverpackungen in Verkehr zu setzen	01.01.2013
Neuerungen bei Bevollmächtigungen für Versandhändler für in Österreich in Verkehr gesetzte Verpackungen und Einwegkunststoffprodukte	01.01.2023

Tabelle 3: Neu meldepflichtige Produkte nach der Verpackungsverordnung BGBl. Nr. 184/2014 mit zugehörigem Stichdatum (interseroh 2022, BMK 2022b).

Meldepflichtiges Produkt	gültig ab
wiederverwendbare Verpackungen	2022
Verkaufsverpackungen	2022
Einwegkunststoffprodukte	2022
Masse des eingesetzten Rezyklatanteil PET Getränkeflaschen	2023
Masse des eingesetzten Rezyklatanteil in sämtlichen Einwegkunststoffgetränkeflaschen	2028

Durch die neuen Vorschriften wird sich die Zusammensetzung vom Inputmaterial ändern und gemeinsam mit dem neuem Sammelsystem wird dies eine Herausforderung für Sortieranlagen, sich daran anzupassen. (Maschine kann sich nicht anpassen)

2.2 Zusammensetzung gesammelter Abfälle

In Österreich sind 2018 1,41 Mio. t Verpackungsabfälle angefallen. In Tabelle 4 sieht man das Verpackungsabfallaufkommen in den Jahren 2016, 2017 und 2018. Durch die gemeinsame Sammlung ist davon auszugehen, dass die Metallmengen im Verpackungsabfallaufkommen steigen werden. Die Menge an PET Flaschen in LVP-Anlagen wird durch Einführung des Pfandes stark sinken (BMK 2021b).

Tabelle 4: Verpackungsabfallaufkommen Österreich (BMK 2021b).

Packstoffart	Abfallaufkommen [t]		
	2016	2017	2018
Papier, Pappe und Kartonagen	564 333	575 620	590 000
Glas	275 365	278 337	291 338
Metall	61 969	63 188	63 758
Kunststoff	297 837	302 306	302 000
Holz	96 888	112 960	109 525
Sonstige	44 319	44 594	57 000
Gesamt	1 340 711	1 377 005	1 413 621

In Tabelle 5 ist die Menge an gesammelten Altstoffen in Österreich für 2019 nach gesammelten Fraktionen aufgelistet. Dabei ist zu erkennen, dass die Leichtfraktion Verpackungen einen geringen Anteil ausmachen. Der Unterschied zu Tabelle 4 ist jener, dass es sich in Tabelle 5 um Material aus der Haushaltssammlung handelt und in Tabelle 4 um alle Arten von Verpackungen.

Tabelle 5: Altstoff aus der Haushaltssammlung nach Fraktionen (BMK 2021b).

Fraktion	Masse [t]
Altpapier, -pappe und -kartonagen, Verpackungen, Drucksorten	648 190
Altglas - Verpackungen	248 053
Altmetall - Verpackungen	30 589
Altmetall - Schrott	103 990
Alttextilien	40 497
Leichtfraktion - Verpackungen	165 445
Altholz - Verpackungen und sperriges Holz	284 111
Sonstige Altstoffe	31 106
Altstoffe Gesamt	1 551 981

2.2.1 Verpackungsarten

Laut BMK (2022b) gibt es folgende verschiedene Verpackungsarten: Transportverpackungen (z.B.: Kisten), Umverpackungen (z.B.: Folie um Wasserflaschen), Verkaufsverpackungen (z.B.: Dose) und Serviceverpackungen (z.B.: Tragtaschen). Die für diese Arbeit relevanteste Verpackungsart ist die Verkaufsverpackung, welche alle Verpackungen sind, die an Letztverbraucher abgegeben werden und Konsumgüter unmittelbar umschließen.

Im Folgenden werden die üblichsten Packmittel mit Metallanteil (vor allem für Getränke) genauer untersucht.

Dosen

Dosen dienen vor allem als Packmittel für kohlesäurehaltige Flüssigkeiten und können einem Druck von bis zu 6 bar standhalten. Sie sind Einwegprodukte, können aber sehr gut recycelt werden. Die Vorteile im Vergleich zu anderen Packmittel sind die Korrosionsbeständigkeit, die Formbeständigkeit, die gute Festigkeit, die leichte Verformbarkeit des Materials und das

geringe Gewicht. Außerdem ist sie licht- und sauerstoffundurchlässig. Ein Nachteil ist, dass der Inhalt pasteurisiert werden muss und sich dadurch der Geschmack verändern kann (Gedikali 2013).

Getränkeverbundkarton

GVK bestehen aus Karton (bis zu 75 %), Kunststoff und meist Aluminium. GVK sind zwar Einwegprodukte, können aber zu einem großen Teil recycelt werden. Ein großer Vorteil ist die Lichtundurchlässigkeit und im Vergleich zu Dosen das geringere Gewicht. Ein Nachteil ist, dass sie für kohlesäurehaltige Inhalte ungeeignet sind (Gedikali 2013).

Pouch

Pouches sind eine besondere Art von Standbodenbeuteln. Sie bestehen meistens aus dem Verbund von Kunststoff- und Metallfolien, manchmal ist auch eine Papierschicht enthalten. Beispiele für Pouches sind Capri Sonne- oder Whiskas-Verpackungen (siehe Abbildung 20). Hier ist das Ziel eine Kombination der Eigenschaften der Materialien, um einen Anstieg der Qualität und der Leistung des Packmittels zu erhalten. Die vorteilhaften Eigenschaften sind Temperaturbeständigkeit, Barriereigenschaften, mechanische Festigkeit, Lichtschutz und optische Attraktivität bei möglichst wenig Materialeinsatz (Onusseit 2017, Lamberti und Escher 2007).

Ein Problem bei den Pouches ist, dass sie zu einem großen Teil aus Kunststoff bestehen und dieser bei Aluminiumrecycling unerwünscht ist. Pouches haben ein großes Oberflächen-zu Volumen-Verhältnis. Beim Aluminiumrecycling ist dieses Verhältnis wichtig, da beim Einschmelzen es bei einem großen Verhältnis zu Abbrandverlusten durch Oxidation kommt. Durch die große Oberfläche der Pouches ist das Ausbringen folglich niedrig (Antrekowitsch 2021).

Die Reinheit der NE-Fraktion des Wirbelstromscheiders muss mindestens 90 % betragen. In der Praxis gilt: Umso reiner die Fraktion, umso mehr ist diese wert. Durch Verunreinigungen wie Pouches und GVK wird die Reinheit aus Sicht der Recycling-Unternehmen stark beeinträchtigt, wobei sich vor allem Pouches in modernen Anlagen in der NE-Fraktion wiederfinden. Die Reinheit wird vom Recyclingunternehmen überprüft. Dies geschieht entweder durch Sichtkontrolle, durch Referenzprobenahme mit einem Kübel oder durch Probeschmelzungen, bei welcher es je nach Ausbringen einen angepassten Preis gibt. Für das Recyclingunternehmen ist außerdem der Feuchtigkeitsgehalt der Probe wichtig, wofür es unterschiedliche Klassifizierungen gibt (Mayer 2023).

2.3 Recycling

Durch dieses Kapitel wird erläutert, welche Anforderungen an die LVP-Anlagen bestehen. Im LVP-Bereich sind die Recyclingprozesse von Kunststoffen und NE-Metallen wichtig. Für das Kunststoffrecycling ist es wichtig, dass die Wirbelstromscheider die NE-Metalle herausortieren, da diese in den Kunststoffprodukten unerwünscht sind. Ein Beispiel ist, dass beim PET-Recycling nur ein Störstoffanteil von 2 % im Produkt sein darf (BMK 2019). Da Metalle einen höheren Schmelzpunkt als die üblich zu recycelnden Kunststoffen haben,

schmelzen Metallobjekte im Extruder nicht. Zum einen können Metallobjekte mechanischen Schaden an allen Bauteilen des Extruders hervorrufen, zum anderen könnte bei zu großen Metallobjekten die Düse des Spritzgießers verstopft werden. Im Folgenden wird nur das Metallrecycling und insbesondere jenes von Aluminium genauer betrachtet, da die Relevanz für diese Arbeit am größten ist (BMK 2019, Bilitewski und Härdtle 2013, Feuchter 2020).

Im Folgenden wird ein Recyclingprozess von Aluminium-Leichtverpackungen anhand einer deutschen Anlage erklärt. Der Input beim Aluminiumrecyclingprozess besteht aus Aluminiumverpackungen und Aluminiumfolie, sowie zusätzliche Bestandteile wie Verschlüsse und Etiketten. Der Störstoffanteil darf 10 % nicht übersteigen (UBA 2018).

Bei dem Recycling von Aluminium gibt es zwei verschiedene Möglichkeiten und beide sind in Abbildung 3 dargestellt, wobei die Abgrenzung der verschiedenen Prozesse nach der Vorzerkleinerung stattfindet. Bei der ersten Verwertungsvariante wird das Material zuerst mit einem Magnetabscheidung und optional mit einem Windsichter gereinigt. Dann wird bei 500 °C eine Pyrolyse vollzogen, bei welcher organische Stoffe wie Etiketten, Farbe oder Kleber in Pyrolysegas und Koks umgewandelt werden. In einer Nachreinigung werden andere NE-Metalle entfernt und es entsteht Aluminiumkonzentrat. Dieses Konzentrat wird in einer Schmelze umgeschmolzen und kann dann als Aluminiumrezyklat weiterverarbeitet werden (UBA 2022).

Der zweite mögliche Prozess beginnt mit einem mechanischen Aufschluss. Nach diesem Aufschluss wird das Eisen mit einem Magnetabscheider abgeschieden und nach der NE-Metall Sortierung entstehen drei Ströme. Der erste und wertvollste ist das Aluminiumkonzentrat und kann direkt der Schmelze zugeführt werden. Der nächste Strom ist der Überschuss und kann als Ersatzbrennstoff an ein Zementwerk abgegeben werden. Der dritte Strom ist das sogenannte Mittelgut, welcher einer Pyrolyseanlage zugeführt werden kann (UBA 2022).

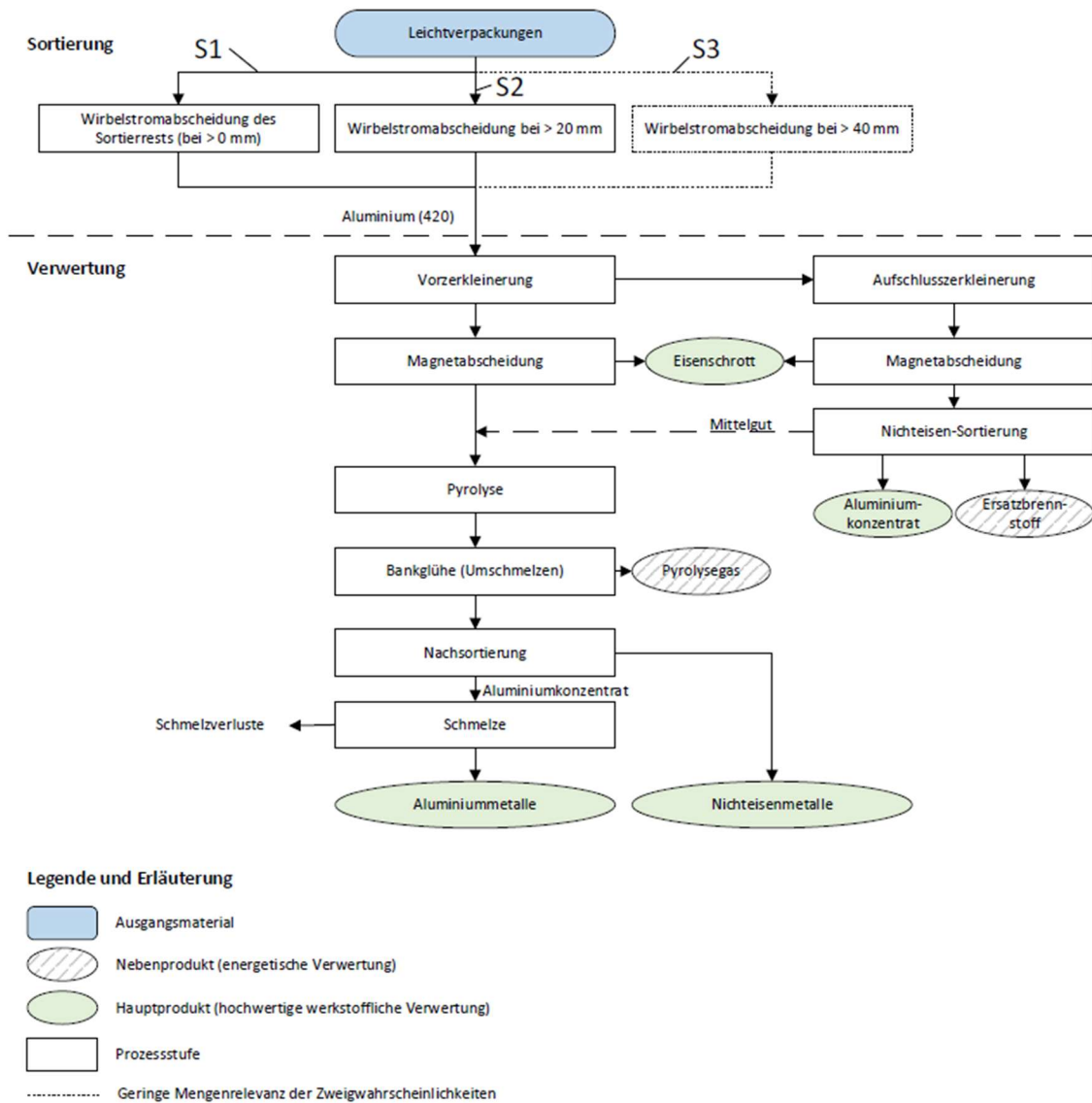


Abbildung 3: Fließbild für das Recycling von Aluminium (UBA 2022).

Das Metallausbringen ist beim Aluminiumrecycling mit 88 – 90 % im Vergleich zu anderen Metallen sehr hoch. Das entstandene Aluminiumprodukt wird dann einer Stranggussanlage zugeführt und verlässt diese als Walzbarren. Diese Walzbarren werden dann zu einem Dosenband gewalzt, aus welchem neue Aluminiumdosen hergestellt werden können (Antrekowitsch 2021).

2.4 Sortierung

Die Bauform von LVP-Sortieranlagen, (beide Beistriche weg) hängt vom erforderlichen Durchsatz, sowie vom Sammelsystem und somit der Abfallzusammensetzung ab. Obwohl sich LVP-Anlagen in ihrer Größe und ihrem Aufbau stark unterscheiden können, sind die grundsätzlich verwendeten Aggregate und deren grobe Anordnung bei den meisten Anlagen ähnlich. Ein beispielhaftes vereinfachtes Fließbild einer LVP-Anlage, welche dem Stand der Technik entspricht, sieht man in Abbildung 4.

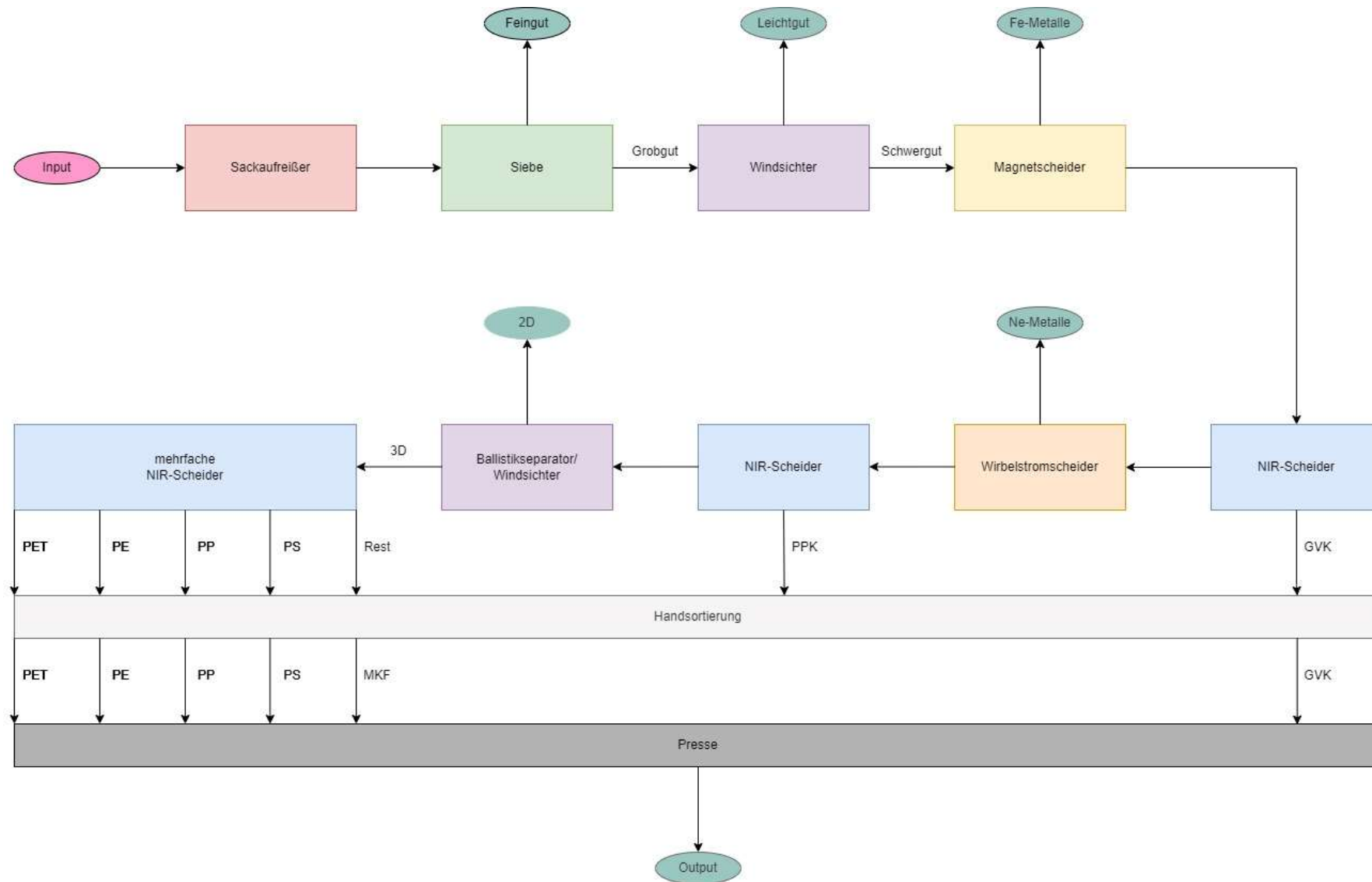


Abbildung 4: Beispielhafter Aufbau einer LVP-Sortieranlage (erstellt auf Basis von (Land Niederösterreich 2018, UBA 2018, BMK 2019)).

2.4.1 Sortierschritte vor der Metallabscheidung

Vor der Wirbelstromscheidung gibt es einige Aggregate, welche die Beschaffenheit des Stoffstroms beeinflussen und somit auch für das Ergebnis der Wirbelstromscheidung relevant sind. Die Parameter der Stoffstroms, welche beeinflusst werden, sind die Korngröße, Kornform und die Zusammensetzung des Stroms (Küppers 2021).

Sackaufreißer

Die gelben Säcke oder Ballen werden durch die Sackaufreißer gelöst. Es wird der Inhalt aufgerissen, gelockert, entleert und anschließend gleichmäßig für die Weiterverarbeitung dosiert. Das Gut soll bei dieser Vereinzlung weder zerkleinert noch zermahlt werden. Der Aufschluss und die Vereinzlung des Materials sind für die Sortierung in den späteren Schritten notwendig (BMK 2019).



Abbildung 5: Sackaufreißer mit Aufreißrotor und Aufreißkamm (Matthiessen Lagertechnik GmbH 2022).

Siebe

Die Siebklassierung ist eine Trennung, bei welcher die Korngröße das Haupttrennmerkmal ist. Partikel, welche kleiner als die vorhandenen Öffnungen sind, können diese passieren und landen im Feingut, der Rest wird im Grobgut ausgetragen (BMK 2019).

Die meisten Sortierverfahren, wie unter anderem auch die Wirbelstromscheidung, haben nur bei einem bestimmten Korngrößenverhältnis zwischen Größtkorn und Kleinstkorn einen guten Sortiererfolg, welches im optimalen Fall bei 3:1 und im Maximalfall bei 4:1 liegen sollte (Küppers 2021). Somit braucht man die Siebung zur Stoffstromkonditionierung, damit ein Wirbelstromscheider gute Ergebnisse erzielen kann. Für die Wirbelstromscheidung ist ein Kornbereich von 1 – 150 mm notwendig. Es kann desweiteren folgende Gründe für eine Siebklassierung geben (Kranert 2017):

- Zerlegung von Produkten in definierte Kornklassen,
- Abtrennung einer angereicherten Stoffgruppe (z.B. Kunststofffolien),
- Abtrennung von Störstoffen als Grobfraction, welche nachfolgende Aggregate beschädigen oder Prozesse stören können,

- Abtrennung von Störstoffen als Feinfraktion, um Verschleiß von nachfolgenden Aggregaten und Störung der Folgeprozesse zu vermeiden.

In modernen LVP-Anlagen werden üblicherweise Trommelsiebe verbaut, wobei die Feinabsiebung bei Siebschnitten von 20 mm, 30 mm oder 40 – 60 mm erfolgen (Grummt 2022). In größeren Anlagen sind bis zu vier Siebschnitte, welche jeweils ≥ 40 mm sind, implementiert. Diese werden so gewählt, dass die entstehenden Stoffströme die passenden Korngrößenverteilungen für die nachfolgenden Aggregate haben (Küppers et al. 2022).

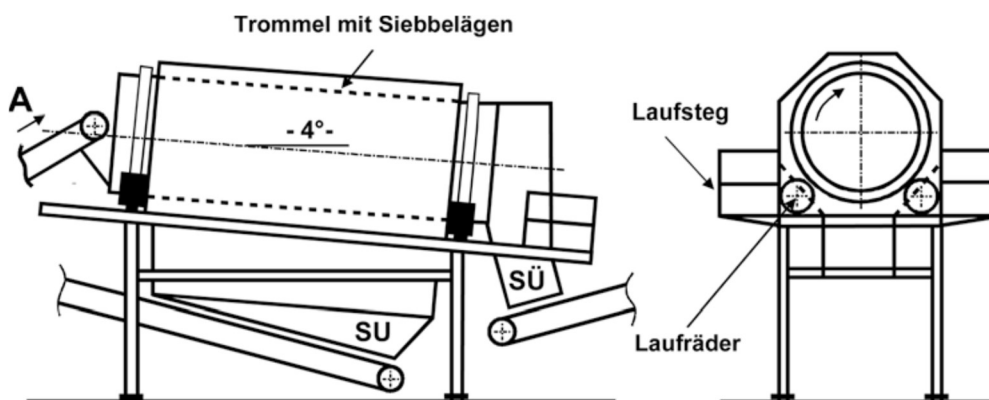


Abbildung 6: Schematischer Aufbau Trommelsieb (Kranert 2017).

Windsichter

Die Windsichtung dient der Trennung von trockenem Aufgabegut. Bei der Aufgabe sollte das Verhältnis von Größtkorn zu Kleinstkorn 3:1 nicht überschreiten. Die Haupttrennmerkmale sind Kornform, Dichte und Korngröße. Windsichter werden in LVP-Anlagen verwendet, um leichtes von schwerem Gut zu trennen (vgl. Abbildung 7). Dabei gelten Papier oder Kunststofffolien als Leichtgut, welche von Metallverpackungen und anderem Schwergut abgetrennt werden (Kranert 2017).

Somit sind die Hauptziele der Windsichtung die Erzeugung einer sauberen 2D- (Folienfraktion) bzw. Leichtgutfraktion und eine Volumenreduktion des Reststromes. Das Volumen wird reduziert, da die 2D-Fraktion meist sehr flächig ist und viel Platz einnimmt. Der Vorteil der Volumenreduktion besteht darin, dass die flächigen Objekte zu keinen Verstopfungen mehr führen können und bei der sensorbasierten Sortierung keine Objekte verdecken (Küppers 2021, Kranert 2017).

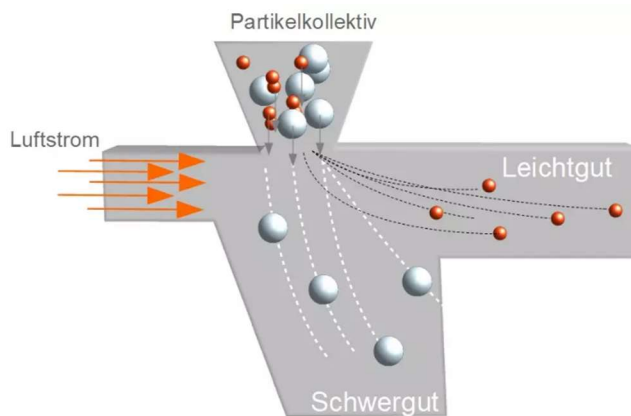


Abbildung 7: Schematische Darstellung der Windsichtung (Ingenieurkurse 2022).

Ballistischer Separator

Das Aufgabegut wird bei einem Ballistischen Separator nach dem Trennkriterium 2D (flach, schlank) und 3D (rollend, kubisch) bzw. teilweise auch nach Korngröße getrennt. Somit erhält man eine rollfähige 3D-Hauptfraktion und eine flächige (nicht rollfähige) 2D-Leichtfraktion, sowie je nach Einstellung und Aufbau auch eine Siebfraktion (Vgl. Abbildung 8). Das Material wird durch Rüttelbewegung und Neigung in verschiedene Richtungen gefördert (BMK 2019).

Der Ballistische Separator soll für hohe Reinheit in der 3D-Fraktion sorgen und ist somit auch für den Wirbelstromscheider wichtig, da die Folien im Wirbelstromscheider zu Verstopfungen führen würden. In Abbildung 4 ist der ballistische Separator nach dem Wirbelstromscheider angeordnet, in manchen Anlagen kann er jedoch, um den Folienanteil weiter zu reduzieren, vor dem Wirbelstromscheider angeordnet sein. (Küppers et al. 2022).

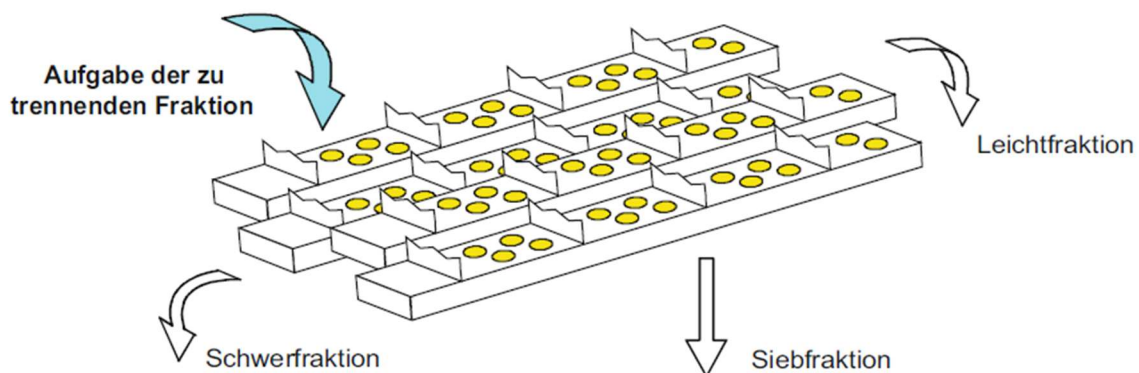


Abbildung 8: Schema eines Ballistischen Separators (Bilitewski und Härdtle 2013).

Magnetscheider

Ein Magnetscheider hat zur Aufgabe, durch magnetische Kräfte die ferromagnetischen Objekte eines Stoffstromes anzuziehen und über ein umlaufendes Band auszutragen (Bilitewski und Härdtle 2013).

In den meisten Anlagen werden Überbandmagnetscheider verwendet (vgl. Abbildung 9). Ziel ist die Eisenentfrachtung des Stoffstromes, um einerseits die Reinheit der Produkte zu erhöhen und andererseits, um die nachfolgenden Aggregate vor Beschädigungen zu schützen. (Küppers 2021).

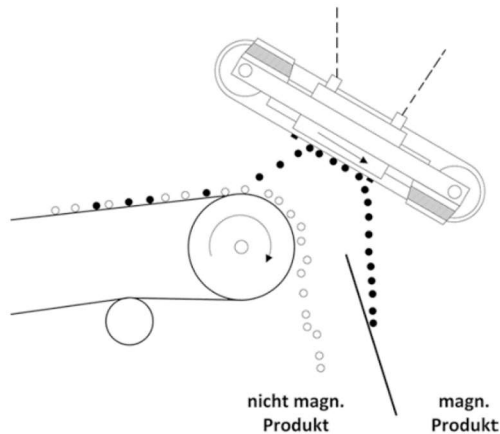


Abbildung 9: Schematische Darstellung Überbandmagnetscheider (Kranert 2017).

Sensor-basierte Sortierer

Mit Nahinfrarot (NIR)-Technologie können viele Materialien wie verschiedene Kunststoffe und Getränkeverbundkarton anhand ihrer chemischen Zusammensetzung detektiert und anschließend mittels Druckluftdüsen separiert werden. Der allgemeine Aufbau eines solchen Aggregates ist in Abbildung 10 zu erkennen (BMK 2019).

Für die Outputqualität des Wirbelstromscheiders ist diese Technologie wichtig, da GVK aufgrund der Aluminiumbeschichtung die Reinheit im NE-Produkt stark senkt. Moderne LVP-Anlagen scheiden GVK daher vorab mittels sensor-basierter Sortierung ab. Die Pouch-Fraktion kann nicht separat abgetrennt werden. Wenn die Pouches nicht im Ne-Produkt landen, enden sie in der Mischkunststofffraktion, werden aus dieser nicht mehr extra zurückgewonnen und schlussendlich verbrannt (Land Niederösterreich 2018, BMK 2019).

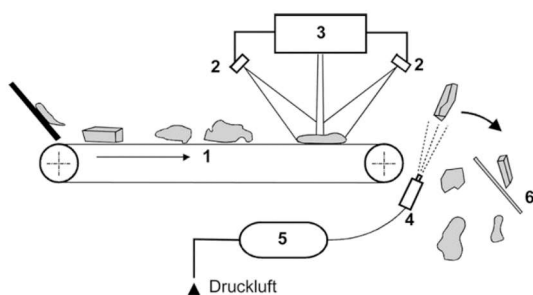


Abbildung 10: Schema eines NIR-Sortierers (Kranert 2017).

2.4.2 Wirbelstromscheider

Wirbelstromscheider werden zur selektiven Abtrennung von NE-Metallen verwendet. Ein schnellumlaufender Magnetrotor erzeugt ein schnellwechselndes Magnetfeld, welches Spannung in das elektrisch leitfähige Gut induziert. Die Spannung fließt dann im Körper in geschlossenen Pfaden („Wirbelstrom“). Die Wirbelströme erzeugen, laut der Lenz'schen Regel, ein eigenes Magnetfeld, welches dem Ursprungsmagnetfeld entgegengerichtet ist. Es kommt dadurch zu einer Kraft, welche auf das Objekt ausgeübt wird und dieses aus dem Feld herausbeschleunigt (Kranert 2017, Bilitewski und Härdtle 2013).

Der Trennerfolg ist von folgenden Parametern abhängig (Kranert 2017):

- Kornspanne und -verhältnis
- Verhältnis vom elektrischen Widerstand zur Stoffdichte
- Frequenz des magnetischen Wechselfeldes: Die feineren NE-Teilchen werden bei höheren Frequenzen besser abgestoßen.
- Stärke und Reichweite des magnetischen Wechselfeldes: Die abstoßende Kraft wächst mit der Induktion, weshalb Objekte so nah wie möglich am Band sein sollten.
- Objektform: Lange und flächige Objekte lassen sich schlecht abtrennen.

Die Versuchsparameter Bandgeschwindigkeit, Polradgeschwindigkeit, Polradposition, Trennscheitelwinkel und Trennscheitelposition können am Wirbelstromscheider verstellt werden. Die Beschreibung dazu folgt im Methodikteil in Kapitel 3.2.2.

In Abbildung 11 ist der Aufbau eines Wirbelstromscheiders zu erkennen. Zunächst wird das Gut über eine Schwingrinne vereinzelt und dann über ein Beschleunigungsband dem Polrad zugeführt. Beim Polrad wird durch die eben beschriebenen physikalischen Kräfte die Flugbahn der NE-Metallobjekte verändert. Dadurch entstehen je nach Einstellung des Trennscheidels zwei verschiedene Fraktionen. Die Fraktion der Objekte, welche sich durch die Ablenkung über den Trennscheitel bewegen, werden Eject genannt. Die Fraktion der Objekte, welche nicht metallisch sind und dadurch nicht abgelenkt werden, werden Drop genannt (Kranert 2017).

Die Eisenfraktion wird beim Wirbelstromscheider vom Magneten des Polrades angezogen, die Objekte bewegen sich beim Polrad in alle Richtungen. Dadurch werden die Förderbänder beschädigt und die Flugkurve der NE-Metalle und somit der Trennerfolg wird beeinflusst (Kranert 2017).

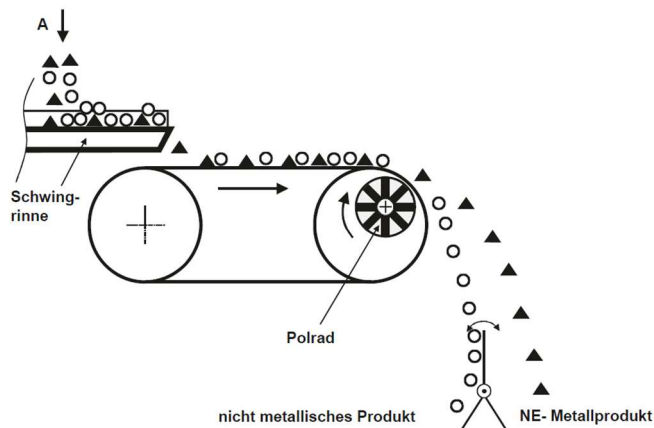


Abbildung 11: Schema eines Wirbelstromscheiders (Kranert 2017).

Um die Sortierperformance eines Wirbelstromscheiders zu bewerten, gibt es verschiedene Kenngrößen, welche in der Praxis üblicherweise massenbasiert, aber auch pixel-, objekt- oder volumenbasiert berechnet werden (Kranert 2017, Schlögl 2022a, Küppers et al. 2021):

- **Reinheit:** wird auch Wertstoffgehalt genannt. Sie beschreibt den Anteil der Wertstoffe im Eject und ist damit ein Maß für die Outputqualität (siehe Formel (3)).

$$\text{Reinheit} = \frac{\text{Menge Wertstoffe im Eject}}{\text{Gesamtmenge Eject}} \quad (3)$$

- **Ausbringen:** beschreibt den Anteil des Inputs, welcher bei einem Sortierprozess in das Eject überführt wird (siehe Formel (4)).

$$\text{Ausbringen} = \frac{\text{Gesamtmenge Eject}}{\text{Gesamtmenge Input}} \quad (4)$$

- **Wertstoffausbringen:** ist jener Anteil des aufgegebenen Wertstoffes im Input, welcher in das Eject überführt wird (siehe Formel (5)).

$$\text{Wertstoffausbringen} = \frac{\text{Menge Wertstoff im Eject}}{\text{Menge Wertstoff im Input}} \quad (5)$$

2.5 Stoffstrommonitoring

Monitoring ist die kontinuierliche Überwachung eines Systems, welches beispielsweise eine LVP-Anlage oder auch ein einzelnes Aggregat innerhalb der Anlage sein kann. Die Grundlage des Stoffstrommonitorings ist die Charakterisierung von Stoffstromeigenschaften, welche mit verschiedenen Sensoren realisiert werden kann. Dies wird sensor-basierte Stoffstromcharakterisierung (Engl. Sensor-based material flow characterization; SBMC) genannt (Schlögl 2022a).

Durch sensorbasiertes Stoffstrommonitoring (Engl. sensor-based material flow monitoring; SBMM) kann live auf Ausfälle, Schwankungen und Verstopfungen reagiert werden. Wenn die SBMC-Daten nun mit einer Sollgröße verglichen und bewertet werden, wird dies sensorbasierte Qualitätskontrolle (Engl. sensor-based quality control; SBQC) genannt. Diese Daten können live als Warnsystem genutzt werden oder offline, um den Prozess zu analysieren und in weiterer Folge zu optimieren (Schlögl 2022a).

Sensor-basierte Prozesskontrolle (Engl. sensor-based process control; SBPC) ist die zusätzliche aktive Beeinflussung einer oder mehrerer Prozesse, welche im laufenden Anlagenbetrieb durchgeführt werden kann. Es wird dabei auf Basis der SBQC eine Entscheidung wie beispielsweise die Verringerung der Förderbandgeschwindigkeit getroffen. Findet die Überwachung oder Beeinflussung vor dem Messpunkt statt, wird es Upstream Steuerung genannt und während der Überwachung oder Beeinflussung nach der Messung Downstream Steuerung genannt wird. In Abbildung 12 sind all diese Begriffe in einer Grafik visualisiert (Schlögl 2022a).

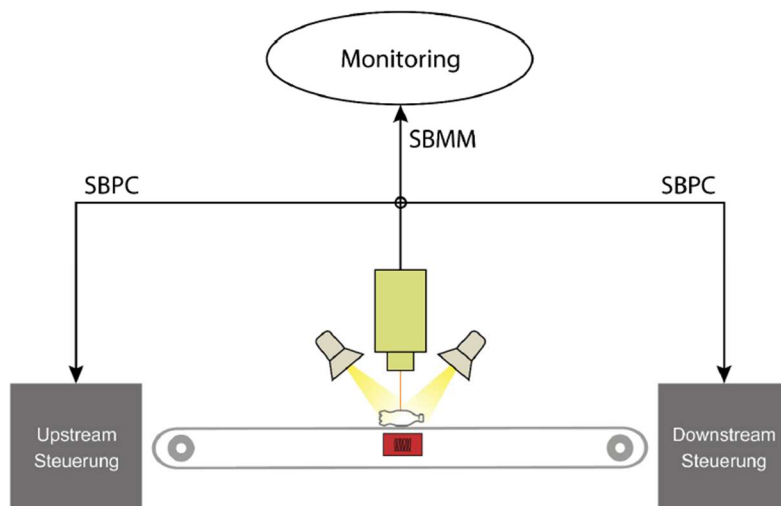


Abbildung 12: Schematische Darstellung des Monitorings in einer LVP-Anlage (Schlögl 2022b).

Folgende Sensoren eignen sich für das Stoffstrommonitoring in Kunststoffsortieranlagen (Schlögl 2022a):

- Induktion: Diese Sensoren wurden für diese Arbeit verwendet und die Funktionsweise wird in Kapitel 2.5.1 erläutert.
- NIR: Diese Sensoren werden für das Stoffstrommonitoring aktuell am häufigsten eingesetzt. Als Beispiel wurde NIR von Schlögl und Küppers (2022) zum SBMM zur Analyse von Objekten vor und nach einem Delabeling verwendet.
- LiDAR: Dieser Sensor wurde von Schwarzenbacher (2022) zur volumetrischen Stoffstromcharakterisierung von LVP-Material untersucht.

- 3DLT: Dies ist ebenfalls ein Sensor zur Volumenstrommessung und wurde von Kroell et al. (2021) zur sensorbasierten Partikelmassen Vorhersage verwendet.
- VIS: Dieser Sensor wird zur Farberkennung und wurde auch von Kroell et al. (2021) zur sensorbasierten Partikelmassen Vorhersage verwendet.

Für die Überwachung des Stoffstromes müssen, wie zuvor beschrieben, dessen Eigenschaften erfasst werden. Dies kann wie in Abbildung 13 zu sehen ist, auf verschiedenen Ebenen geschehen. Bei pixelbasiertem Monitoring werden die Pixel pro Zeit bestimmt. Beim objektbasierten Monitoring werden die Objekte pro Zeit gezählt, wobei als Objekt je nach Auswertalgorithmus beispielsweise eine Anhäufung von Pixel derselben Art definiert ist. Beim Monitoring auf Stoffstromebene werden gemeinsame Eigenschaften von vielen Objekten, beispielsweise in Bezug auf ein Sortieraggregat, untersucht. Beim Monitoring auf Prozessebene werden mindesten zwei Stoffströme analysiert und miteinander verglichen (Schlögl 2022a, Kroell et al. 2022).

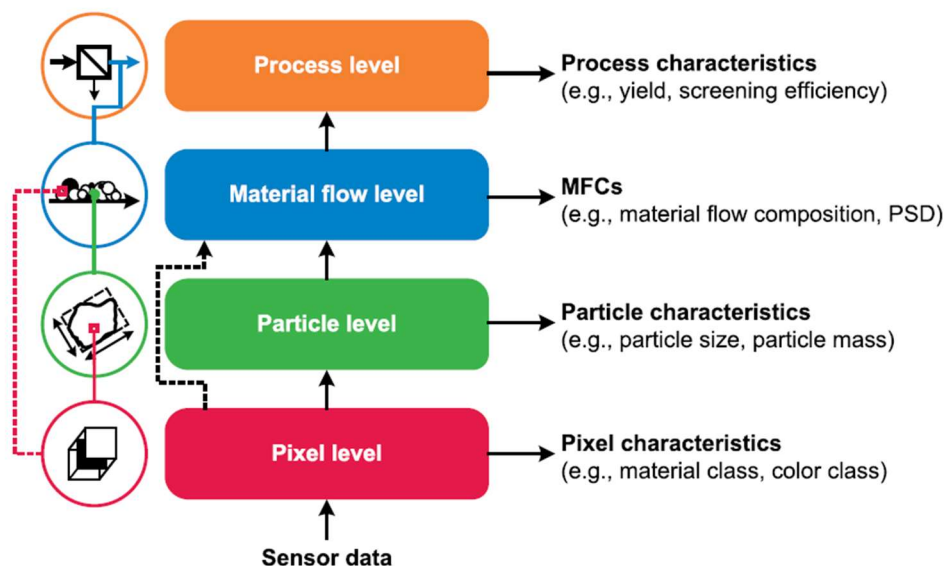


Abbildung 13: Verschiedene Ebenen des Stoffstrommonitorings (Kroell et al. 2022).

2.5.1 Metaldetektion

Die Erkennung von NE-Metallen kann mittels induktiver Sensoren durchgeführt werden. Bei Metallsensoren sind mehrere Spulen quer zur Bandlaufrichtung unter dem Förderband montiert (siehe Abbildung 14). Diese Sensoren erzeugen durch eine Spule elektromagnetische Wechselfelder, welche wegen des Spulenkerns vom Förderband weg gerichtet sind. In dem bewegten leitfähigen Material werden nun Spannungen induziert, welche Wirbelströme erzeugen. Es entsteht wie beim Wirbelstromscheider ein elektromagnetisches Sekundärfeld, im Gegensatz dazu ist dieses jedoch konstant und nicht veränderlich. Durch das Sekundärfeld entziehen metallische Objekte dem Primärfeld nur Energie und werden nicht wie beim Wirbelstromscheider abgestoßen. Ein elektromagnetischer Sensor misst diese Veränderung des Feldes. Die induzierten Magnetfeldänderungen hängen von der Metallart, der Größe, der

Form und der Lage der Objekte ab. Es gibt auch Sensoren, welche zwischen magnetischen Metallen, Edelstählen und anderen NE-Metallen unterscheiden können (Kulcke et al. 2008; Uepping 2013).

Durch die begrenzte Reichweite der elektromagnetischen Felder muss beim Einbau beachtet werden, dass der Abstand zum Förderband minimal ist (xpertgate 2018).

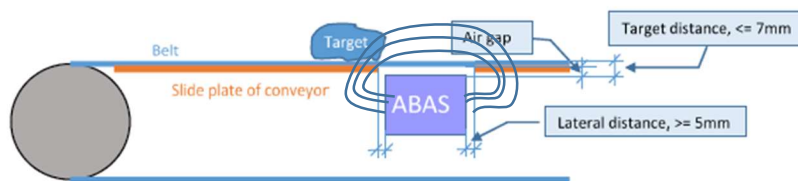


Abbildung 14: Schematischer Aufbau Metallsensor (EVK 2022).

Leitfähigkeit

Die Leitfähigkeit ist eine materialspezifische Eigenschaft. Umso höher der Quotient von elektrischer Leitfähigkeit zur Dichte eines Metalls ist, umso stärkere Wirbelfelder gibt es. Daraus resultierend wird ein stärkeres Magnetfeld erzeugt und die Objekte werden besser erkannt. In Tabelle 6 sind die Leitfähigkeiten einiger wichtiger Metalle gereiht nach der materialspezifischen Detektierbarkeit angeführt. Bei Objekten mit gleicher Geometrie liefern somit Aluminium und Magnesium die besten Ergebnisse (Kranert 2017).

Tabelle 6: Leitfähigen einiger wichtiger Metalle (Böhm 2021).

Metall	Leitfähigkeit σ [MS/m]	Dichte ρ [kg/m ³]	σ/ρ [MSm ² /kg]
Aluminium	35	2700	13
Magnesium	22	1740	12,2
Kupfer	56	8900	6,3
Silber	63	10500	6
Zink	16	7100	2,3
Messing	11 - 14	8500	1,3 - 1,6
Zinn	9	7300	1,2
Blei	5	11300	0,4
hochlegierte Stähle	0,7	7700	0,1

Die elektrische Leitfähigkeit ist wie in Formel (6) zu sehen ist, von der Geometrie eines Körpers abhängig. So hätte aufgrund der Querschnittsfläche zum Beispiel eine Hohlkugel eine andere elektrische Leitfähigkeit als eine Vollkugel (Paris 2021).

$$\sigma_e = \frac{L}{A * R} \quad (6)$$

σ_e ... spezifische elektrische Leitfähigkeit [$1/\Omega m$]

L ... Länge eines Leiters [m]

A ... Querschnittsfläche des Leiters [m^2]

R ... elektrischer Widerstand [Ω]

2.5.2 Monitoring und Steuerung von Wirbelstromscheidern

Wenn ein Wirbelstromscheider die Anforderungen bezüglich Ausbringens und Reinheit nicht erfüllt, könnte die Leistung mit SBMM gesteigert werden. Da es beim Wirbelstromscheider einige verstellbare Größen wie die Band- und Polradgeschwindigkeit gibt, eignet er sich gut, um SBPC durchzuführen. Also eignet sich der Wirbelstromscheider gut um SBMC, durch Überwachung relevanter Stoffstromeigenschaften zu nutzen und diese durch SBPC zu optimieren.

In Bunge (2018) wird ein selbstoptimierender Wirbelstromscheider beschrieben. Zum Erfassen der Daten für die SMPC dient ein LED-Lichtgitter (siehe Abbildung 15 links), welches aus einer LED-Sendeinheit und einer gegenüberliegenden Photozellen-Empfangeinheit besteht. Diese Sende- und Empfängereinheit ist über dem Trennscheitel positioniert und misst die Unterbrechungen der Lichtleiste pro Zeiteinheit. Es werden also mithilfe der Lichtkanäle beide Massenströme abgetastet. Daraus ergibt sich je nach Flugkurve der Partikel eine bimodale Partikel-Anzahlverteilung. Der Trennscheitel sollte im Idealfall im Minimum zwischen den Anzahlverteilungen des Konzentrats- und Rückstandsmassenstrom liegen. Falls der Trennscheitel nun nicht mehr im Minimum der Verteilung liegt (vgl. Abbildung 15 rechts) und dadurch Produkt im Reststrom verloren geht, soll der Trennscheitel automatisch verschoben werden. Aufgrund der flexibleren Anpassbarkeit in der Praxis wurde allerdings stattdessen die Bandgeschwindigkeit variiert. Dies bewirkt eine Verschiebung der Materialströme relativ zum Trennscheitel.

Das verwendete Material der Versuche war die Rostasche einer Müllverbrennungsanlage (=MVA) mit einer maximalen Korngröße von 8 mm. Eine Herausforderung für die Sensorik war die große Staubentwicklung, welche mit einem Staubschutzgehäuse des Sensors gelöst wurde. Das größte festgestellte Problem war die Materialfeuchte, deretwegen das Material am Band haftet und nicht abgelenkt wird. Die Ergebnisse der Versuche ergaben, dass bei höherer Materialfeuchte ursprünglich mehr NE-Metalle im Drop landeten. Durch die automatische sensor-basierte Anpassung der Bandgeschwindigkeit konnte der gleiche NE-Gehalt im Eject wie bei trockenem Material erzielt werden. Somit wurde die Hypothese bestätigt, dass sich das Verändern der Bandgeschwindigkeit positiv auf die Sortierperformance auswirkt (Bunge 2018).

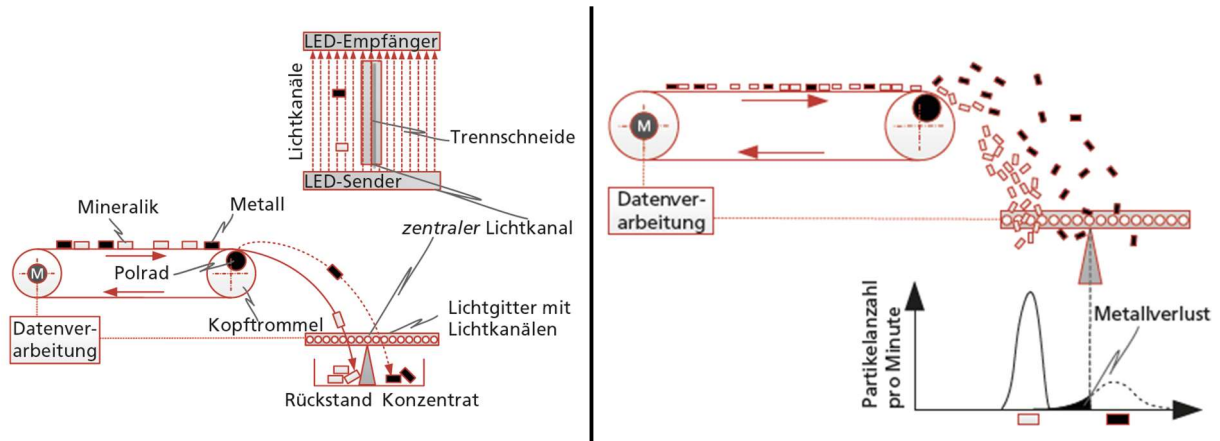


Abbildung 15: Links: Versuchsaufbau SMPC mittels LED-Lichtgitter, rechts: Partikelanzahlverteilung bei schlechter Einstellung des Trennscheitels (Bunge 2018).

In einer weiteren Studie von Rahman und Bakker (2013) wurde als Sensoren, wie in Abbildung 16 zu sehen ist, eine Kombination aus einem Metall- und einem NIR-Sensor verwendet. Dabei wurde der Metallsensor für die Zählung der Metallobjekte genutzt und der NIR-Sensor zur Detektion aller Objekte, um den Anteil der mineralischen Inhaltstoffs im Produkt auch zu erfassen. Als Probenmaterial fungierte hier ebenfalls MVA-Schlacke mit einem Kornbereich von 1 – 6 mm. Zunächst wurden Laborversuche durchgeführt, um die Genauigkeit des Sensorwertes im Vergleich zur manuellen Analyse zu bestimmen. Es erfolgten auch Versuche in einer Schlackenaufbereitungsanlage. Bei beiden Versuchen wurde die Auswirkung von verschiedenen Trennscheitelpositionen untersucht. Es wurde festgestellt das die Leistung des Wirbelstromscheiders von der Trennscheitelposition abhängt, da eine Verschiebung des Trennscheitels um 10 mm das Ausbringen um 10 % und die Reinheit um 18 % gesteigert hat. Es wurde auch festgestellt, dass nasse Materialien problematisch sind, da die kleinen Teilchen entweder im Strom untergehen oder am Förderband kleben bleiben können. Die wichtigste Feststellung von Rahman und Bakker (2013) war, dass die Sensoren zur Produktqualitätskontrolle oder in der automatischen Kontrolle des richtigen Trennscheitelabstandes eingesetzt werden können.

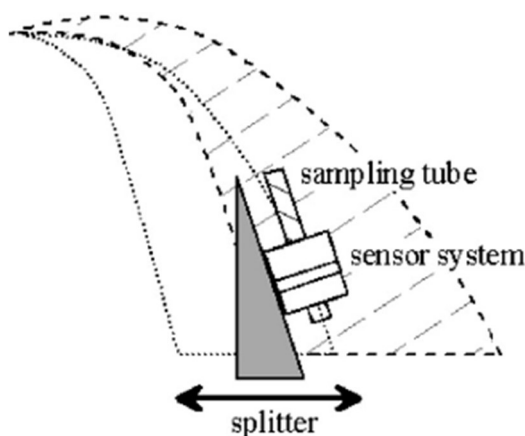


Abbildung 16: Versuchsaufbau SBMM mittels Kombination aus Metall- und NIR-Sensor (Rahman und Bakker 2013).

Für den Einsatz von Sensoren zu Monitoring und Steuerung von Wirbelstromscheidern in LVP-Anlagen gibt es keine vorhandene Literatur. Da LVP-Material im Gegensatz zu MVA-Schlacke eine völlig andere Korngrößenverteilung und Stoffstromzusammensetzung hat, sind die Erkenntnisse von Bunge (2018) und Rahman und Bakker (2013) nicht unmittelbar übertragbar.

3 Material und Methoden

Im Rahmen dieser Arbeit wurden drei verschiedenen Versuchsreihen durchgeführt. Um die Hauptversuchsreihe mit dem besten Ergebnis durchführen zu können, waren zwei Vorversuchsreihen notwendig. Diese Versuchsreihen werden nachfolgend jeweils einzeln beschrieben.

3.1 Vorversuche Metallsensor

Diese Versuchsreihe wurde mit dem Hauptziel durchgeführt, die optimalen Einstellungen der relevanten Sensorparameter des ABAS-Metallsensors der EVK DI Kerschhaggl GmbH zu finden. Ein weiteres Ziel war es, die Auswirkung der unterschiedlichen Verformung und Platzierung am Förderband der verschiedenen Versuchsobjekte zu untersuchen. Diese Versuche wurden im Technikum der EVK DI Kerschhaggl GmbH in Graz durchgeführt.

3.1.1 Probenmaterial

Diese Versuchsreihe wurde mit vier verschiedenen Probenmaterialien durchgeführt. Als erstes Probenmaterial dienten acht Bierdosen vom selben Hersteller, welche alle jeweils unterschiedlich verformt wurden, um die unterschiedlichen Entsorgungsgewohnheiten der Konsumenten und deren Auswirkung auf die Detektion widerzuspiegeln. Aufgrund der begrenzten Reichweite des Metallsensors wird nicht immer die gesamte Probe erkannt und in nachfolgender Abbildung 17 ist die detektierbare Fläche hervorgehoben.

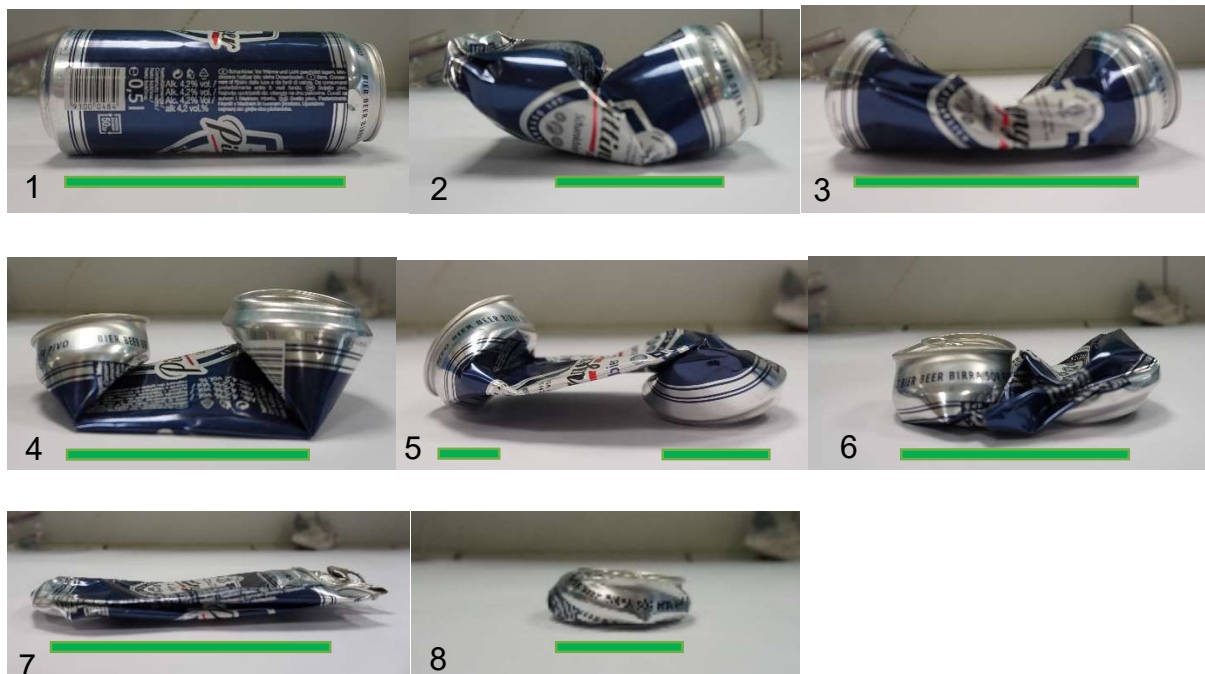


Abbildung 17: Dosenproben mit der detektierbare Fläche grün dargestellt.

Das zweite Probenmaterial waren sieben GVK, welche nach dem privaten Nutzen gewaschen und gesammelt wurden. Die detektierbaren Flächen sieht man in Abbildung 18.

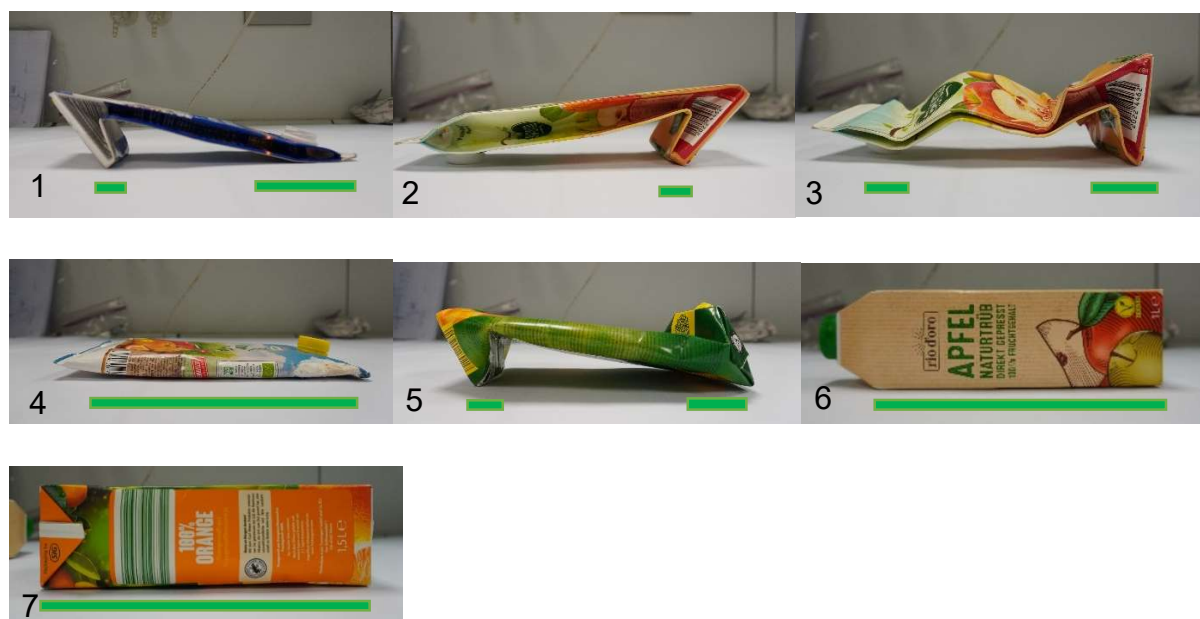


Abbildung 18: GVK mit der detektierbaren Fläche grün dargestellt.

Als weiteres Probenmaterial diente Alufolie, welche einmal als Ball, einmal als gerollter Stab und einmal als flächiges Rechteck geformt war. Die detektierbaren Flächen kann man in Abbildung 19 erkennen.

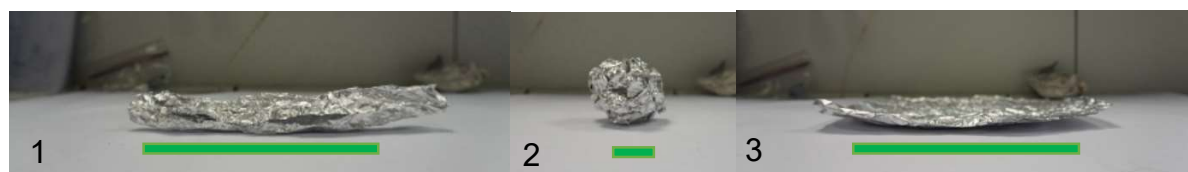


Abbildung 19: Alufolie Proben mit der detektierbaren Fläche grün dargestellt.

Als letztes Probenmaterial wurden vier Pouches aufgegeben. Es waren jeweils zwei Pouches vom selben Typ, wobei bei einem eine volle Füllung simuliert wurde (siehe Probe 1 und 3). Die detektierbaren Flächen werden in Abbildung 20 dargestellt.

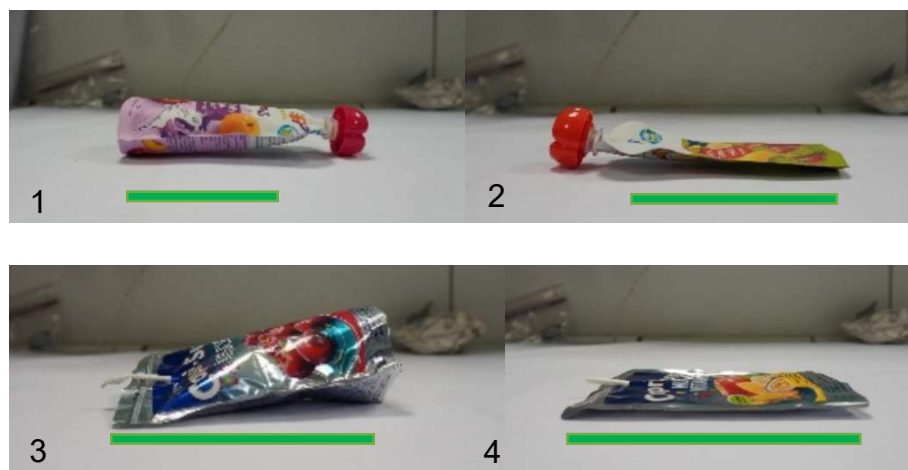


Abbildung 20: Pouch-Proben mit den detektierbaren Flächen in grün dargestellt.

3.1.2 Versuchsaufbau

Es werden zunächst der verwendete Sensor und dann der allgemeine Aufbau vor Ort erklärt.

Verwendeter Sensor:

Es wurde der ABAS-Metalldetektor von EVK DI Kerschhagl GmbH sowohl für diese Vorversuche als auch für die später beschriebenen Hauptversuche verwendet.

Dieser weist folgende Spezifikationen auf:

- Detektiert Eisen und NE-Metalle
- Teilung: 25 mm
- Abtastrate: etwa 500 HZ
- IP-Schutzart: IP 65
- Abmessungen: siehe Abbildung 21

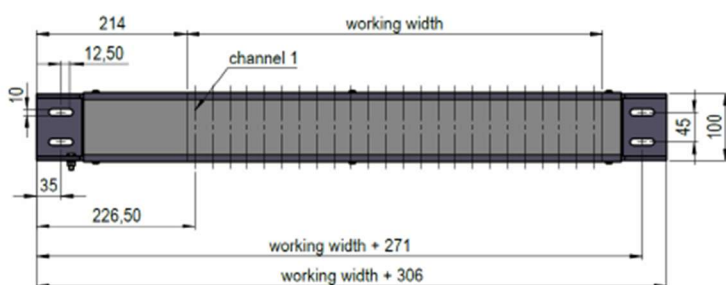


Abbildung 21: Abmessungen der ABAS-Leiste von EVK (EVK 2022).

Beim Einbau muss der Abstand zu Metallbauteilen mindestens 5 mm betragen und der Abstand zum detektierten Metall darf höchstens 7 mm betragen darf.

Mit dem Pleora eBUS player kann man mit einem verbundenen Computer verschiedene Sensorparameter einstellen. Im nachfolgenden werden alle Sensorparameter beschrieben, welche bei dem Metallsensor veränderbar sind (EVK 2022):

- **Zielgeschwindigkeit [mm/s]:** Sie gibt die Geschwindigkeit des zu erfassenden Zielpartikels an.
- **Delay time [ms]:** Verzögerungszeit zwischen der Erkennung eines Metallziels und der Aktivierung des jeweiligen Effektors.
- **Threshold [Zählungen]:** Die Schwellenschwelle, welche überschritten werden muss, um eine Erkennung auszulösen.
- **Minimale Objektgröße []:** Sie gibt die Anzahl der aufeinanderfolgenden Messwerte in einem Kanal an, die den Schwellenwert überschreiten müssen, um einen Effektor zu aktivieren.
- **Blow-out time [ms]:** Sie gibt die Zeit an, die eine Luftdüse geöffnet bleiben muss, und hängt von der Objektgröße ab.

- **Mirror Channels:** Es wird die Kanalreihenfolge des Sensors umgekehrt, um unterschiedliche Einbaulagen des Sensors zu ermöglichen.
- **Sensor Flip:** Es wird intern die Einbaulage des Sensors gespiegelt.
- **Channelshift:** Es können einzelne Kanäle der Leiste als inaktiv geschaltet werden. Daraus folgt, dass die Leiste beim Band überstehen kann.

Allgemeiner Aufbau

In Abbildung 22 kann man den Aufbau, welcher für die Vorversuche notwendig war, erkennen. Das Förderband, auf welchen die Proben mittig aufgegeben wurden, ist mit einer blauen Schutzfolie abgedeckt und unter diesen befindet sich der Metallsensor, welcher rechts neben dem Band hinausragt.

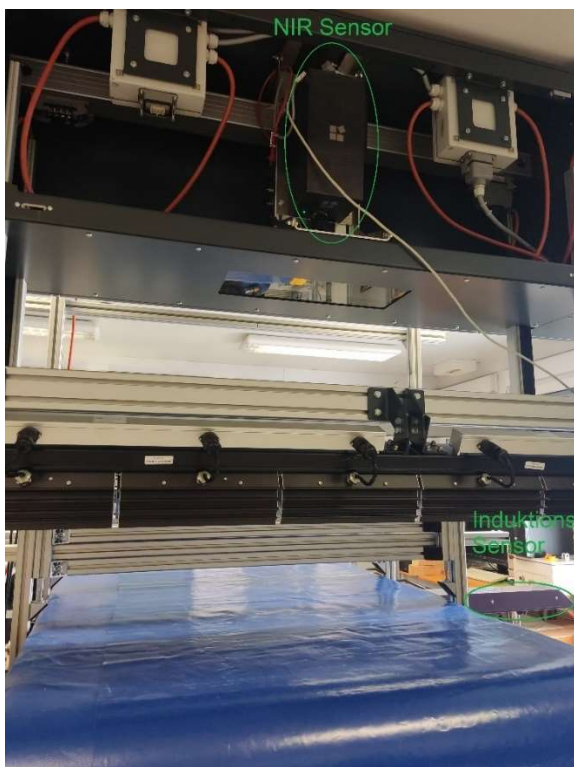


Abbildung 22: Versuchsaufbau für die Versuche bei EVK in Graz.

3.1.3 Durchführung

Um zu untersuchen, welche einstellbaren Parameter des Sensors die Detektion beeinflussen, wurden in vier verschiedenen Versuchsreihen Threshold (1.000 und 10.000) und minimale Objektgröße (2 und 10) variiert. Der maximal einstellbare Threshold ist 50.000 und die maximal einstellbare minimale Objektgröße ist 50. Die anderen Werte wurden auf Basis von Erfahrungswerten des Sensorherstellers ausgewählt. Die Werte für die unterschiedlichen Einstellungen der Versuchsreihen sind in Tabelle 7 abgebildet.

Tabelle 7: Versuchsparameter Vorversuche Metallsensor.

	1. Versuch	2. Versuch	3. Versuch	4. Versuch
Zielgeschwindigkeit [mm/s]	1.000	1.000	1.000	1.000
Delay Time [ms]	100	100	100	100
Threshold []	1.000	10.000	10.000	1.000
Minimale Objektgröße [-]	2	2	10	10
Blow Out Time [ms]	5	5	5	5
Mirror Channels	Standard	Standard	Standard	Standard
Sensor Flip	Standard	Standard	Standard	Standard
Channelshift	0	0	0	0

Die Aufgabe der Objekte erfolgte jeweils parallel zur Förderrichtung („gerade“) von „vorne“ (=Oberseite der Probe) bzw. „hinten“ (= Unterseite der Probe). Weiters wurden die Objekte „quer“, ebenfalls von „vorne“ und „hinten“ aufgegeben. Jede dieser Aufgabearten wurde dreimal wiederholt. Die Materialien Alufolie und Pouch wurden jeweils nur von „vorne“ aufgegeben, da ein Umdrehen der Probe keine weiteren Erkenntnisse gebracht hätte. Bei der Alufolie wurden die Proben nicht quer aufgegeben, dafür wurde der Stab jeweils ein zweites Mal, nämlich quer aufgegeben, somit kam es dazu das fünf Objekte detektiert wurden. Pouches wurden erst ab der dritten Versuchsreihe mitaufgegeben, da die Proben erst ab diesen Zeitpunkt zur Verfügung standen. Beispiele für diese Orientierungen am Band sieht man in folgender Abbildung 23 anhand von GVK. Es wurden immer alle Proben einer Fraktion in einer Linie hintereinander mit einem Abstand von ungefähr fünf Sekunden aufgegeben, am Bandende aufgefangen und anschließend erneut aufgegeben.

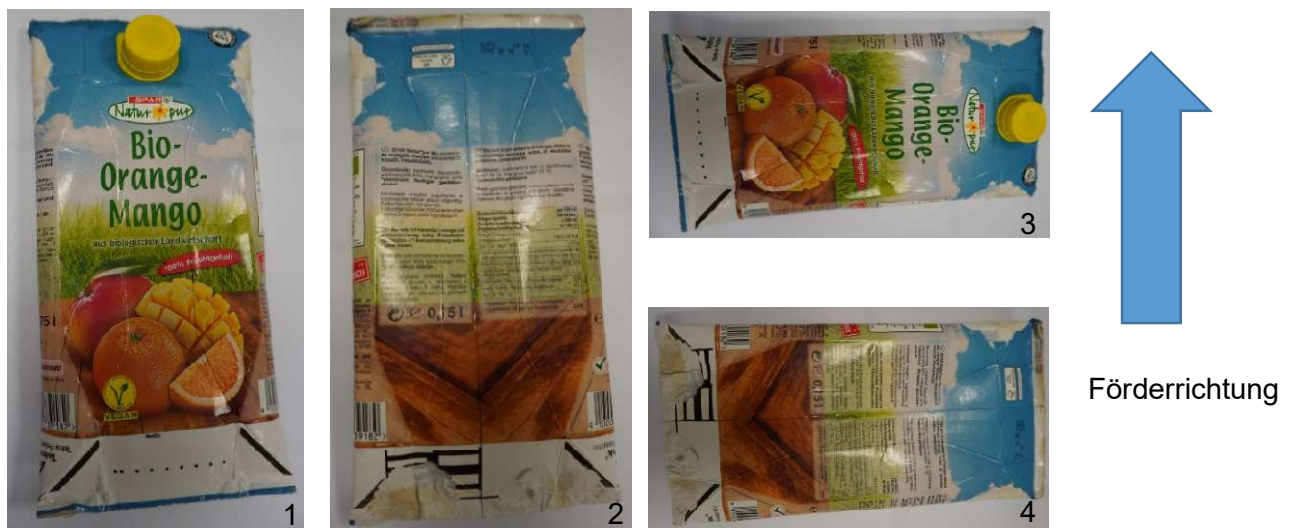


Abbildung 23: Untersuchte Orientierungen der Proben: (1) „vorne“, (2) „hinten“, (3): „quer vorne“, (4) „quer hinten“.

3.1.4 Versuchsauswertung

Die Daten wurden mit Unterstützung der Siemens AG ausgelesen und als csv-Dokument exportiert. In diesem Dokument erfolgte die Summierung der Pixeldaten zu Objekten und anschließend gab es eine Analyse, ob je Durchgang gleich viele Objekte erkannt wie

aufgegeben wurden. Die NIR-Daten wurden zwar erfasst, aber in dieser Arbeit nicht berücksichtigt.

Außerdem wurden zur grafischen Darstellung der Ergebnisse Boxplots erstellt. Ein Boxplot ist eine grafische Darstellungsform der deskriptiven Statistik. In einem Boxplot werden, wie in Abbildung 24 ersichtlich, der untere Whisker, das untere Quartil, der Median, das obere Quartil und der obere Whisker abgebildet. Das erste Quartil entspricht jenem Wert, der größer ist als 25 % der Werte der Verteilung und analog dazu entspricht das obere Quartil jenem Wert der größer ist als 75 % aller Werte. Der untere Whisker bildet den minimalen Wert ab und der obere Whisker ist gleich dem Maximalwert der Verteilung. Die Box ist der Abstand zwischen unterem und oberem Quartil und gibt an in welchen Bereich sich 50 % aller Werte der Verteilung befinden. Der Median teilt die Verteilung in zwei gleich große Hälften und somit sind 50 % der Werte kleiner dem Median und 50 % der Werte größer dem Median. Eine große Box beschreibt eine große Streuung der Ergebnisse und eine kleine Box somit eine kleine Streuung der Daten (Butterwegge 2010, Walther 2012).

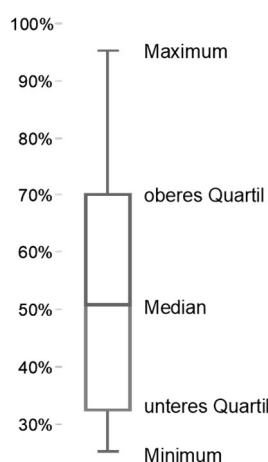


Abbildung 24: Beispielhafte Darstellung eines Boxplots (Butterwegge 2010).

Mit den Ausgangsdaten wurden in der Software Excel mittels integrierter Funktionen der Median-, Minimal- und Maximalwert, sowie unteres - und oberes Quartil berechnet mit welchen dann die Boxplots erstellt wurden.

Um eine bessere Darstellung der Ergebnisse zu ermöglichen, wurden mit der Software Origin Violinen-Plots erstellt. Ein Violinen-Plot ist eine Kombination aus einem Boxplot und einem Kernel-Dichte-Diagramm (siehe Abbildung 25). Es beinhaltet im Normalfall alle Daten, welche ein Boxplot beinhaltet, also Median, Quartile und Extremwerte. Ein Violinen-Plot zeigt im Unterschied zum Boxplot die komplette Verteilung einer Datenreihe. Es werden also auch die Wahrscheinlichkeitsdichten von verschiedenen Werten dargestellt. Die Breite der Kurve entspricht somit der ungefähren Häufigkeit der Datenpunkte in diesem Bereich (Reuter 2022; Yi 2021).

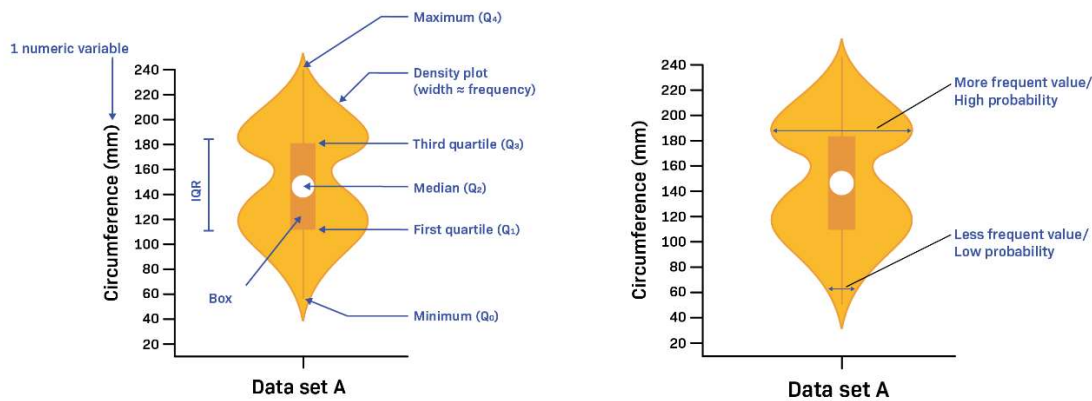


Abbildung 25: Beispielhafte Darstellung eines Violinen-Plots (labxchange 2022).

3.2 Vorversuche Wirbelstromscheider

Diese Versuchsreihe wurde mit dem Ziel durchgeführt, die relevanten Einstellungen des Wirbelstromscheiders für die Hauptversuche im Technikum von Stadler Anlagenbau GmbH in Krsko (Slowenien) zu finden. Dabei wurden insbesondere Einstellungen mit hohem Ausbringen und hoher Reinheit des Produktes gesucht. Außerdem soll die Verstellung der Versuchsparameter des Wirbelstromscheiders einfach, schnell und sofern möglich während dem Betrieb geschehen können.

3.2.1 Probenmaterial

Für diese Versuchsreihe wurde mit jeweils einem Big Bag von vier verschiedenen Probenfraktionen (PET, PE, PP/PS-Gemisch, NE-Metall) gearbeitet, welche in Abbildung 26 dargestellt sind. Bei den Proben handelt es sich um Produktfraktionen der Kunststoffsortieranlage in Maribor (Slowenien).



Abbildung 26: Probenmaterial: (1) PET, (2) PE-, (3) PP/PS Mischung und (4) NE-Metall.

Es wurden außerdem nach den Versuchen mit Reinmaterial, eine Mischfraktionen aus den Reinfractionsproben erstellt. Die Zusammensetzung der Mischfraktion (siehe Tabelle 8 und Abbildung 27) wurde so gewählt, dass ein großer Teil NE-Metalle vorhanden ist, da dies die relevante Fraktion beim Wirbelstromscheider ist.

Tabelle 8: Anteil der Einzelfraktionen an der Mischung.

Fraktion	Anteil
NE-Metalle	49%
PET	17%
PET	17%
PP/PS Mischung	17%



Abbildung 27: (1) Anteil NE-Metalle an der Mischung, (2) PET- (links), PE- (Mitte) und PP/PS- (rechts) Anteil an der Gesamtmischung.

3.2.2 Versuchsaufbau

Es werden zunächst die verwendeten Aggregate und dann der allgemeine Aufbau vor Ort erläutert.

Verwendete Aggregate

Bei dieser Versuchsreihe wurde der Wirbelstromscheider NEES 5009 der Firma Steinert untersucht. Im nachfolgenden werden alle Versuchsparameter genauer beschrieben, welche veränderbar sind und nach Praxiserfahrung von Stadler Anlagenbau GmbH einen Einfluss auf den Trennerfolg haben können:

- Bandgeschwindigkeit [m/s]:

Die Bandgeschwindigkeit des Wirbelstromscheiders konnte manuell mit einem Drehregler von 1,0 m/s bis 2,5 m/s umgestellt werden. Folgende Werte wurden untersucht:

- 1,0 m/s
- 1,5 m/s
- 2,0 m/s
- 2,5 m/s
- Polradgeschwindigkeit [rpm]:

Die Polradgeschwindigkeit in Umdrehungen pro Minute (Engl.: revolutions per minute, kurz: rpm) konnte manuell mit einem Drehregler von 600 rpm bis 2610 rpm verstellt werden.

Folgende Werte wurden untersucht:

- 800 rpm
- 1.600 rpm
- 2.400 rpm
- Polradposition:

Bei der Polradposition gab es verschiedene Löcher, in die der Positionszapfen gesteckt werden konnte. Aufgrund der Praxiserfahrung von Stadler sind nur die ersten vier Löcher relevant. Folgende Werte wurden untersucht:

- Lochposition 1 → Winkel: 0 °
- Lochposition 2 → Winkel: 6 °
- Lochposition 3 → Winkel: 12 °
- Lochposition 4 → Winkel: 18 °

In Abbildung 28 sind der Aufbau des Polrades und die möglichen Positionen zu erkennen.



- a) ... Motor
- b) ... Positionszapfen
- c) ... Loch für Positionierung Zapfen
- d) ... Förderband
- e) ... Polrad

Abbildung 28: Einstellmöglichkeiten Polrad (aktuelle Lochposition mit Winkel 0°).

- Trennscheitelwinkel:

Der Winkel des Trennscheitels kann durch Verstellen des Trennblechs auf den sechs unterschiedlichen Hauptpositionen geändert werden (siehe Abbildung 29: 4L – 4R). Außerdem gibt es noch fünf Zwischenpositionen. Vom Hersteller wurden die Positionen mit unterschiedlicher Anzahl von Löchern markiert, daran angelehnt wurden die Einstellungsvarianten benannt (L für links und R für rechts). Somit ergeben sich folgende Positionen des Trennscheitels:

- 4 L
- 3 L
- 2 L
- 2 R
- 3 R
- 4 R



Abbildung 29: Einstellmöglichkeiten Trennscheitelwinkel (gewählte Position 2L).

- Trennscheitelposition:

Zum Verstellen der Trennscheitelposition gab es fünf verschiedene Kerben (siehe Abbildung 30: Positionen 1 – 5). Nach Rücksprache mit Stadler wurde sich für die dritte Kerbe entschieden und nicht variiert, da sich dieser Versuchsparameter für eine automatische Prozesssteuerung nicht eignet.

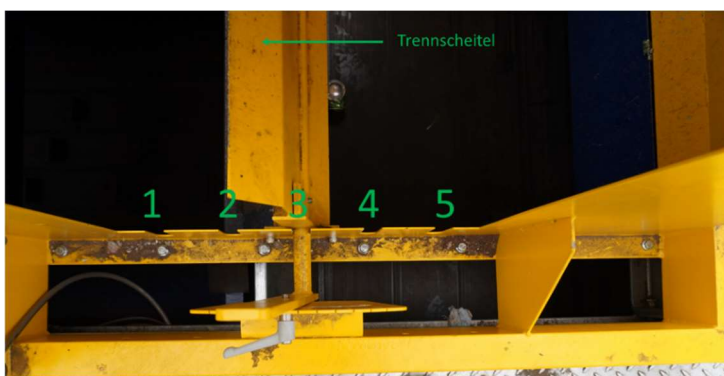


Abbildung 30: Einstellmöglichkeiten Kerben (gewählte Position 3).

Allgemeiner Aufbau

In Abbildung 31 ist ein vereinfachtes Fließbild jener Aggregate des Technikums, welche bei den Vorversuchen durchlaufen wurden, zu sehen. Während der Vorversuche waren nur Wirbelstromscheider und Schneckenförderer in Betrieb. Es stand bei den Vorversuchen noch kein Metallsensor zur Verfügung und die Auswertung erfolgte nur anhand der Bewertung der Videos der Videokamera.

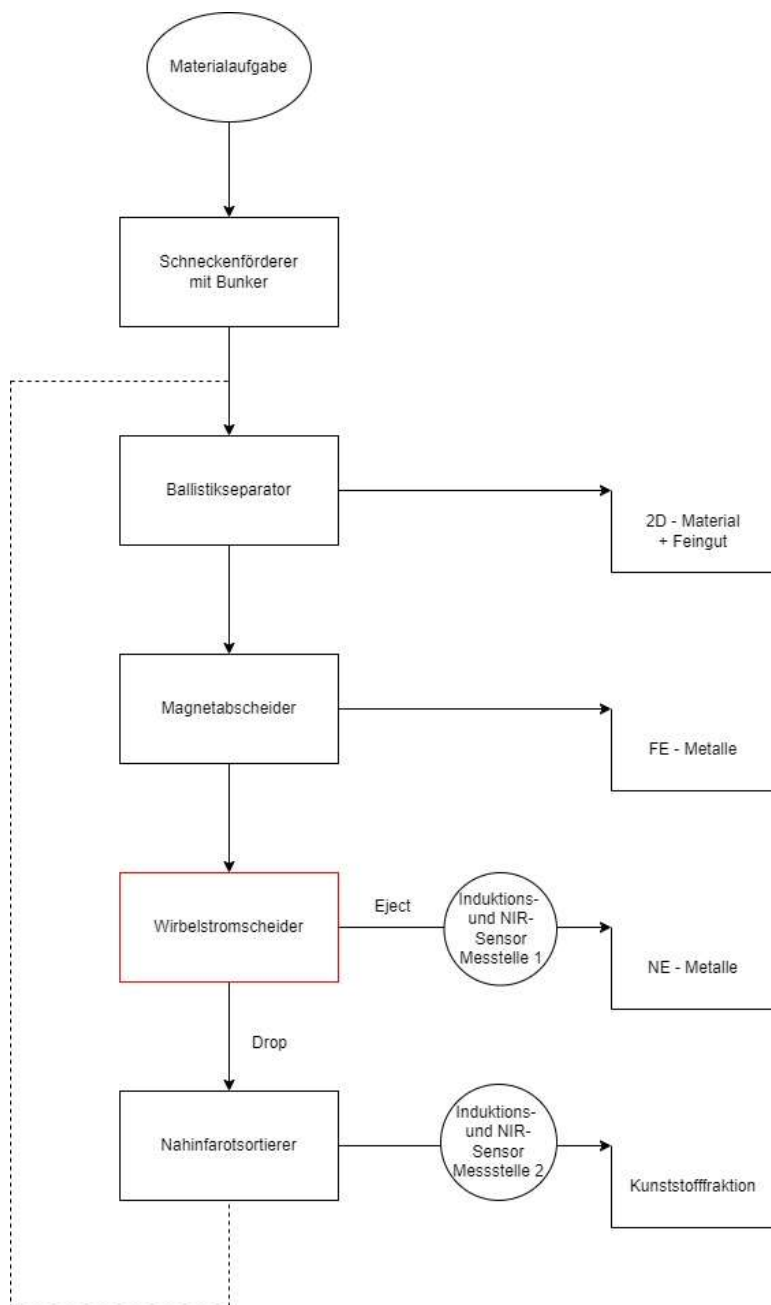


Abbildung 31: Fließbild des Stadler Technikum in Krsko.

Um die Ergebnisse des Sortiervorgangs bewerten zu können, wurde eine Videokamera auf einem Stativ so positioniert, dass in ihrem Aufnahmefeld der Trennvorgang abgebildet war (siehe Abbildung 32). Hierzu musste die seitliche Abdeckplatte des Gehäuses des Wirbelstromscheiders abmontiert werden.



Abbildung 32: Versuchsaufbau Videokamera auf Trennscheitel gerichtet.

3.2.3 Durchführung

Die Probe wurde mit einem Gabelstapler in einem Bunker aufgegeben. Sobald die Förderschnecke in Betrieb genommen wurde, durchlief das Material das Technikum. Das Eject-Material des Wirbelstromscheiders wurde mit einem Big Bag aufgefangen und mit dem Gabelstapler bei der nächsten Versuchsreihe wieder aufgegeben. Das nicht ausgeschleuste Material wurde bei den Vorversuchen im Technikum mit einem zusätzlichen Förderband bis zu der nächsten Versuchsreihe im Kreislauf (siehe Abbildung 31) geführt.

Es wurde zunächst mit jedem reinem Kunststoffmaterial (also für PET, für PE und für PP/PS-Mischung) getrennt der Trennscheitelwinkel in seiner Hauptposition verstellt und während der Durchläufe zusätzlich der Versuchsparameter Bandgeschwindigkeit alle 10 bis 20 Sekunden geändert. Während der Versuche wurde das Trennverhalten mit der Kamera gefilmt. Bei den Kunststoffproben mussten die Versuchsparameter, Polradgeschwindigkeit und Polradposition, welche nur eine Auswirkung auf Metalle haben, nicht verändert werden. Somit ergaben sich für die Kunststoffproben jeweils 24 verschiedenen Kombinationen (sechs Trennscheitelwinkel und vier Bandgeschwindigkeiten).

Bei den Nichteisenmetallproben wurden zusätzlich die Versuchsparameter Polradgeschwindigkeit und Polradposition variiert. Der Ablauf war derselbe wie bei den Kunststoffproben mit dem Unterschied, dass die Durchgänge aufgrund des zusätzlichen Wechsels der Polradgeschwindigkeit alle 10 bis 20 Sekunden und den daraus resultierenden gestiegenen Versuchsparameterkombinationen, länger dauerten. Für die Untersuchung der Veränderung der Polradposition mussten auch mehr Durchläufe durchgeführt werden, da dies nicht im laufenden Betrieb durchgeführt werden kann. Somit ergaben sich für NE-Metalle 288 verschiedenen Versuchsparameterkombinationen (vier Lochpositionen, sechs Trennscheitelwinkel, vier Bandgeschwindigkeiten und drei Polradgeschwindigkeiten), welche durchgeführt wurden.

Bei der Versuchsdurchführung mit der Mischprobe aus allen Fraktionen wurden dieselben Versuchsparameter wie bei den Nichteisenmetallproben verändert, mit Ausnahme der

Polradposition, welche auf Position 1 belassen wurde, da dies laut Stadler in der Praxis am häufigsten verwendet wird.

Die Auflistung aller Versuchsreihen mit den jeweiligen gewählten Versuchsparametern kann dem Anhang entnommen werden.

3.2.4 Versuchsauswertung

Die Videos der Versuchsreihen wurden anschließend angeschaut und das Trennergebnis bewertet. Hierfür wurde für die Kunststoffe eine Bewertungsskala von eins bis vier eingeführt, wobei eins „alles landet im Drop“ und vier „alles landet im Eject“ bedeutet. Das resultiert daraus, dass bei einer idealen Trennung keine Kunststoffe ins Eject gelangen würden. Diese qualitative Beurteilung wurde von drei Personen unabhängig voneinander durchgeführt und die Ergebnisse diskutiert, um eine gemeinsame Einschätzung zu erzielen. Für die Versuchsreihen mit NE-Metallen wurde für die weitere Berechnung die Skala gedreht, wodurch eins „alles im Eject“ und vier „alles im Drop“ bedeutet. Auch hier repräsentiert eins somit eine ideale Trennung, bei der alle NE-Metalle im Eject ausgetragen werden. Bei der Mischfraktion wurde für Kunststoffe und Nichteisenmetalle eine separate Bewertung der gleichen Videos durchgeführt. Abschließend wurden, um eine bessere Vergleichbarkeit zwischen der Mischfraktion und den reinen Fraktionen zu bekommen, die Werte der reinen Kunststofffraktionen gemittelt und mit dem Wert der Metallfraktion addiert.

Zur Veranschaulichung der Ergebnisse der Bewertung wurde in Excel eine Tabelle mit Farbskalenbewertung erstellt.

Zur Quantifizierung der Auswirkungen der Versuchsparameter wurden mit der Statistiksoftware Minitab verschiedene Diagramme, welche die Zusammenhänge zwischen den Versuchsparametern darstellen, erstellt.

3.3 Hauptversuche

Ziel der Hauptversuchsreihe war es zu untersuchen, ob es möglich ist mithilfe der Metallsensoren die besten Einstellungen für den Wirbelstromscheider zu finden, um beurteilen zu können, ob im laufenden Betrieb eine Aggregatsteuerung möglich ist. Das Ziel von SBPC ist, in diesem Kontext ein maximales Ausbringen bei hoher Reinheit zu gewährleisten. Ein weiteres Ziel ist es, das Verhalten der Pouches zu beobachten und zu analysieren.

Ein weiteres Ziel war es die Auswirkung der Positionierung des Materials am Förderband zu untersuchen, um gegebenenfalls Herausforderungen für die Anwendung von SBPC in der Praxis ableiten zu können.

Die Versuche wurden, wie schon die Vorversuche zum Wirbelstromscheider, im Stadler Anlagenbau GmbH Technikum in Krsko (Slowenien) durchgeführt. Das Technikum ist komplett mit einer Planenkonstruktion umhüllt. Die Hauptversuche wurden im Hochsommer durchgeführt und im Technikum entstand enorme Hitze, ein Einfluss auf die Ergebnisse kann daher nicht ausgeschlossen werden.

3.3.1 Probenmaterial

Die Hauptversuche wurden mit zwei verschiedenen Inputzusammensetzungen durchgeführt. Die erste Zusammensetzung wurde manuell aus Reinfractionen erstellt und ähnelt der Zusammensetzung des Stromes vor einem Wirbelstromscheider einer LVP-Anlage in Deutschland. Aufgrund des PET-Pfandes und der gemeinsamen Sammlung wird in Zukunft der Stoffstrom aus Österreich dem jetzigen aus Deutschland ähneln und somit ist keine eigene Mischung für Österreich notwendig. Die zweite Zusammensetzung repräsentiert den realen Stoffstrom vor dem Wirbelstromscheidern einer LVP-Anlage in Slowenien.

Mischung Deutschland

Die Mischung entspricht der Zusammensetzung in einer LVP-Anlage in Deutschland (DE). Da in modernen LVP-Anlagen GVK vor dem Wirbelstromscheider ausgeschleust wird, wurde es nicht berücksichtigt. Ebenso wurden andere Materialien, wie Folien oder Feingut, nicht berücksichtigt. Die genaue Zusammensetzung der Mischung ist Tabelle 9 zu entnehmen.

Tabelle 9: Inputzusammensetzung Mischung DE.

Fraktion	Gewicht [kg]	Anteil [%]
PET	6,84	12,44%
PE	7,60	13,82%
PP + PS	20,51	37,29%
NE-Metalle	18,23	33,15%
Pouch	1,82	3,31%
Summe	55,00	100,00%

Die Mischung wurde aus den Materialreinfractionen aus den Vorversuchen (siehe 3.2.1) durch Einwaage zusammengestellt. Zusätzlich wurde noch Pouch-Material (siehe Abbildung 33) einer LVP-Anlage aus Gent (Belgien) verwendet, da dieses Material in der slowenischen Anlage nicht abgetrennt werden konnte. Die fertige Mischung DE kann man in Abbildung 33 erkennen.



Abbildung 33: Links: Pouch-Input; rechts: Zusammensetzung Mischung DE.

Mischung Slowenien

Die Mischung Slowenien (SVN) wurde als Probe in einer slowenischen LVP-Anlage durch das dort beschäftigte Personal entnommen und für die Versuche bereitgestellt. In Abbildung 34 ist ein vereinfachtes Fließbild der Anlage zu sehen. Außerdem sieht man, dass die Probe genau vor dem Magnet- und Wirbelstromscheider entnommen wurde. Eine Entnahme unmittelbar vor dem Wirbelstromscheider war aus sicherheitstechnischen Gründen nicht möglich.

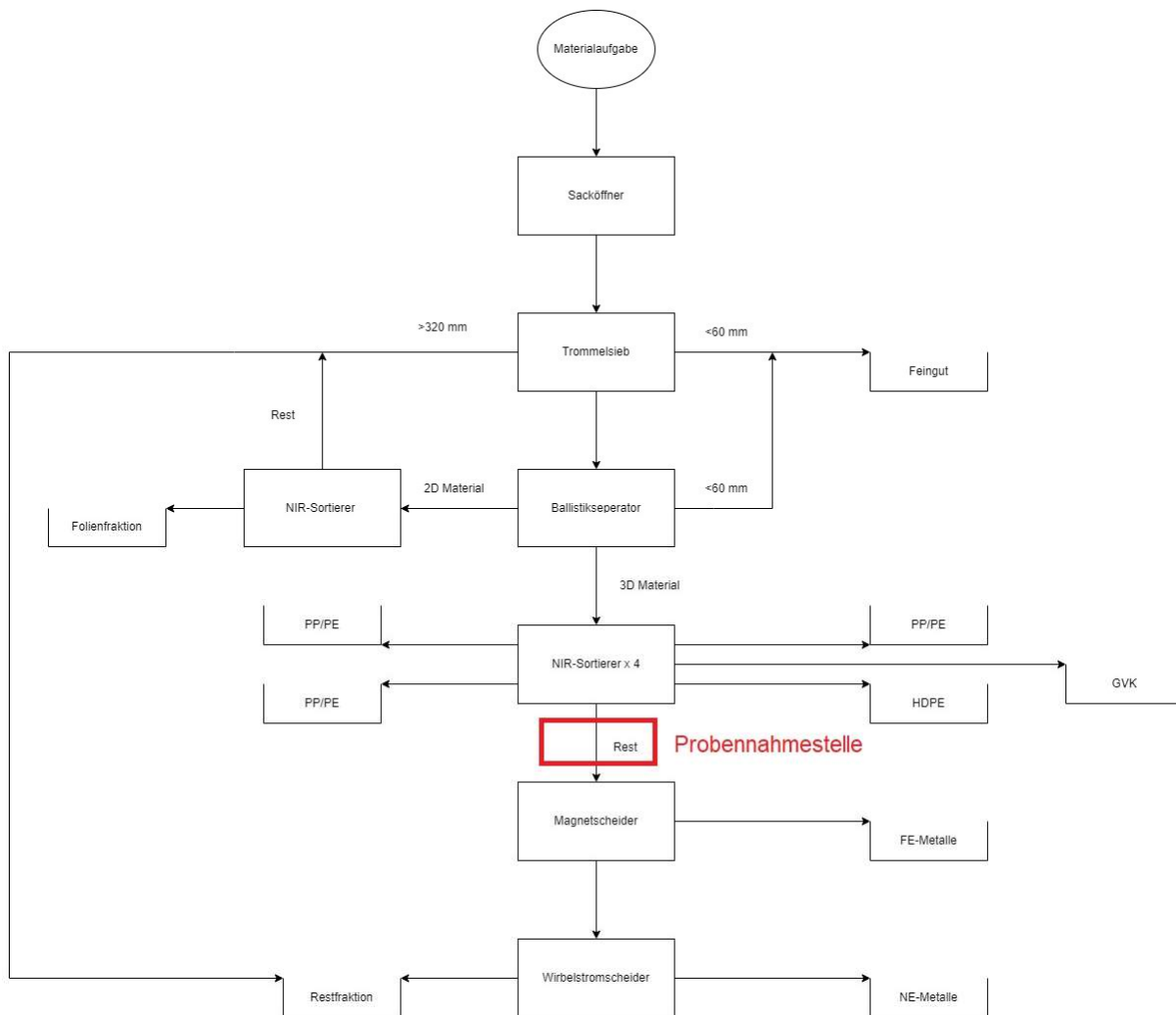


Abbildung 34: Vereinfachtes Fließbild der slowenischen LVP-Anlage; Probenahmestelle rot markiert.

Das Material wurde daher vor den Versuchen mehrfach im Kreislauf durch die gesamte Technikumsanlage geführt, um mittels Magnetscheider die Eisenmetalle abzutrennen, da diese in einer realen Anlage unmittelbar vor dem Wirbelstromscheider nicht mehr vorhanden sind. Außerdem wurde die Feinfraktion abgetrennt, um konstante Versuchsbedingungen sicherzustellen. Die Feinfraktion wäre sonst kontinuierlich über die Versuchsreihen hinweg im ballistischen Separator abgetrennt worden oder an Übergabestellen zurückgeblieben. Anschließend wurde mit dem Material eine Handsortierung durchgeführt, um die Materialzusammensetzung festzustellen. Die Ergebnisse sind in Tabelle 10 zu sehen. Die finale Zusammensetzung der Mischung SVN erkennt man in Abbildung 35.

Tabelle 10: Inputzusammensetzung Mischung SVN.

Fraktion	Gewicht [kg]	Anteil [%]
PET	5,97	11,27%
PE	3,51	6,63%
PE Folie	9,86	18,61%
PP + PS	3,64	6,87%
PP + PS Folie	1,09	2,06%
andere Folien	2,06	3,89%
GVK	6,19	11,69%
NE-Metalle	9,20	17,37%
Pouch	0,28	0,53%
PPK	5,13	9,68%
Holz	0,44	0,83%
Rest	4,96	9,36%
NE Tüten	0,64	1,21%
Summe	52,97	100,00%



Abbildung 35: Zusammensetzung Mischung SVN.

3.3.2 Versuchsaufbau

Bei der Hauptversuchsreihe wurden die Elemente der Vorversuche kombiniert verwendet:

- ABAS-Metallsensor (genauere Beschreibung siehe 3.1.2)
- Wirbelstromscheider (genauere Beschreibung siehe 3.2.2)

Aufbau allgemein

Das vereinfachte Fließbild jener Aggregate des Technikums, welche bei den Hauptversuchen durchlaufen wurden, gleicht jenem der Vorversuche (siehe 3.2.2). Aufgrund der Inputzusammensetzung und Aufgabenstellung war nur der Wirbelstromscheider in Vollbetrieb. Die Sortierfunktion des Nahinfrarotsortierer war inaktiv. Zum besseren Überblick ist in Abbildung 36 und Abbildung 37 der genaue Aufbau des Stadler Anlagen GmbH Technikum in Krsko zu sehen.

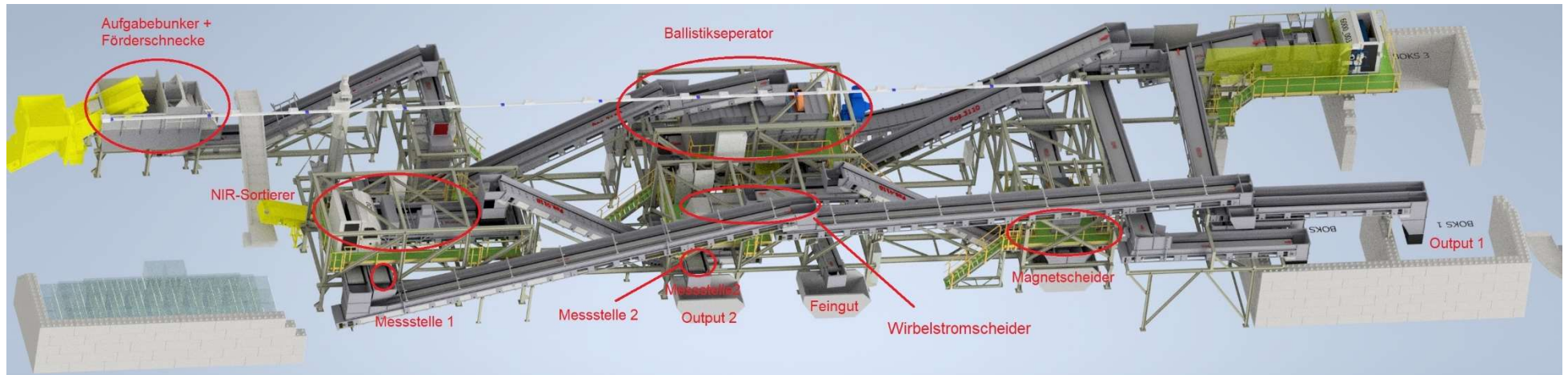


Abbildung 36: 3D-Ansicht Stadler Technikum.

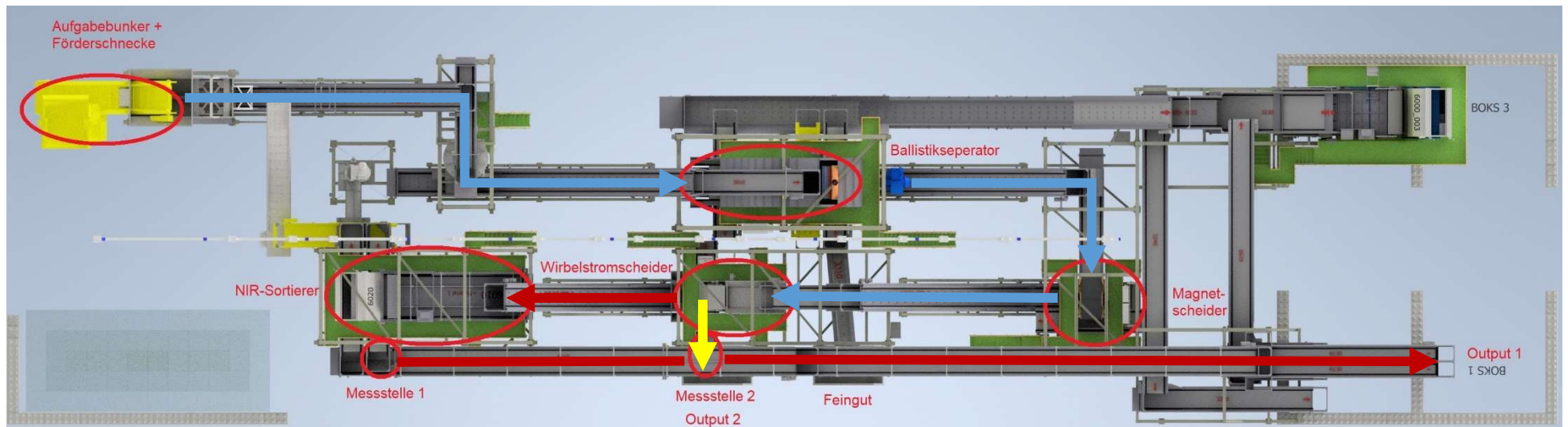


Abbildung 37: Draufsicht Stadler Technikum. blau: Inputstrom, gelb: Eject-Strom, rot: Drop-Strom.

Aufbau Videokamera

Um die Ergebnisse des Sortiervorgangs im Nachhinein zusätzlich zur Sensorik auch optisch bewerten zu können, wurde eine Videokamera oberhalb des Aggregats mit einer Schiene so montiert, dass in ihrem Aufnahmefeld der Trennvorgang abgebildet war (siehe Abbildung 38 rote Markierung). Es wurde im Vergleich zu den Vorversuchen eine andere Position der Kamera gewählt, da durch den neuen Winkel der Trennprozess besser abgebildet ist.



Abbildung 38: Versuchsaufbau Videokamera.

Aufbau Sensorik

An den Messtellen 1 und 2 (vgl. Abbildung 37) wurden jeweils ein NIR- und ein Metallsensor installiert. In Abbildung 39 und Abbildung 40 sieht man den Aufbau an Messtelle 2. Der Aufbau an Messtelle 1 war ident. Beim Metallsensor war darauf zu achten, dass der Abstand zum Förderband so gering wie möglich und höchstens 7 mm ist, da das Signal sonst zu schwach wird und keine Detektion erfolgt. Der im Aufbau erkennbare NIR-Sensor wurde bei den Versuchen zwar verwendet, die Daten sind für die präsentierten Ergebnisse allerdings irrelevant.

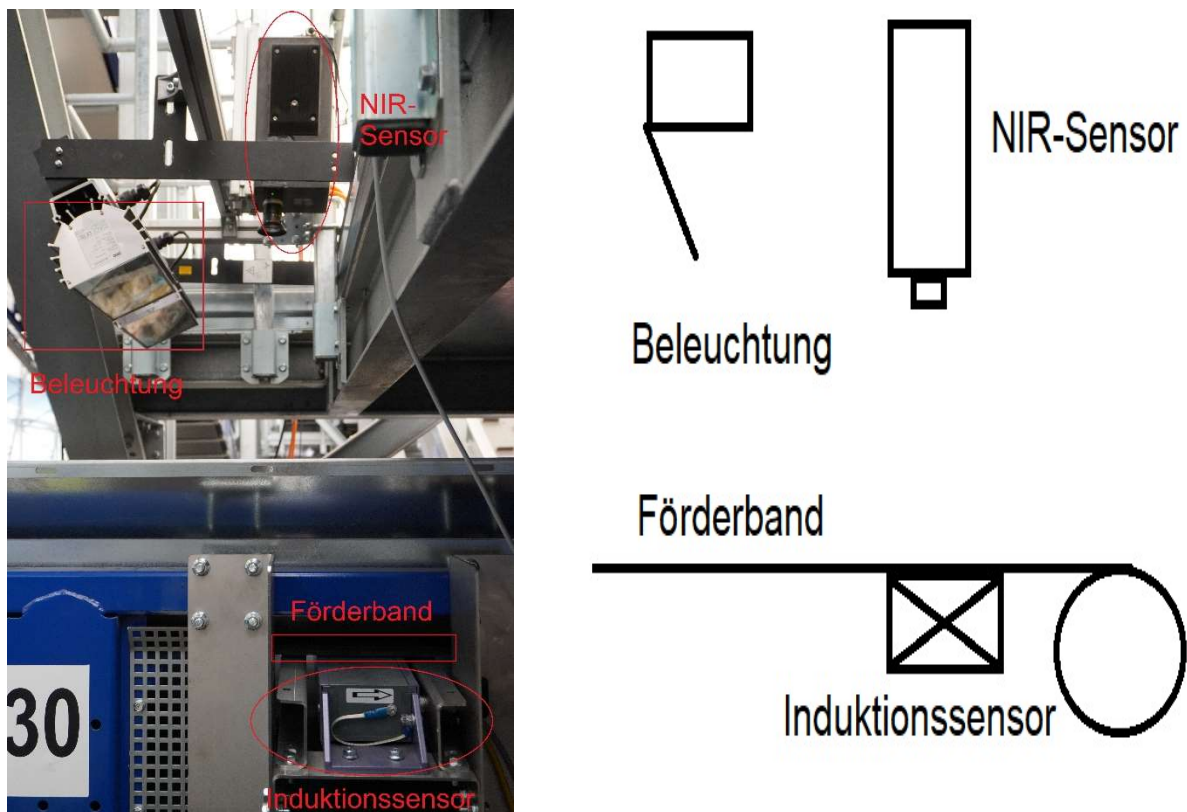


Abbildung 39: Links: Aufbau Sensoren Messstelle 2– Seitenansicht; rechts: Schematischer Aufbau.

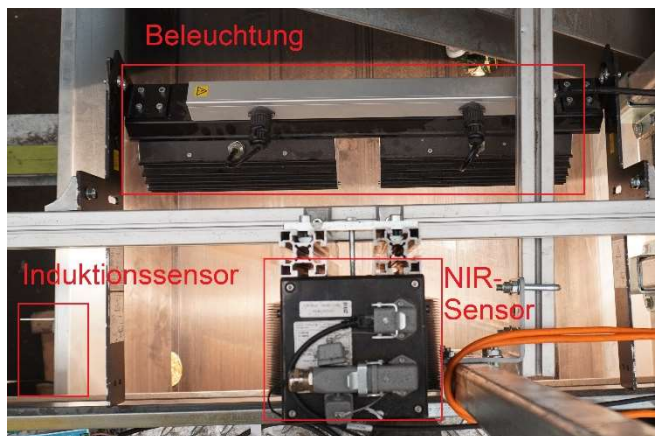


Abbildung 40: Aufbau Sensoren Messstelle 2 - Draufsicht.

3.3.3 Durchführung

Zu Beginn wurde eine Kalibrierung der Metallsensoren durchgeführt, gefolgt von Tests zur Erkennung der Objekte bei unterschiedlichen Positionen am Band. Anschließend wurden die Hauptversuche mit den beiden Materialmischungen durchgeführt.

Sensorkalibrierung Metallsensor

Wie auch bei den Vorversuchen wurden Threshold und die minimale Objektgröße variiert, um die geeigneten Einstellungen bei realer Einbausituation beurteilen zu können.

Es wurde eine Parametrisierung der beiden Sensoren durchgeführt, bei welcher es folgende drei Varianten der veränderbaren Sensorparameter gab:

- Threshold: 1.000; minimale Objektgröße: 2.
- Threshold: 1.000; minimale Objektgröße: 5.
- Threshold: 10.000; minimale Objektgröße: 2.

Die bei der Kalibration verwendeten Objekte sind in Abbildung 41 ersichtlich.



Abbildung 41: Objekte für die Kalibration der beiden Metallsensoren.

Durch diese Kalibration und die Ergebnisse der Vorversuche mit den Metallsensoren wurde sich für einen möglichst niedrigen Threshold und eine möglichst niedrige minimale Objektgröße entschieden. In nachfolgender Tabelle 11 sieht man die genauen Einstellungen der Sensorparameter, welche bei den Versuchen für den Metallsensor verwendet wurden.

Tabelle 11: Einstellungen Parameter Metallsensor für Hauptversuche.

Zielgeschwindigkeit [mm/s]	1.000
Delay Time [ms]	100
Threshold []	1.000
Minimale Objektgröße [-]	2
Blow Out Time [ms]	5
Mirror Channels	Standard
Sensor Flip	Standard
Channelshift	0

Pixelgewicht

Zur besseren Vergleichbarkeit der Ergebnisse von massenbasierter Handsortierung und pixelbasiertem Stoffstrommonitoring wurden Versuche zum Pixelgewicht durchgeführt. Es wurden dafür von der Mischung SVN von jeder Fraktion, welche einen Metallanteil besitzt, etwa zehn Partikel (siehe Abbildung 42) ausgewählt, welche die Fraktion gut repräsentieren sollen. Das Pixelgewicht ergibt sich aus dem Verhältnis der jeweiligen Massen der Partikel und der detektierten Pixel. Die ausgewählten Partikel für Chipsverpackungen wurden schlussendlich ausgeschlossen, da diese von den Sensoren aufgrund des sehr geringen Aluminiumgehaltes meistens gar nicht oder nur sehr schlecht erkannt wurden.



Abbildung 42: Ausgewählte Partikel für die Bestimmung des Pixelgewichtes: (1) GVK, (2) Kaffeeverpackungen, (3) Pouch und (4) NE-Metalle.

Analyse Reliabilität der Sensoren

Außerdem wurde eine Bewertung der Reliabilität der beiden Metallsensoren durchgeführt. Diese Bewertung wurde für dieselben Proben durchgeführt wie auch die Pixelgewichtersuche. Hier wurde zum einen untersucht, ob die Partikel an beiden Sensoren bei jeweils gleicher Position am Band gleich gut erfasst werden. Zum anderen wurde überprüft, wie sich eine unterschiedliche Aufgabeposition am Band auf das Pixelgewicht auswirkt. Hierfür wurden die Proben bei beiden Messstellen jeweils fünfmal an der gleichen Position am Förderband aufgegeben (Gewählte Positionierungen siehe Abbildung 43).



Position 1: „Mitte“

Position 2: „Links“

Position 3: „Mitte links“

Position 4: „Mitte Rechts“

Position 5: „Rechts“

Abbildung 43: Unterschiedliche Positionierung der Partikel am Band.

Versuchsdurchführung Hauptversuche

Das Material wurde vor jedem Versuchsdurchlauf mit dem Gabelstapler in die Förderschnecke aufgegeben. Das Eject-Material des Wirbelstromscheiders wurde mit einem Big Bag und das Drop-Material mit der Schaufel des Gabelstaplerstaplers direkt bei den Ausgabepunkten (vgl. Abbildung 36 und Abbildung 37) gesammelt.

Es wurden nach jedem Versuch die Versuchsparameter Bandgeschwindigkeit und Polradgeschwindigkeit des Wirbelstromscheiders zu einer neuen Kombination umgestellt und alle Kombinationen für beide Materialmischungen durchgeführt. Somit ergaben sich insgesamt

24 Versuchsreihen (zwei Mischungen, vier Bandgeschwindigkeiten und drei Polradgeschwindigkeiten), wobei eine 25. Versuchsreihe durchgeführt wurde, da bei Versuch 15 der Sensor nicht aufgezeichnet hat. In nachfolgender Abbildung 44 werden die Versuchsparametereinstellungen des Wirbelstromscheider dargestellt.

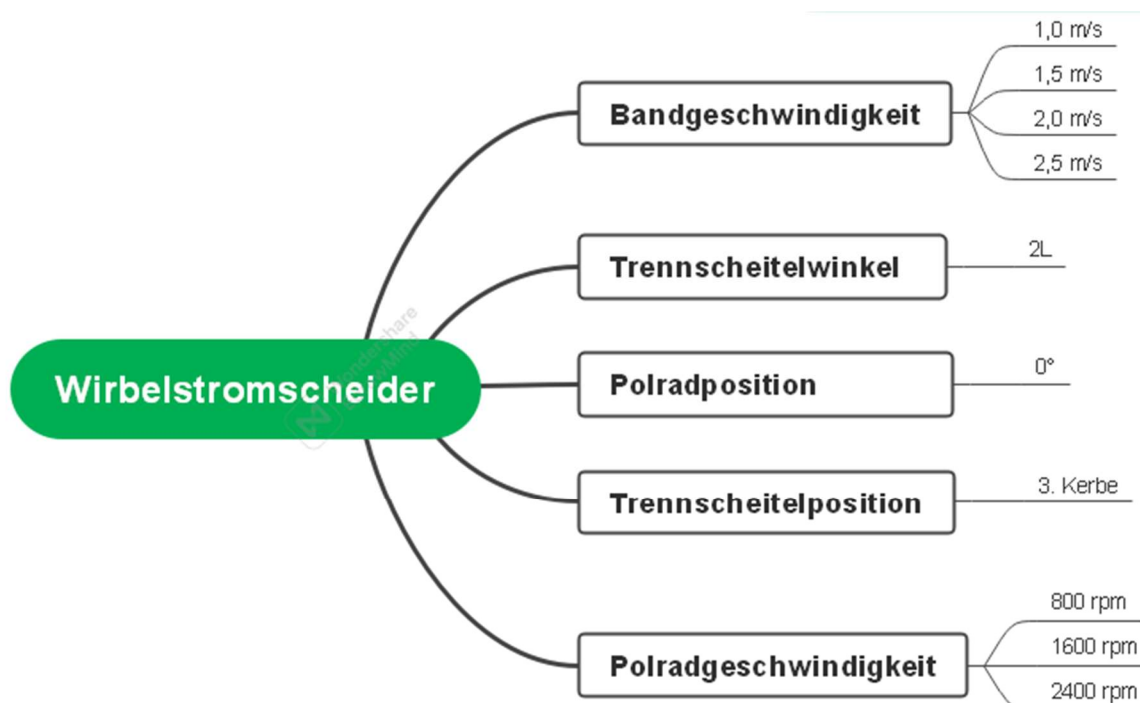


Abbildung 44: Entscheidungsbaum Versuchsparameter Hauptversuche.

Die Steuerung der Versuchsparameter Trennscheitelwinkel, Trennscheitelposition und Polradposition ist im laufenden Betrieb schwieriger umsetzbar als die Steuerung der Band- und Polradgeschwindigkeit.

Die statistische Versuchsauswertung der Vorversuche mit dem Wirbelstromscheider hat ergeben, dass nur ein Trennscheitelwinkel bei den Hauptversuchen verwendet werden soll, welcher 2L (siehe 3.2.2 Abbildung 29) ist. Ausschlaggebend hierfür war, dass es bei dieser Stellung in Kombination mit der Variation der anderen Versuchsparameter sowohl gute als auch schlechte Ergebnisse für Ausbringen bzw. Reinheit gab und somit die Eignung der Sensorik, die Qualitäten zu überwachen, bei dieser Einstellung am besten überprüft werden kann.

Nach Rücksprache mit Stadler wurde bei der Trennscheitelposition die dritte Kerbe (siehe 3.2.2 Abbildung 30) gewählt und aufgrund dieser Einschätzung im Zuge der Versuchsreihe nicht näher untersucht.

Die statistische Versuchsauswertung der Vorversuche mit dem Wirbelstromscheider hat ergeben, dass die Polradposition keinen relevanten Einfluss auf die Ergebnisse hat.

Nach jedem Durchlauf wurden sowohl der Eject-, als auch der Drop-Strom handsortiert und die resultierenden Sortierfraktionen gewogen. Folgende Fraktionen wurden sortiert: Kunststoffe, NE-Metalle, Pouch, GVK, Chipsverpackungen, Kaffeeverpackungen und Rest (vgl. Abbildung 45).



Abbildung 45: Sortierfraktion der Handsortierung: (1) Kunststoffe, (2) NE-Metalle, (3) Pouch, (4), GVK (5), Chipsverpackungen, (6) Kaffeeverpackungen und (7) Rest.

Bandbelegung

Die Bandbelegung der Output-Bänder, an welchen die Sensoren installiert wurden, schwankte während den verschiedenen Versuchsparametereinstellungen, da unterschiedlich viel Material durch den Wirbelstromscheider ausgetragen wurde. Abbildung 46 zeigt eine beispielhafte Bandbelegung der Mischung DE. Dabei ist exemplarisch dargestellt, dass das Material nicht vollkommen vereinzelt vorliegt, es aber in der Regel nur zu geringer Überlagerung kommt.

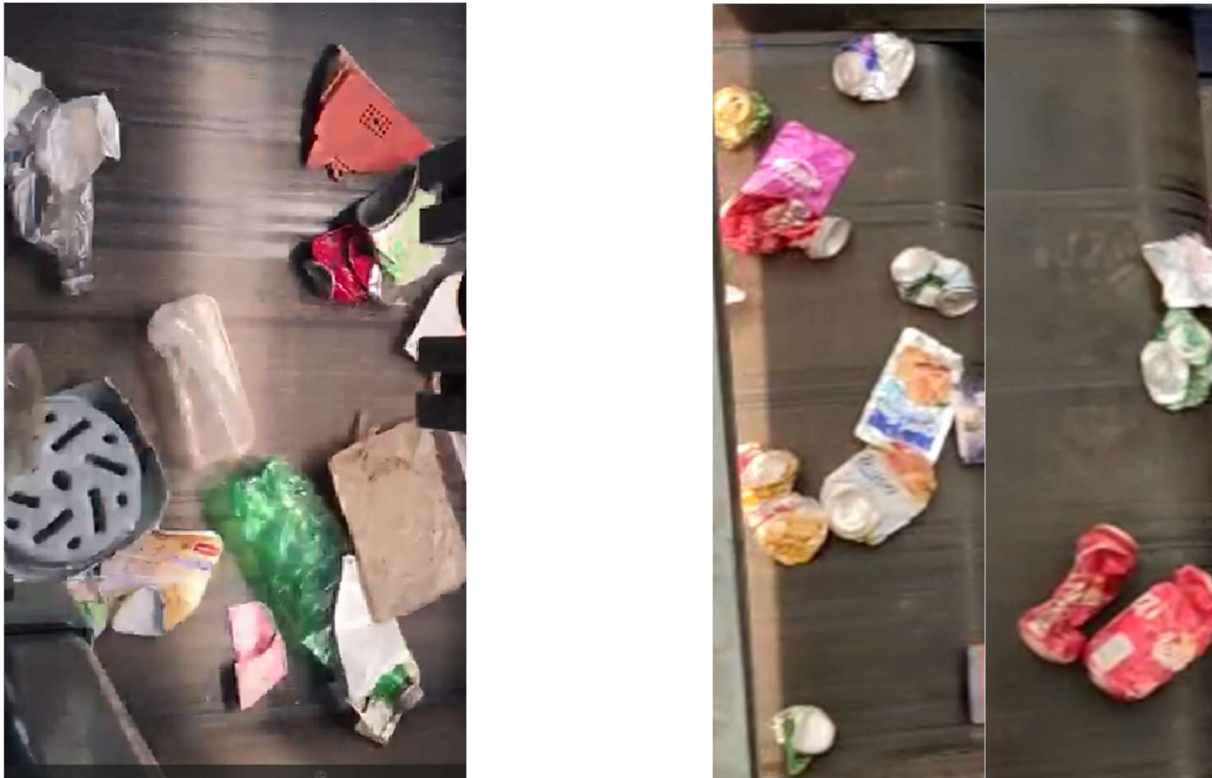


Abbildung 46: Bandbelegung Mischung DE: links: Messstelle 1; rechts: Messstelle 2.

3.3.4 Versuchsauswertung

Die Daten des Metallsensors wurden jeweils als Pixelwert ausgelesen und als csv-Dateien exportiert. Die Ergebnisse der Handsortierung wurden laufend dokumentiert und in einer Excel-Datei eingepflegt. Das Videomaterial des Trennerfolges des Wirbelstromscheiders wurde, wie schon in 3.2.4 beschrieben, in Minitab ausgewertet. Nachfolgend werden die Auswertungsschritte der verschiedenen Problemstellungen einzeln beschrieben.

Pixelgewicht

Zur Berechnung des Pixelgewicht wurde zunächst jedes Objekt der jeweiligen Fraktionen einzeln betrachtet. Als Erstes wurde mit der Anzahl der detektierten Pixel und dem gewogenen Gewicht des Objekts mit Formel (7) berechnet, wie viel ein Pixel an der jeweiligen Position am Band wiegt. Dies wurde dann für alle fünf Positionen („links“, „Mitte links“, „Mitte“, „Mitte rechts“ und „rechts“) gemacht.

$$m_{\text{Pixel}} = \frac{m}{\text{Pixel}} \quad (7)$$

m_{Pixel} ... Masse eines Pixels [g]

m ... Masse des Partikels [g]

Pixel ... Anzahl der detektierten Pixel [Anzahl]

Danach wurde in Formel (8) aus den Positionierungen am Band ein arithmetischer Mittelwert $m_{\text{Pixel, Mittel}}$ für jedes Partikel gebildet.

$$m_{\text{Pixel,Mittel}} = \frac{m_{\text{Pixel,links}} + m_{\text{Pixel,Mitte}_{\text{links}}} + m_{\text{Pixel,Mitte}} + m_{\text{Pixel,Mitte}_{\text{rechts}}} + m_{\text{Pixel,rechts}}}{5} \quad (8)$$

Mit diesen Werten wurde ein Punktdiagramm erstellt, in welchem eine Regressionsgerade gebildet wurde. Diese Gerade kann nun zum näherungsweise Umrechnen von Massen auf Pixel und umgekehrt verwendet werden, da sie sowohl den Einfluss der verschiedenen NE-Metalle als auch die unterschiedliche Detektion in Abhängigkeit von der Positionierung eines Partikels am Band beinhaltet.

Zusätzlich wurde mit denselben Werten der Partikel der verschiedenen Fraktionen ein arithmetisches Mittel je Fraktion (GVK, Pouch, NE-Metalle und Kaffeeverpackungen) $m_{\text{Pixel,Mittel,Fraktion}}$ in Formel (9) gebildet.

$$m_{\text{Pixel,Mittel,Fraktion}} = \frac{\sum_{i=1}^n m_{\text{Pixel,Mittel}}}{n} \quad (9)$$

n ... Anzahl der verschiedenen Materialien pro Fraktion

Als nächstes wurden, wie in Formel (10) dargestellt, die Massen der Handsortierung je Fraktion durch die entsprechenden Werte $m_{\text{Pixel,Mittel,Fraktion}}$ dividiert. Das Resultat waren die Pixel, die gemäß Handsortierung je Fraktion detektiert werden müssten.

$$\text{Pixel}_{\text{Handsortierung,Fraktion}} = \frac{m_{\text{Handsortierung,Fraktion}}}{m_{\text{Pixel,Mittel,Fraktion}}} \quad (10)$$

m_{Handsortierung,Fraktion} ... Masse der Fraktionen der Handsortierung [g]

Abschließend wurden die Werte der Fraktionen, wie in Formel (11) dargestellt, addiert.

$$\text{Pixel}_{\text{Handsortierung}} = \sum_{i=1}^n \text{Pixel}_{\text{Handsortierung,Fraktion}} \quad (11)$$

Diese Werte können nun mit den vorhergesagten Werten der Regressionsgeraden verglichen werden.

Analyse Reliabilität der Sensoren

Mit den unverarbeiteten Pixelwerten der Sensoren wurden wie in 3.1.4 erläutert Boxplots mit Excel und Violinen Plots mit Origin erstellt. Es wurden für jedes Partikel der Maximalwert der detektierten Pixel an der jeweiligen Stelle am Band ermittelt. Dann wurde für alle Partikel an den anderen Bandpositionen berechnet, wie groß die Abweichung vom Maximalwert ist. Die Verteilung wurde in Prozent vom Maximalwert in Liniendiagrammen in Excel veranschaulicht.

Potential des Stoffstrommonitorings

Anhand der Massen aus der Handsortierung wurde die prozentuale Verteilung der Metallfraktionen im Eject- und Drop-Strom für beide Mischungen berechnet. Somit erhält man wieviel Prozent eine Metallfraktion vom Gesamtmetall im Strom ausmacht. Die Berechnungen wurden mit Balkendiagrammen in Excel grafisch dargestellt.

Zusätzlich wurde auf Grundlage der Handsortierungsergebnisse der Pouchanteil im Eject und Drop der jeweiligen Versuchsreihen mit Diagrammen in Excel dargestellt.

Eine weitere Art der Interpretation der Ergebnisse der Handsortierung wurde mit Konfusionsmatrizen bzw. Kennzahlen, welche sich aus ihnen ergeben, durchgeführt. Eine Konfusionsmatrix ist dazu da, eine Klassifikation auszuwerten und neutral zu bewerten. In Abbildung 47 sieht man ein Beispiel für eine Konfusionsmatrix (Data Base Camp 2022).

		True Class	
		Positive	Negative
Predicted Class	Positive	True Positive (=TP)	False Positive (=FP)
	Negative	False Negative (=FN)	True Negative (=TN)

Abbildung 47: Beispielhafte Abbildung einer Konfusionsmatrix (Data Base Camp 2022).

Die Matrix setzt sich aus folgenden Fehlertypen zusammen und wird anhand der Bewertung der Handsortierung veranschaulicht (Kulkarni et al. 2020):

- **TP**: Der tatsächliche und der vorhergesagte Wert stimmen überein und es sind beide positiv. Dies sind die Metalle im Eject-Strom.
- **FP**: Der tatsächliche und der vorhergesagte Wert stimmen nicht überein. Der tatsächliche Wert ist negativ und wurde falsch vorhergesagt. Dies ist die Rest-Fraktion im Eject-Strom.
- **FN**: Der tatsächliche und der vorhergesagte Wert stimmen nicht überein. Der tatsächliche Wert ist positiv und wurde falsch vorhergesagt. Dies sind die Metalle im Drop-Strom.
- **TN**: Der tatsächliche und der vorhergesagte Wert stimmen überein und sind beide negativ. Dies ist die Rest-Fraktion im Drop-Strom.

Mit dieser Information wurde für jede Einstellungsvariation beider Mischungen eine Konfusionsmatrix erstellt, welche im Anhang zu finden sind.

Auf Basis der Konfusionsmatrix kann man mehrere Kennzahlen errechnen, die wichtigsten sind: (geekflare 2022):

- **True Positive Rate (=TPR)**:
Ist ein Maß für die korrekt positiven Ergebnisse, welche aus allen möglichen positiven Ergebnissen erkannt wurden. Sie wird auch Sensitivität genannt. Bei einem hohen TPR, ist die False Negative Rate gering, was gut ist, um keine Wertstoffe zu verlieren. In Formel (12) sieht man, wie die TPR berechnet wird.

$$TPR = \frac{TP}{TP + FN} \quad (12)$$

- **True Negative Rate (=TNR):**

Ist ein Maß für die korrekt negativen Ergebnisse, welche aus allen möglichen negativen Ergebnissen erkannt wurden. Bei einem hohen TNR, ist die False Positive Rate gering, was auf eine hohe Reinheit des Eject-Stromes hinweist. In Formel (13) sieht man wie die TNR berechnet wird.

$$TNR = \frac{TN}{TN + FP} \quad (13)$$

Mit diesen Kennzahlen wurden in Excel zum Vergleich Balkendiagramme erstellt.

Pouches

Es wurden die Auswirkungen der verschiedenen Band- und Polradgeschwindigkeiten des Wirbelstromscheiders auf die reine Pouch-Fraktion untersucht. Es wurden Videos gemacht, welche wie in 3.2.4 beschrieben bewertet wurden. Auf Basis dieser Beurteilung wurden in Minitab Grafiken erstellt.

Außerdem wurden die Ergebnisse der Handsortierung der Hauptversuche in Bezug auf Pouches genauer untersucht. Zu diesem Zweck wurden in Excel Diagramme erstellt, welche zeigen, wieviel Prozent der Pouches für alle Versuche jeweils im Eject oder Drop gelandet sind.

Stoffstrommonitoring

Mit den Pixelwerten wurden in Excel Balkendiagramme erstellt, um die Auswirkungen der Versuchsparameterumstellungen des Wirbelstromscheiders auf die erkannten Pixel darzustellen.

Es wurden zur besseren Darstellung der Wechselwirkungen der Versuchsparameter Diagramme in Minitab verwendet.

Außerdem wurde für beide Sensoren die Daten in Minitab eingegeben und Zeitreihendiagramme erstellt, welche einen zeitlichen Verlauf der Anzahl der detektierten Pixel je Versuchsreihe darstellen.

Validierung des Metallsensors fürs Stoffstrommonitoring

Zu Beginn wurde aus den Sensordaten der jeweilige prozentuelle Anteil an Metallen an beiden Messpunkten gemäß Formel (14) berechnet.

$$\text{Wertstoffausbringen}_{\text{Metallsensor},i} = \frac{\text{Pixel}_{\text{Metallsensor},i}}{\text{Pixel}_{\text{Metallsensor,gesamt}}} \quad (14)$$

Pixel_{Metallsensor,i} ... detektierte Pixel am jeweiligen Messpunkte [Anzahl]

Pixel_{Metallsensor,gesamt} ... Summe der detektierten Pixel an Messtelle 1 und 2 [Anzahl]

Zusätzlich wurden bei den Handsortierungsdaten die Metallfraktionen addiert und daraus der prozentuelle Anteil an Metallen an den beiden Messpunkten in Formel (15) berechnet.

$$\text{Wertstoffausbringen}_{\text{Handsortierung},i} = \frac{m_{\text{Handsortierung},i}}{m_{\text{Handsortierung,gesamt}}} \quad (15)$$

$m_{\text{Handsortierung},i}$... Metallmasse am jeweiligen Messpunkte [kg]

$m_{\text{Handsortierung,gesamt}}$... Summe der Metallmassen an Messtelle 1 und 2 [kg]

Diese beiden Werte wurden schlussendlich in Excel-Diagrammen miteinander verglichen, um die Eignung des Stoffstrommonitorings auf Basis der Metallsensoren zu bekommen.

Zusätzlich wurden die Werte der Handsortierung mit den Umrechnungsfaktoren der Pixelmassen in Pixel umgerechnet und mit dem detektierten Pixel der Metallsensoren grafisch verglichen.

4 Ergebnisse und Diskussion

Im nachfolgenden Kapitel werden zunächst die Ergebnisse und Erkenntnisse der Vorversuche zum Metallsensor, dann jene der Vorversuche zum Wirbelstromscheider und abschließend die der Hauptversuche dargestellt.

4.1 Vorversuche Metallsensor

In den Vorversuchen zum Metallsensor wurde untersucht, welche die optimalen Einstellungen der relevanten Sensorparameter sind. Die Auswertung wurde in Auswirkung der Sensoreinstellungen, Einfluss der Materialart und Einfluss der Partikel am Förderband gegliedert, welche jeweils nacheinander betrachtet werden.

Auswirkungen der Sensoreinstellungen

Wie in Kapitel 3.1.3 beschrieben wurden jeweils zwei Sensorparameter über vier Durchläufe verändert und die Auswirkung auf die Erkennung auf Pixel- und Objektebene untersucht. In Tabelle 12 sind die erkannten Objekte im Verhältnis zu der Anzahl der tatsächlich aufgegebenen Partikel („Objekte Soll“), sowie die durchschnittlich je Objekt detektierten Pixel abgebildet.

Tabelle 12: Einfluss verschiedener Sensoreinstellungen auf die Erkennung.

Durchlauf	min. Objektgröße	Threshold	Objekte Soll	erkannte Objekte	Anteil erkannte Objekte	erkannte Pixel	Pixel pro Objekt
1	2	1 000	195	180	92,31%	74 878	383,99
2	2	10 000	195	172	88,21%	26 292	134,83
3	10	10 000	195	140	71,79%	16 692	119,23
4	10	1 000	195	186	95,38%	67 157	361,06

Die erste Erkenntnis bei der qualitativen Analyse der Versuchsergebnisse war, dass das erste Partikel von GVK bei keiner Versuchsreihe detektiert wurde. Der Grund dafür war, dass es sich um eine Milchverpackung handelt, welche nicht mit Aluminium beschichtet ist. Somit wurden nur sieben der ursprünglich acht GVK-Objekte detektiert.

Bei Betrachtung der Anteile der erkannten Objekte aus Tabelle 12 sieht man, dass bei einem Threshold von 1.000 mit 95,43 % und 92,31 % prozentuell mehr erkannt wird als bei Threshold 10.000. Somit lässt sich die These aufstellen, dass die Erkennung bei geringerem Threshold grundsätzlich besser ist.

Das Material Pouch wurde ab dem dritten und vierten Durchlauf mitaufgegeben und wird in Tabelle 12 nicht berücksichtigt. Die Ergebnisse zeigen, dass bei gleichen Einstellungen im dritten Durchlauf alle Pouch-Objekte und im vierten Durchlauf 23 von 24 detektiert wurden. Somit sind die Ergebnisse besser als die durchschnittlichen der anderen Materialien.

Die Pixel pro Objekt aus Tabelle 12 unterstreichen ebenfalls, dass bei einem geringem Threshold bessere Ergebnisse erzielt werden. Außerdem lässt sich bei einer Differenz von

ungefähr 50 Pixel pro Objekt eine Tendenz erkennen, dass bei einer minimalen Objektgröße von 2 mehr Pixel erkannt werden als beim Grenzwert 10 bei jeweils gleichem Threshold-Wert.

In Abbildung 48 sind in Form von Boxplots mittlere Anzahl von detektierten Pixeln sowie die Schwankungsbreite der Pixelwerte dargestellt. Darin bestätigt sich, dass die Kombination Threshold 1.000 und minimale Objektgröße 2 zu einer höheren Anzahl von detektierten Pixeln führt. Außerdem sieht man in Abbildung 49, dass bei einer minimalen Objektgröße von 10 die Streuungsbreite mit durchschnittlich 88,3 (Mittelwert der beiden verwendeten Thresholds) geringer ist als bei einer minimalen Objektgröße von 2 mit durchschnittlich 164,63 (Mittelwert der beiden verwendeten Thresholds). Daraus lässt sich schließen, dass bei einer höheren minimalen Objektgröße die Streuungsbreite geringer ist.

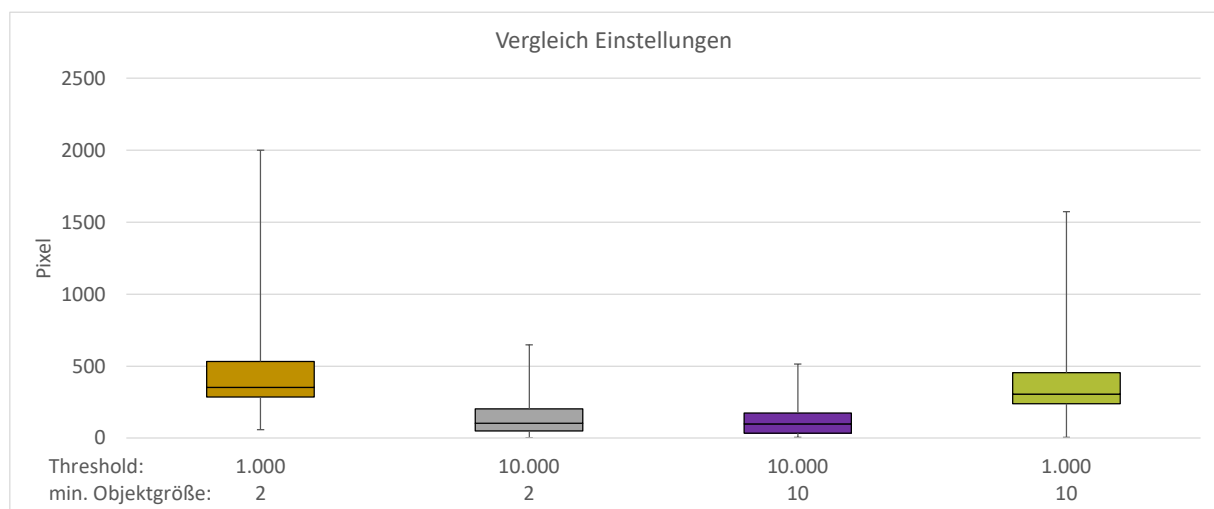


Abbildung 48: Vergleich der verschiedenen Einstellungen des Metallsensors (braun: 2-1.000; grau: 2-10.000, violett: 10-10.000, grün: 10-1.000).

Einfluss der Materialart

Wie in Kapitel 3.1.1 beschrieben, wurden vier verschiedenen Materialien für diese Versuche verwendet: GVK, Dosen, Pouches und Alufolie. In Abbildung 49 werden nun für alle Materialarten jeweils Violinen-Plots der detektierten Pixel, des Streumaßes und der Wahrscheinlichkeiten dargestellt, um den Einfluss der Materialart auf die Erkennung zu quantifizieren.

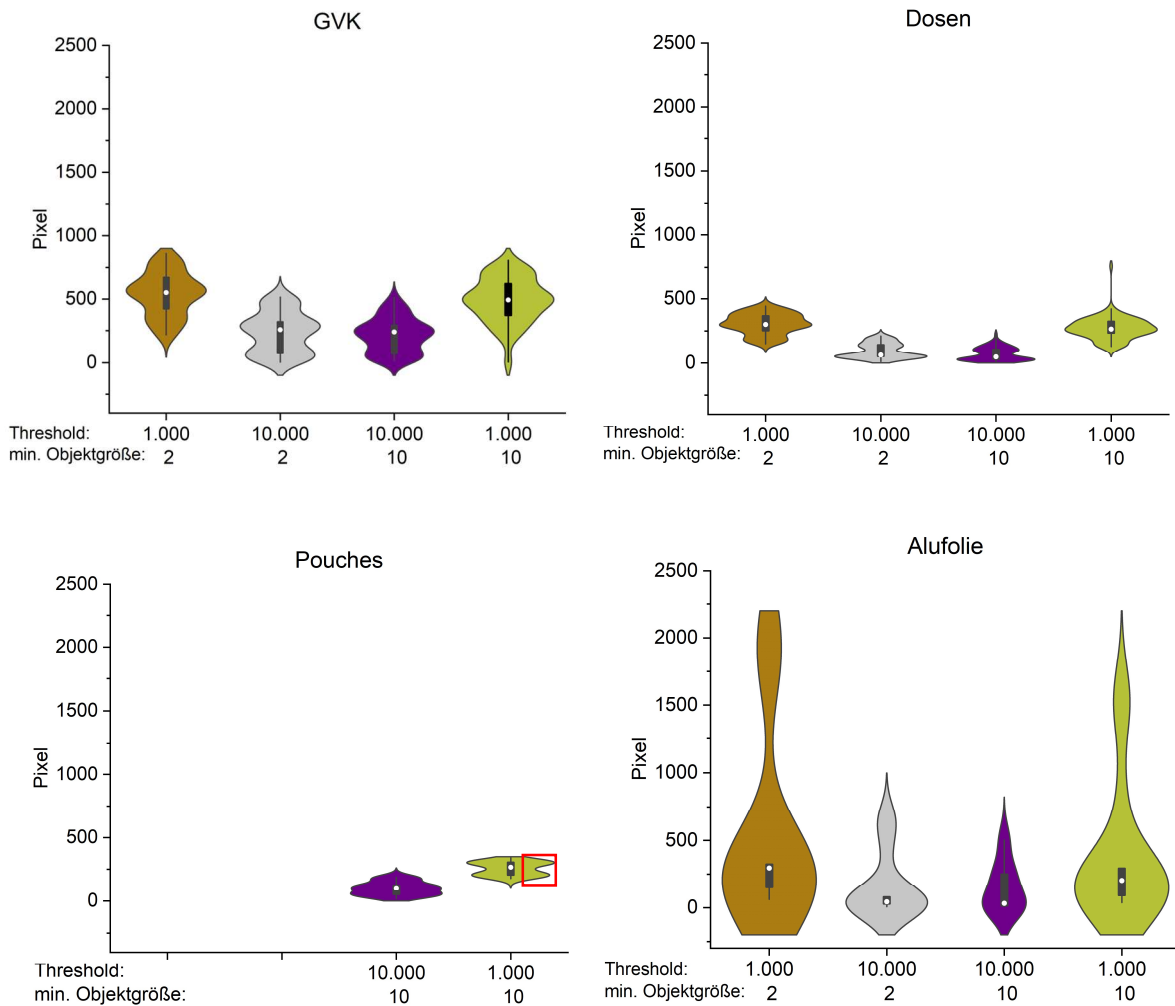


Abbildung 49: Vergleich der verschiedenen Materialien mit verschiedenen Sensoreinstellungen (braun: 2-1.000; grau: 2-10.000, violett: 10-10.000, grün: 10-1.000).

Aus Abbildung 49 kann herausgelesen werden, dass bei jeder Materialart annähernd gleich viele Pixel erkannt wurden, nur bei GVK liegt der Medianwert (weißer Punkt im Boxplot) erkennbar höher als bei den anderen Materialarten. Außerdem sticht Alufolie mit einem hohen Maximalwert heraus, was auf die flächige Form von einem Aufgabeobjekt zurückzuführen ist. Noch dazu fällt auf, dass bei den Pouch- und Dosen-Materialien aufgrund der ähnlichen Versuchsobjekte die Schwankungsbreite am geringsten ist.

Es sind in Abbildung 49 bei jeder Materialart höhere Eintrittswahrscheinlichkeiten im Bereich der Boxen, bzw. des Medians, zu erkennen. Bei den Pouches ist ein Knick (siehe Markierung in Abbildung 49) im Bereich des Medians bei den Wahrscheinlichkeitsdichtekurven auffällig, welcher bei den anderen Materialien nicht auftritt.

Einfluss der Orientierung der Partikel am Förderband

Der letzte zu untersuchende Einflussfaktor ist die Orientierung der Partikel am Band. Hier gibt es wie in 3.1.3 beschrieben vier verschiedene Arten: „vorne“, „hinten“, „quer vorne“ und „quer

hinten“. In Abbildung 50 werden die verschiedenen Orientierungen nach Sensoreinstellungen miteinander verglichen.

Bei Betrachtung der Boxplots in Abbildung 50 fällt auf, dass die Detektion von „vorne“ und „quer vorne“ bessere Ergebnisse liefert. Bei der Kombination von Threshold 10.000 und minimale Objektgröße 10 ist dieser Effekt allerdings nur leicht zu erkennen. Dies könnte darauf zurückzuführen sein, dass bei der Detektion von „hinten“ (gelb) und „quer hinten“ (grün) zum Beispiel der Stöpsel der Verpackung (siehe Abbildung 18 und Abbildung 23) den Auflagepunkt bildet und somit weniger detektiert werden kann oder die Verformungen für diese Aufgabearart ungünstig waren. Dazu passend ist der Maximalwert bei der Aufgabearart „vorne“ (orange) bei allen Einstellungsmöglichkeiten am höchsten.

Auffällig ist, dass die Schwankungsbreite bei den Aufgabeararten „hinten“ (gelb) und quer hinten (grün) geringer ist, was bei einem Threshhold von 10.000 und einer minimalen Objektgröße von 10 in Abbildung 50 besonders gut sichtbar ist. Der Grund hierfür könnte sein, dass bei dieser Aufgabe insgesamt weniger Pixel erkannt werden und somit die Schwankungsbreite auch weniger stark ausfällt.

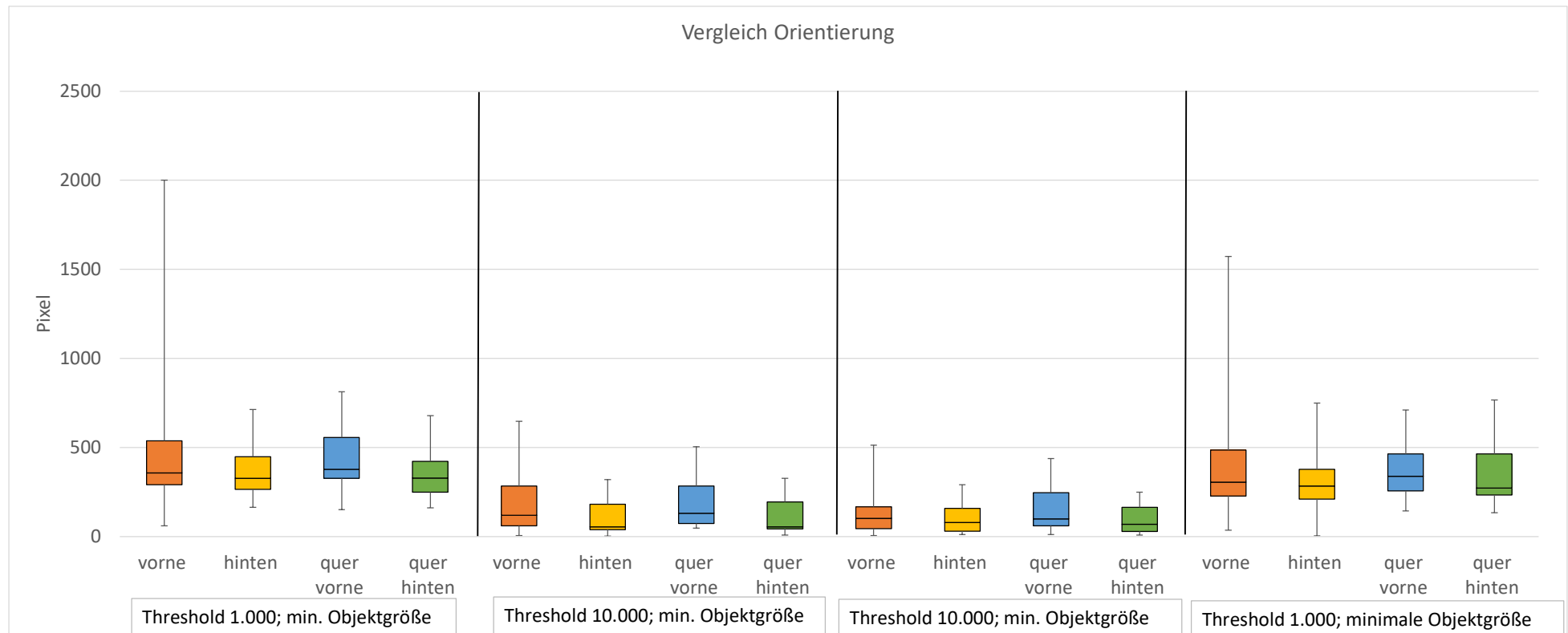


Abbildung 50: Vergleich der Orientierung der Objekte am Band über alle vier Einstellungsmöglichkeiten des Metallsensors (orange: „vorne“; gelb: „hinten“, blau: „quer vorne“, grün: „quer hinten“).

4.2 Vorversuche Wirbelstromscheider

In den Vorversuchen zum Wirbelstromscheider wurde versucht, die relevanten Versuchsparameter des Wirbelstromscheiders und die relevanten Einstellmöglichkeiten dieser Versuchsparameter für die Hauptversuche zu finden. Dabei wurden insbesondere Einstellmöglichkeiten mit hohem Ausbringen und hoher Reinheit des Produktes gesucht. Außerdem soll die Verstellung der Versuchsparameter des Wirbelstromscheiders einfach, schnell und im Idealfall während dem Betrieb geschehen können.

Bei den Vorversuchen zum Wirbelstromscheider wurden, wie in Kapitel 3.2.4 beschrieben, die die Videos des Trennvorgangs visuell beurteilt. Die Bewertung geschah auf einer Skala von eins bis fünf, wobei eins das Beste und fünf das Schlechteste ist. Zur einfacheren Interpretation wurde eine Farbskala von grün (= gut) bis rot (= schlecht) genutzt (Vgl. Tabelle 13). Dadurch wird sichtbar, dass sich die grün gefärbten Spalten mit Verstellen des Trennscheitelwinkels nach rechts (4L nach 4R), in Bezug auf die Bandgeschwindigkeit nach rechts verschieben. Bei der Einstellung 4L sind demnach geringere Bandgeschwindigkeiten vorteilhaft, bei 4R ergeben höhere Bandgeschwindigkeiten bessere Ergebnisse (vgl. Tabelle 13 oben blaue Markierungen). Bei detaillierterer Betrachtung fällt außerdem auf, dass mit Erhöhung der Polradgeschwindigkeit bei gleicher Bandgeschwindigkeit die Fehlwurfquote sinkt und damit die Sortierergebnisse besser sind (vgl. Tabelle 13 unten blaue Markierungen).

Tabelle 13: Gesamtergebnis der visuellen Bewertung der Videos für Trennvorgänge bei verschiedenen Sensoreinstellungen. (oben: Einfluss der Bandgeschwindigkeit blau markiert, unten: Einfluss der Polradgeschwindigkeit blau markiert).

			4L				3L				2L				2R				3R				4R			
			1,0 m/s	1,5 m/s	2,0 m/s	2,5m/s	1,0 m/s	1,5 m/s	2,0 m/s	2,5m/s	1,0 m/s	1,5 m/s	2,0 m/s	2,5m/s	1,0 m/s	1,5 m/s	2,0 m/s	2,5m/s	1,0 m/s	1,5 m/s	2,0 m/s	2,5m/s	1,0 m/s	1,5 m/s	2,0 m/s	2,5m/s
NE + Kunststoffe	Loch 1	800 rpm	2,50	2,83	4,33	5,00	3,00	2,50	3,50	4,17	3,50	3,17	3,33	4,33	3,50	3,00	2,50	3,33	4,50	4,00	3,00	3,50	4,00	3,50	3,50	3,33
	Loch 1	1600 rpm	2,50	2,83	4,83	5,00	2,50	2,00	3,00	4,17	3,00	2,67	3,33	3,83	3,00	2,00	2,50	2,83	3,50	2,50	2,50	3,00	3,50	2,50	2,50	2,83
	Loch 1	2400 rpm	2,00	2,33	4,33	5,00	2,50	2,00	3,00	4,67	2,50	2,17	3,33	3,83	2,50	2,50	2,00	2,83	3,00	2,50	2,50	2,50	3,00	2,50	2,50	2,83
	Loch 2	800 rpm	2,50	2,83	4,33	5,50	3,00	2,50	3,50	4,17	3,50	3,17	2,83	3,83	3,50	3,00	2,50	3,33	4,00	3,50	3,00	3,50	4,00	3,50	3,50	3,33
	Loch 2	1600 rpm	2,50	2,33	4,33	5,00	3,00	2,00	3,00	4,17	3,00	2,67	2,83	3,83	3,00	2,00	2,50	3,33	3,00	2,50	2,50	3,00	3,50	2,50	2,50	2,83
	Loch 2	2400 rpm	2,50	2,83	4,33	5,00	2,50	2,00	3,00	4,17	2,50	2,50	2,67	3,33	2,50	2,00	2,00	3,33	3,00	2,00	2,00	2,50	3,00	2,00	2,00	2,33
	Loch 3	800 rpm	3,00	2,83	4,33	5,00	3,00	3,00	3,00	4,67	3,50	3,17	3,33	4,33	4,00	3,00	3,00	3,33	4,00	4,00	3,00	3,50	4,50	4,00	3,50	3,33
	Loch 3	1600 rpm	2,50	2,83	4,33	5,00	2,50	2,00	3,50	4,67	2,50	2,17	3,33	4,33	3,00	2,00	2,50	2,83	3,50	2,50	2,50	3,00	4,00	3,00	2,50	2,83
	Loch 3	2400 rpm	2,50	2,33	4,33	5,00	2,50	2,00	3,50	4,17	2,50	2,67	2,83	3,83	3,00	2,50	2,50	3,33	3,00	2,00	2,50	3,50	3,00	2,50	2,50	2,83
	Loch 4	800 rpm	2,50	2,83	4,83	5,00	3,00	3,00	3,50	4,67	3,50	3,17	3,83	4,33	4,00	3,50	3,00	3,83	4,00	3,50	3,50	3,50	4,00	4,00	3,50	3,83
	Loch 4	1600 rpm	2,50	2,83	4,33	5,00	3,00	2,50	3,50	4,17	3,00	2,67	3,33	3,83	3,00	2,50	2,50	3,33	3,50	3,00	3,00	3,00	4,00	3,00	2,50	3,33
	Loch 4	2400 rpm	2,50	2,33	4,83	5,00	2,50	2,00	3,00	4,17	3,00	2,67	2,83	3,83	3,00	2,50	2,50	2,83	3,00	2,00	2,50	3,00	3,50	2,50	2,50	2,83
Mix	Loch 1	800 rpm	3,00	3,00	4,50	5,00	3,00	3,00	3,50	5,00	3,00	2,50	3,00	5,00	3,50	3,00	3,50	3,00	4,00	4,00	3,50	3,50	4,00	4,00	3,50	3,00
	Loch 1	1600 rpm	2,50	2,50	5,00	4,50	4,00	3,00	3,00	4,50	3,50	3,00	4,00	5,00	3,00	3,00	2,50	3,50	3,00	2,50	3,00	3,00	3,50	3,00	2,50	3,00
	Loch 1	2400 rpm	2,50	2,00	4,50	5,00	3,00	2,00	3,00	5,00	2,50	3,00	2,50	4,00	3,00	2,50	2,50	3,50	3,00	2,00	2,50	3,00	3,00	2,50	2,50	3,00

			4L				3L				2L				2R				3R				4R			
			1,0 m/s	1,5 m/s	2,0 m/s	2,5m/s	1,0 m/s	1,5 m/s	2,0 m/s	2,5m/s	1,0 m/s	1,5 m/s	2,0 m/s	2,5m/s	1,0 m/s	1,5 m/s	2,0 m/s	2,5m/s	1,0 m/s	1,5 m/s	2,0 m/s	2,5m/s	1,0 m/s	1,5 m/s	2,0 m/s	2,5m/s
NE + Kunststoffe	Loch 1	800 rpm	2,50	2,83	4,33	5,00	3,00	2,50	3,50	4,17	3,50	3,17	3,33	4,33	3,50	3,00	2,50	3,33	4,50	4,00	3,00	3,50	4,00	3,50	3,50	3,33
	Loch 1	1600 rpm	2,50	2,83	4,83	5,00	2,50	2,00	3,00	4,17	3,00	2,67	3,33	3,83	3,00	2,00	2,50	2,83	3,50	2,50	2,50	3,00	3,50	2,50	2,50	2,83
	Loch 1	2400 rpm	2,00	2,33	4,33	5,00	2,50	2,00	3,00	4,67	2,50	2,17	3,33	3,83	2,50	2,50	2,00	2,83	3,00	2,50	2,50	2,50	3,00	2,50	2,50	2,83
	Loch 2	800 rpm	2,50	2,83	4,33	5,50	3,00	2,50	3,50	4,17	3,50	3,17	2,83	3,83	3,50	3,00	2,50	3,33	4,00	3,50	3,00	3,50	4,00	3,50	3,50	3,33
	Loch 2	1600 rpm	2,50	2,33	4,33	5,00	3,00	2,00	3,00	4,17	3,00	2,67	2,83	3,83	3,00	2,00	2,50	3,33	3,00	2,50	2,50	3,00	3,50	2,50	2,50	2,83
	Loch 2	2400 rpm	2,50	2,83	4,33	5,00	2,50	2,00	3,00	4,17	2,50	2,67	3,33	4,33	2,50	2,00	2,00	3,33	3,00	2,00	2,00	2,50	3,00	2,00	2,00	2,33
	Loch 3	800 rpm	3,00	2,83	4,33	5,00	3,00	3,00	3,00	4,67	3,50	3,17	3,33	4,33	4,00	3,00	3,00	3,33	4,00	4,00	3,00	3,50	4,50	4,00	3,50	3,33
	Loch 3	1600 rpm	2,50	2,83	4,33	5,00	2,50	2,00	3,50	4,67	2,50	2,17	3,33	4,33	3,00	2,00	2,50	2,83	3,50	2,50	2,50	3,00	4,00	3,00	2,50	2,83
	Loch 3	2400 rpm	2,50	2,33	4,33	5,00	2,50	2,00	3,50	4,17	2,50	2,67	2,83	3,83	3,00	2,50	2,50	3,33	3,00	2,00	2,50	3,50	3,00	2,50	2,50	2,83
	Loch 4	800 rpm	2,50	2,83	4,83	5,00	3,00	3,00	3,50	4,67	3,50	3,17	3,83	4,33	4,00	3,50	3,00	3,83	4,00	3,50	3,50	3,50	4,00	4,00	3,50	3,83
	Loch 4	1600 rpm	2,50	2,83	4,33	5,00	3,00	2,50	3,50	4,17	3,00	2,67	3,33	3,83	3,00	2,50	2,50	3,33	3,50	3,00	3,00	3,00	4,00	3,00	2,50	3,33
	Loch 4	2400 rpm	2,50	2,33	4,83	5,00	2,50	2,00	3,00	4,17	3,00	2,67	2,83	3,83	3,00	2,50	2,50	2,83	3,00	2,00	2,50	3,00	3,50	2,50	2,50	2,83
Mix	Loch 1	800 rpm	3,00	3,00	4,50	5,00	3,00	3,00	3,50	5,00	3,00	2,50	3,00	5,00	3,50	3,00	3,50	3,00	4,00	4,00	3,50	3,50	4,00	4,00	3,50	3,00
	Loch 1	1600 rpm	2,50	2,50	5,00	4,50	4,00	3,00	3,00	4,50	3,50	3,00	4,00	5,00	3,00	3,00	2,50	3,50	3,00	2,50	3,00	3,00	3,50	3,00	2,50	3,00
	Loch 1	2400 rpm	2,50	2,00	4,50	5,00	3,00	2,00	3,00	5,00	2,50	3,00	2,50	4,00	3,00	2,50	2,50	3,50	3,00	2,00	2,50	3,00	3,00	2,50	2,50	3,00

In Abbildung 51 wurden die Bewertungsergebnisse der Videos mit einem Haupteffektdiagramm veranschaulicht, um die Einflussparameter weitergehend zu quantifizieren und in ihrer Relevanz für die Hauptversuche einschätzen zu können.

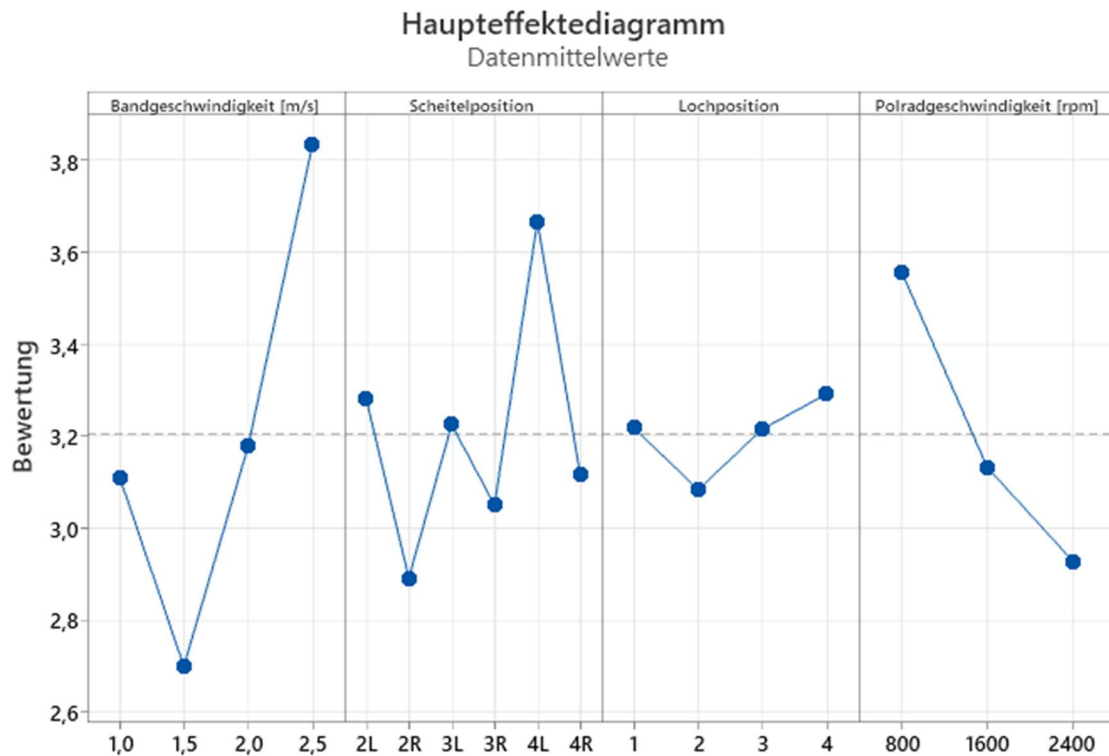


Abbildung 51: Haupteffektdiagramm zur Bewertung aller relevanten Versuchsparameter des Wirbelstromscheiders.

Abbildung 51 bestätigt die qualitative Aussage basierend aus Tabelle 13, dass die Werte mit steigender Polradgeschwindigkeit niedriger und somit das Trennergebnis besser wird. Dies ist darauf zurückzuführen, dass die NE-Metalle bei höherer Polradgeschwindigkeit einen größeren Impuls erhalten und so in ihrer Flugbahn weiter abgelenkt werden. Weiters ist zu sehen, dass die Lochposition des Polrades keinen relevanten Einfluss hat, da die Werte nur gering um den Wert 3,2 schwanken. Lochposition 4 hat dabei das schlechteste Ergebnis. Bei der Scheitelposition des Trennscheidels sind die Versuchsparametereinstellungen 2R, 3R und 4R am besten, was auch mit der Farbskala aus Tabelle 13 bestätigt wird. Bei den Vorversuchen hat sich die Beschleunigungsbandgeschwindigkeit von 1,5 m/s als die passendste für einen guten Trennerfolg herausgestellt. Am schlechtesten war hingegen die Einstellung von 2,5 m/s mit einer durchschnittlichen Bewertung von über 3,8. Bei zu niedrigen Bandgeschwindigkeiten fällt die Mehrheit des Materials in den Drop, da die Flugparabel zu steil ist. Bei zu hohen Bandgeschwindigkeiten haben auch nicht-metallische Partikel eine so hohe Geschwindigkeit, dass fast das gesamte Material im Eject landet.

In nachfolgender Abbildung 52 sind zusätzlich zu den zuvor dargestellten Informationen, die Wechselwirkung zwischen den einzelnen Versuchsparametern dargestellt. Darin kann man den Punkt mit der besten Bewertung von allen Variationen erkennen, welcher sich bei einer

Scheitelposition von 3L, einer Bandgeschwindigkeit von 1,5 m/s und einer Polradgeschwindigkeit von 2.400 rpm befindet.

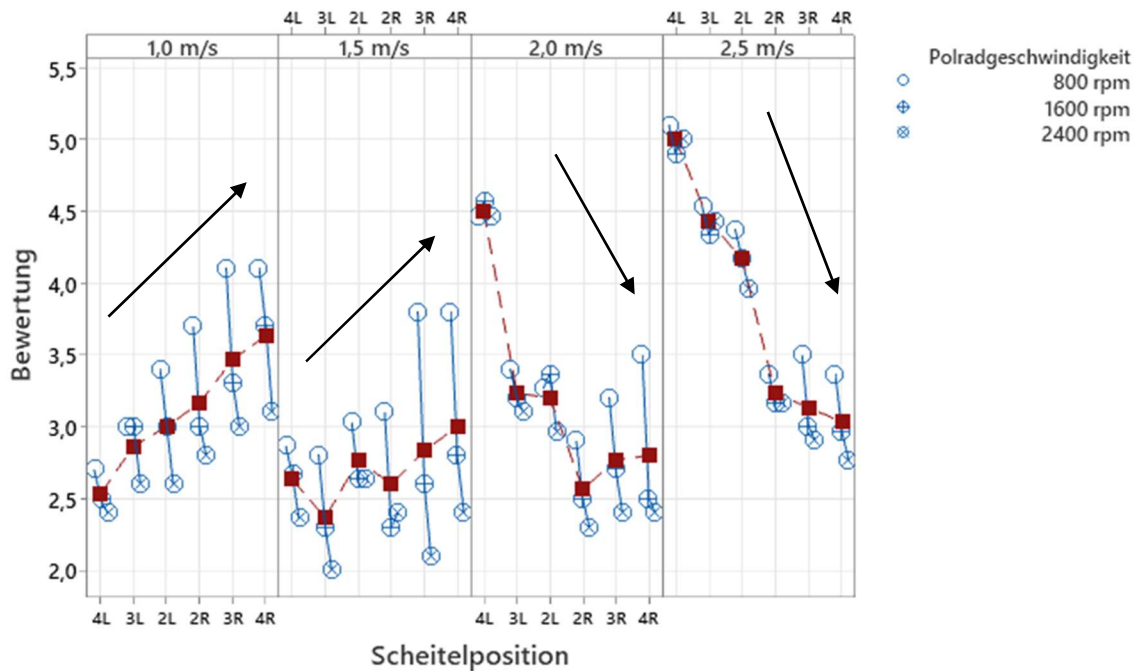


Abbildung 52: Multi-Vari-Bild zur Bewertung der Zusammenhänge aller relevanten Versuchsparameter des Wirbelstromscheiders. Die Feldvariable ist die Bandgeschwindigkeit [m/s].

Außerdem kann erneut ein Zusammenhang zwischen Bandgeschwindigkeit und Winkelposition beobachtet werden. So wird bei den geringen Bandgeschwindigkeiten (1,0 m/s und 1,5 m/s) mit dem Trennscheitel weiter rechts das Ergebnis schlechter, während bei höheren Bandgeschwindigkeiten (2,0 m/s und 2,5 m/s) das Ergebnis mit dem Trennscheitel weiter rechts besser ausfällt. Daraus kann geschlossen werden, dass eine in der Praxis sinnvolle Bandgeschwindigkeit vom Winkel des Trennscheites abhängt.

Die Polradgeschwindigkeit erzielt bei allen Wechselwirkungen bei 2.400 rpm das beste Ergebnis. Hier kann für das untersuchte Material am vorliegenden Wirbelstromscheider also abgeleitet werden, dass stets die höchste Polradgeschwindigkeit gewählt werden sollte.

4.3 Hauptversuche

Im folgenden Kapitel werden die Resultate der Hauptversuchsreihe, welche wie in Kapitel 3.3.3 beschrieben durchgeführt wurde, betrachtet. Die Auswertung wurde in verschiedene Themengebiete gegliedert, es beginnt mit den Untersuchungen zu den Sensoren selbst, dann folgt die Berechnung der Pixelmassen und es endet mit den verschiedenen Untersuchungen bei den Hauptversuchen selbst. Ziel der Hauptversuchsreihe war es zu untersuchen, ob es möglich ist, mithilfe der Metallsensoren die besten Einstellungen für den Wirbelstromscheider zu finden, um beurteilen zu können, ob im laufenden Betrieb eine Aggregatsteuerung möglich ist.

4.3.1 Analyse Reliabilität der Sensoren

In diesem Teil der Hauptversuche wurde die Forschungsfrage untersucht, ob die reale Einbausituation die Ergebnisse der Detektion mittels Metallsensor signifikant beeinflusst. Im realen Anlagenbetrieb verteilen sich Partikel am Förderband. Identische Partikel sollten für ein optimales Monitoring aber unabhängig von der Position am Band im gleichen Umfang detektiert werden. Um die Einbausituation und deren Auswirkung auf die Erkennung entlang der Förderbandbreite zu quantifizieren, wurde die Anzahl der detektierten Pixel mit der für dieses Material maximalen Anzahl von detektierten Pixeln ins Verhältnis gesetzt (vgl. Abbildung 53).

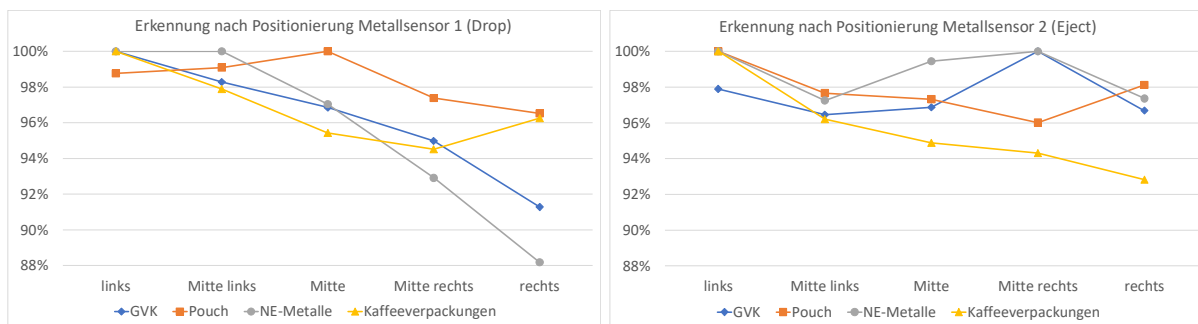


Abbildung 53: Prozentueller Anteil der erkannten Metallpixel nach Positionierung am Band bei Metallsensor 1 (links) und Metallsensor 2 (rechts) je Material (blau: GVK, orange: Pouch, grau: NE-Metalle, gelb: Kaffeeverpackungen).

Bei Betrachtung des linken Diagrammes in Abbildung 53 fällt auf, dass die Erkennung in Abhängigkeit von der Position „links“ bis „rechts“ schlechter wird. Das Pouch-Material (orange) wird am gleichmäßigsten von allen Proben detektiert. Mit einer Differenz von 11,81 % ist die Differenz vom Maximalwert bei den NE-Metallen (grau) am größten.

Bei Metallsensor 2 sind die Differenzen geringer als bei Metallsensor 1 (vgl. Abbildung 53 rechtes Diagramm) und die Werte liegen in einem tolerierbaren Schwankungsbereich. Die Ausnahme bilden Kaffeeverpackungen, bei welchen mit 7,18 % die größte Abweichung vom Maximalwert vorliegt.

Ein möglicher Grund für die Abweichungen vom Maximalwert könnte ein schiefes Einbauen der Sensoren sein, dies führt zu einer einseitigen Überschreitung der maximalen Detektionsweite des Sensors.

In Abbildung 54 sind Violinen-Plots zum Vergleich der detektierten Pixel, sowie der Erkennungsrate der beiden Metallsensoren zu finden.

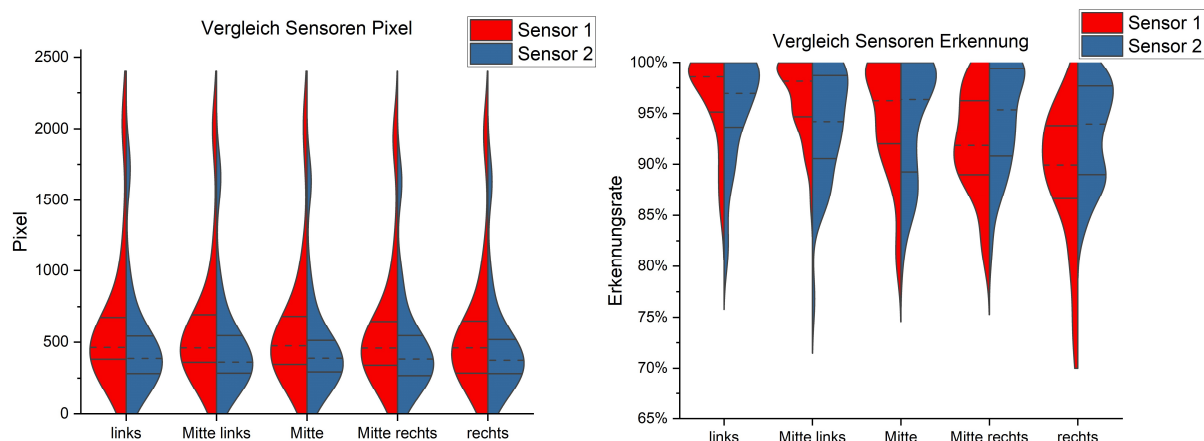


Abbildung 54: Vergleich der beiden Sensoren bezogen auf erkannte Pixel (links) und Erkennungsratenebene (rechts) (rot = Metallsensor 1 im Drop, blau = Metallsensor 2 im Eject).

Bei Betrachtung der Pixel-bezogenen Violinen-Plots in Abbildung 54 (links) fällt auf, dass der Metallsensor 1 (rot) bei identischem Aufgabematerial mehr Pixel erkennt als Metallsensor 2 (blau). Dies kann daran erkannt werden, dass der Medianwert (strichlierte Linie) bei Metallsensor 1 (rot) höher liegt und somit im Mittel mehr Pixel erkannt wurden. Außerdem verhalten sich die Wahrscheinlichkeitslinien beider Sensoren konstant und es sind keine großen Auffälligkeiten vorhanden. Dies bedeutet, dass es an den verschiedenen Positionen am Band immer dieselben Eintrittswahrscheinlichkeiten für die Detektionen von Pixel gibt.

Im rechten Diagramm von Abbildung 54 ist zu erkennen, dass bei der Position „links“ und „Mitte links“ Sensor 1 (rot) bessere Ergebnisse in Form von höheren Erkennungsraten liefert, welche man anhand der Mittelwerte erkennen kann (strichlierte Linien). Bei einer Positionierung der Probe „rechts“ oder „Mitte rechts“ am Band liefert Sensor 2, aufgrund der höheren Mittelwertlinien, bessere Ergebnisse. Weiters fällt für Metallsensor 1 (rot) auf, dass die Wahrscheinlichkeitskurve bei „Mitte rechts“ und „rechts“, anders verläuft als bei den anderen Positionierungen der Proben. Der Grund hierfür ist, dass weiter „rechts“ die Proben schlechter erkannt wurden und somit die Wahrscheinlichkeit für eine geringere Erkennungsrate größer ist.

Beim Vergleich der beiden Diagramme fällt auf, dass beim Pixel-bezogenen Diagramm (links) die Streubreite bei Metallsensor 1 (rot) größer ist. Im Gegensatz dazu ist die Streubreite bei den Erkennungsraten (rechts) bei Sensor 2 (blau) größer.

Partikel-bezogene Unterschiede der Erkennung

Um den Einfluss der Positionierung am Band noch detaillierter zu untersuchen, wurden Unterschiede einzelner Partikel innerhalb der gleichen Materialart untersucht. In Abbildung 55 sieht man, wie viel Prozent der maximal detektierten Pixel je GVK-Partikel (vgl. Abbildung 42) an den verschiedenen Bandpositionen erreicht wurden, wobei jeder Datenpunkt den Mittelwert von fünf Einzelmesswerten darstellt.

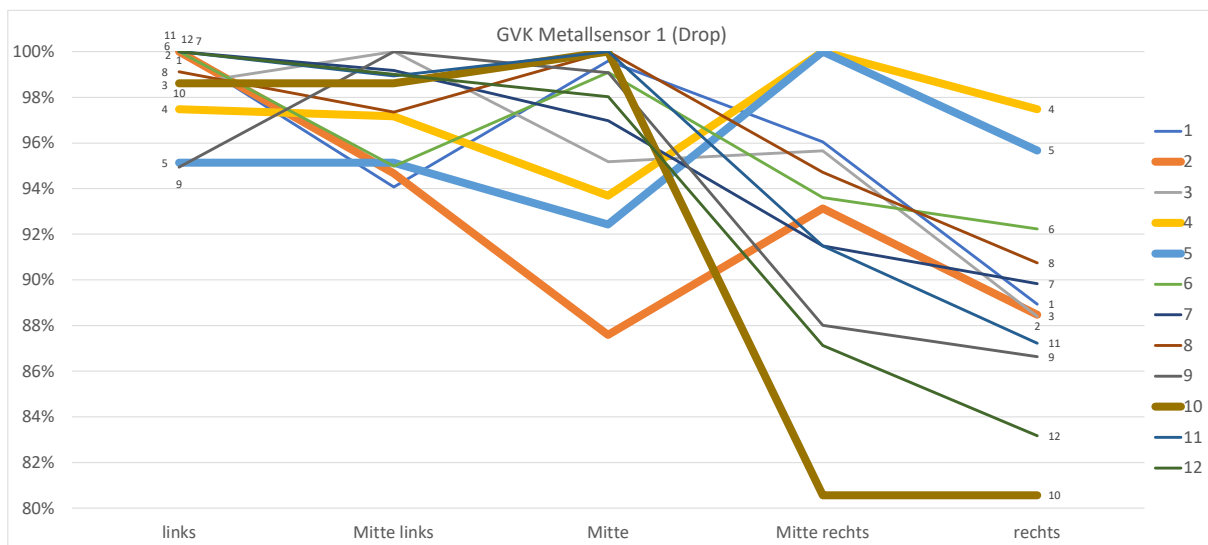


Abbildung 55: Erkennungsrate nach Position für GVK an Metallsensor 1 (Drop).

In Abbildung 55 ist zu erkennen, dass ein Großteil der Partikel einen ähnlichen Verlauf aufweist. Die Linien mit Auffälligkeiten wurden fett markiert (Objekt 2,4,5 und 10). Anhand dieser Beispiele kann man erkennen, dass es auch innerhalb einer Fraktion große Schwankungen bei der Erkennung gibt. Objekte 4 und 5 werden im Unterschied zu allen bisher erkannten Trends, bei der Position „Mitte rechts“ und „rechts“ sogar besser erkannt als an den anderen Positionen. An den Positionen „links“ und „Mitte links“ ist die Schwankungsbreite mit 5 Prozentpunkten auffallend gering. An der Position „Mitte“ ist auffällig, dass viele Objekte gut oder am besten erkannt werden, aber Objekt 2 von allen Positionen am schlechtesten erkannt wird. Es wird vermutet, dass diese Effekte durch komplexe physikalische Wechselwirkungen bei verschiedenen Geometrien und Materialunterschieden begründet sind (siehe Abbildung 42).

In Abbildung 56 sind die Erkennungsraten der einzelnen Partikel der Kategorie Kaffeeverpackungen (vgl. Abbildung 42) an Metallsensor 1 zu erkennen.

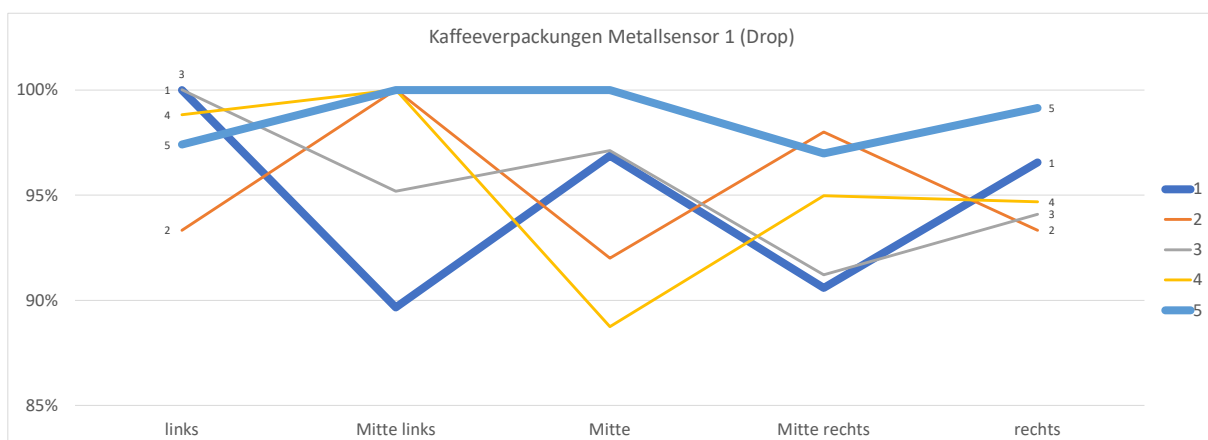


Abbildung 56: Erkennungsrate nach Position für Kaffeeverpackungen an Metallsensor 1 (Drop).

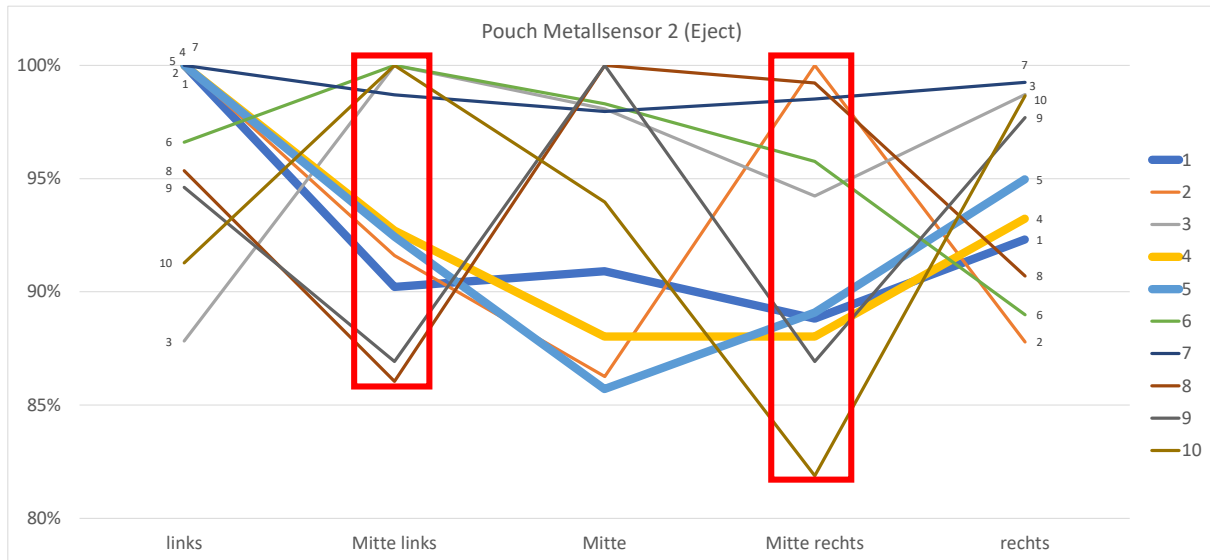


Abbildung 58: Erkennungsrate nach Position für Pouch an Metallsensor 2 (Eject).

In Abbildung 58 ist zu sehen, dass für Pouches an jeder Bandposition eine große Schwankung der einzelnen Partikel gegeben ist. Vor allem die Positionen „Mitte links“ und „Mitte rechts“ sind hier auffällig (siehe rote Markierungen), da es an diesen Stellen jeweils von mehreren Objekten Maximal- und Minimalwerte gibt. Bei genauerer Betrachtung der Verläufe von Objekt 1,4 und 5 fällt auf, dass die Verläufe sehr ähnlich sind. Dies ist bei Objekt 4 und 5 auf die sehr ähnliche Form der Objekte (vgl. Abbildung 42) zurückzuführen. Bei Objekt 1 ist dieser Trend nicht genau zu begründen, da das Objekt größer als die anderen beiden ist.

Aufgrund der großen Abweichungen bei dem Pouch Material wurde diese Fraktion in Abbildung 59 noch einmal dargestellt. Es ist die Verteilung der Werte der Erkennungsraten für die jeweiligen Sensoren für das Material Pouch in einem Punktdiagramm zu sehen. Es sind bei beiden Sensoren deutlich die Schwankungen innerhalb einer Materialart zu erkennen. Zum ersten Mal ist auch ein Vergleich der beiden Sensoren für dieselbe Materialart zu erkennen, wobei beide Sensoren ähnlich große Streuungen aufweisen.



Abbildung 59: Verteilungen innerhalb einer Materialart am Beispiel Pouch bei Metallsensor 1 (links, Drop) und Metallsensor 2 (rechts, Eject). Der Mittelwert der Daten ist als Linie dargestellt.

4.3.2 Pixelgewicht

Es soll untersucht werden, ob es möglich ist, ein lineares Modell für den Zusammenhang zwischen Gewicht und Anzahl detektierter Pixel für ausgewählte Partikel und für einen Stoffstrom zu finden. Um das Pixelgewicht zu untersuchen, wurden wie in Kapitel 3.3.3 beschrieben, sowohl Korrelationen auf Basis einzelner Partikel als auch auf Stoffstromebene durchgeführt. In den linken Diagrammen in Abbildung 60 sind die Datenpunkte aller Partikel unabhängig von der Fraktion zu erkennen. Die Regressionsgerade der partikelbasierten Daten ist jeweils blau abgebildet und durch den Nullpunkt gezwungen, da so ein höheres Bestimmtheitsmaß erzielt wurde. Bei Metallsensor 1 hat die Regressionsgerade eine Steigung von $2 \cdot 10^{-5}$ und bei Metallsensor 2 hat die Regressionsgerade eine Steigung von $4 \cdot 10^{-5}$.

Bei Betrachtung der linken Diagramme in Abbildung 60 ist zu erkennen, dass zum einen kleine Objekte mit großem Gewicht (z.B.: Spraydose) und zum anderen große Objekte mit kleinem Gewicht (z.B.: verschiedene Kaffeeverpackungen) zu Ausreißern führen und es somit auf Einzelobjektbasis keine gute Korrelation gibt. Dies wird durch ein Bestimmtheitsmaß von 0,315 bei Metallsensor 1 (Drop) und ein Bestimmtheitsmaß von 0,304 bei Metallsensor 2 (Eject) bestätigt. Die Bestimmtheitsmaße der beiden Sensoren deuten somit auf einen geringen linearen Zusammenhang der Daten hin, wobei das Maß bei Metallsensor 2 um 0,011 schlechter ist als bei Metallsensor 1. Somit ergibt sich für einzeln ausgewählte Partikel, welche bewusst unterschiedlich sind, kein gutes lineares Modell für den Zusammenhang von Gewicht und Anzahl detektierter Pixel. Ein Grund für das schlechte Bestimmtheitsmaß könnte sein, dass das Verteilungsverhältnis der unterschiedlichen Materialarten nicht praxisnahe war.

In den rechten Diagrammen in Abbildung 60 sind zusätzlich zur zuvor generierten Regressionsgerade die mit der Formel errechneten Werte der Handsortierung für alle Versuchsreihen (ein Datenpunkt = eine neue Kombination von Bandgeschwindigkeit und Polradgeschwindigkeit) für beide Mischungen dargestellt.

Die höchsten Werte beim Bestimmtheitsmaß wurden für die Regressionsgerade auch hier jeweils erreicht, indem sie durch den Nullpunkt geführt wurde. Die einzige Ausnahme bildet die Regressionsgerade für die Mischung DE bei Metallsensor 1, sie ist um den Wert 324 negativ versetzt. Somit können bei Metallsensor 1 gemäß diesem Modell für die Mischung DE Pixel erkannt werden, ohne dass eine Masse erfasst wird. Dies könnte die Ursache haben, dass Verunreinigungen am Band vorhanden waren welche als Materialpixel erkannt wurden, aber in der Handsortierung nicht als Massen aufscheinen können.

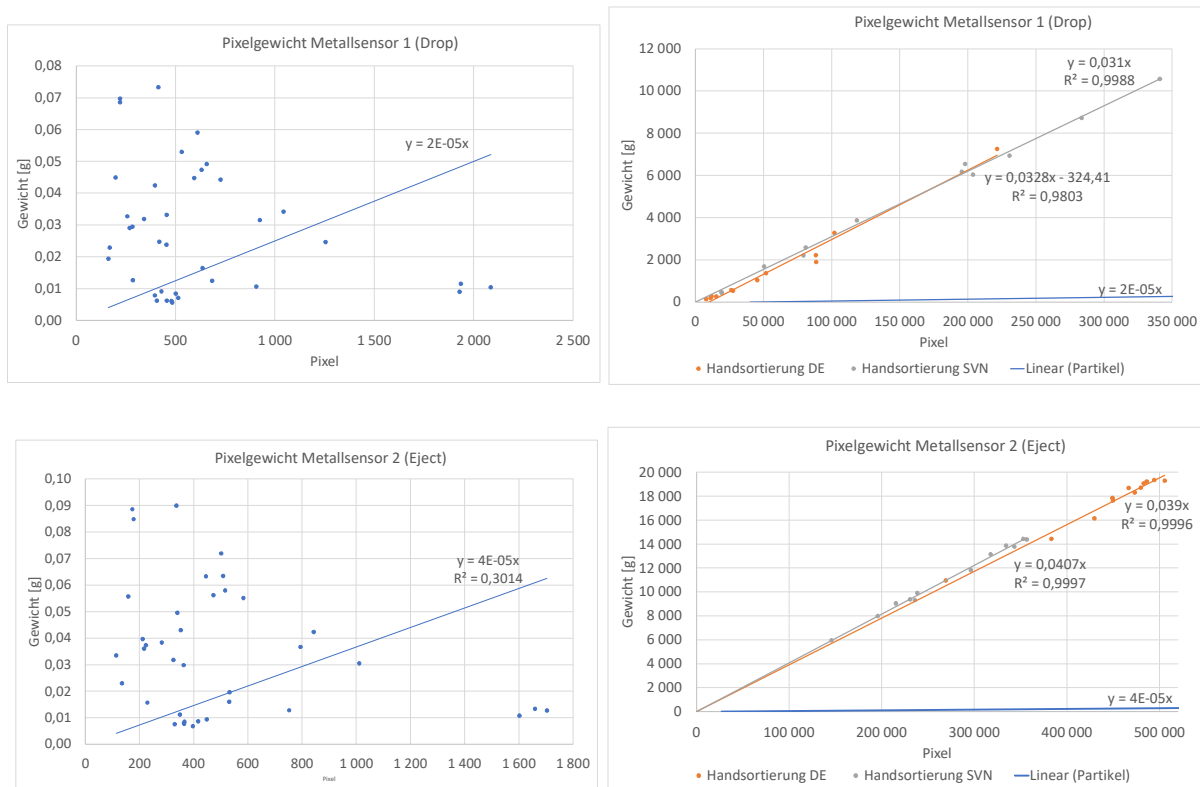


Abbildung 60: Links: Partikelbasiertes Pixelgewicht (oben: Drop, unten: Eject), rechts: Stoffstrombasiertes Pixelgewicht (oben: Drop, unten: Eject) für Metallsensor 2.

Außerdem ist in Hinblick auf die stoffstrombasierten Daten zu erkennen, dass die Abweichung vom Modell auf Basis der gewählten Einzelpartikel (blau) mit steigender Pixelanzahl steigt. Bei Betrachtung des Bestimmtheitsmaß ist jedoch zu erkennen, dass diese Abweichung nicht negativ zu interpretieren ist, da das Bestimmtheitsmaß für stoffstrombasierten Daten mit jeweils über 0,9988 besser als für die partikelbasierte Regressionsgerade ist. Somit lässt sich feststellen, dass bei Stoffstrombasierter Messung ein hoher linearer Zusammenhang der Daten besteht. Beim Vergleich der Mischungen DE und SVN fällt auf, dass die Regressionsgeraden eine sehr ähnliche Steigung haben. Es wäre also möglich auf Basis der Handsortierung grobe Abschätzungen bezüglich einer Korrelation zwischen verschiedenen Stoffstromzusammensetzungen durchzuführen und im Gegensatz dazu ist diese Abschätzung auf Basis von Stichproben nicht möglich.

Die pixelbasierte Regressionsgerade (blau) zeigt im Vergleich zu den anderen Regressionsgeraden in den rechten Diagrammen in Abbildung 60 nochmal, dass eine Bestimmung des Pixelgewichts mit einer kleinen Stichprobe mit den Metallsensoren nicht möglich ist. Um gute Ergebnisse für das Pixelgewicht zu bekommen, soll also eine große Probenmenge verwendet werden, welche anschließend handsortiert werden muss, um die genaue Zusammensetzung herauszufinden.

In Abbildung 61 wurde dieselben Grafiken wie zuvor mit den Daten aus beiden Sensoren zusammen erstellt, um darzustellen wie eine Korrelation für verschiedene Inputmaterialien und verschiedene Einbausituationen aussieht. Die Regressionsgerade auf Basis der Einzelpartikel

(blau) hat eine Steigung von $3 \cdot 10^{-5}$. Das R^2 beträgt 0,2957 und somit besteht ein noch geringerer linearer Zusammenhang der Daten, als bei der einzelnen Betrachtung der Metallsensoren.

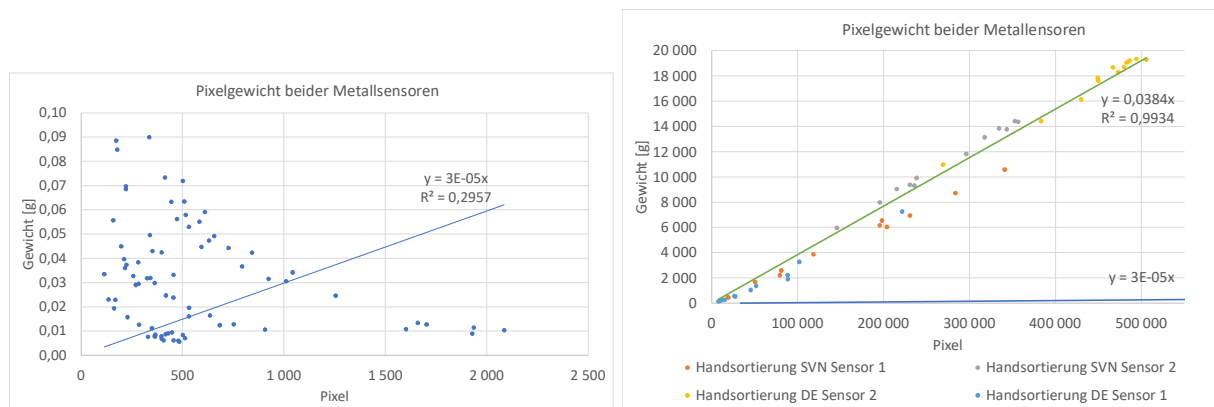


Abbildung 61: Links: Partikelbasiertes Pixelgewicht, rechts: Stoffstrombasiertes Pixelgewicht für beide Metallsensoren.

Beim rechten Diagramm in Abbildung 61 wurde eine Regressionsgerade für beide Sensoren und beide Mischungen zusammen erstellt und diese hat eine Steigung von 0,0384. Das Bestimmtheitsmaß von 0,9934 weist auf einen guten linearen Zusammenhang der Datenpunkte hin. Dies bestätigt die Beobachtung der einzelnen Sensoren, dass sich statistisch passende Korrelationsmodelle auf Basis von kleinen Stichproben für die Umrechnung zwischen detektierten Pixeln und vorhandenen Massen nicht eignen.

Die Abweichung der Steigungen der objekt- und stoffstrombasierten Regressionsgeraden sind, wenn die Werte beider Metallsensoren berücksichtigt werden, geringer als die Einzelbetrachtung der Metallsensoren. Legt man also das Wissen zugrunde, dass ein steigender linearer Zusammenhang besteht, kann auf Basis der geringen Stichprobe zumindest eine näherungsweise Abschätzung der Korrelation zwischen Pixeln und tatsächlichen Massen durchgeführt werden. Eine stoffstrombasierte Korrelation ist dem aber auf Basis der vorliegenden Versuchsergebnisse stets vorzuziehen.

4.3.3 Potential des Stoffstrommonitorings

Um die Auswirkungen einer sensorbasierten Steuerung des Wirbelstromscheiders in der Praxis beschreiben zu können, ist die Analyse der Qualitäten der Outputströme, bezüglich Ausbringens und Reinheit erforderlich. Dafür wurden für alle Versuchsreihen sowohl Eject als auch Drop handsortiert. In Abbildung 62 ist die Reinheit der Produktfraktionen bei den verschiedenen Versuchseinstellungen zu sehen. Bei einer Polradgeschwindigkeit von 2.400 rpm und einer Bandgeschwindigkeit von 1,0 m/s ereignete sich bei der Mischung SVN eine Verstopfung am Förderband. Diese Verstopfung wird in Kapitel 4.3.5 genauer untersucht und in jeder relevanten Abbildung mit einem „*“ gekennzeichnet.

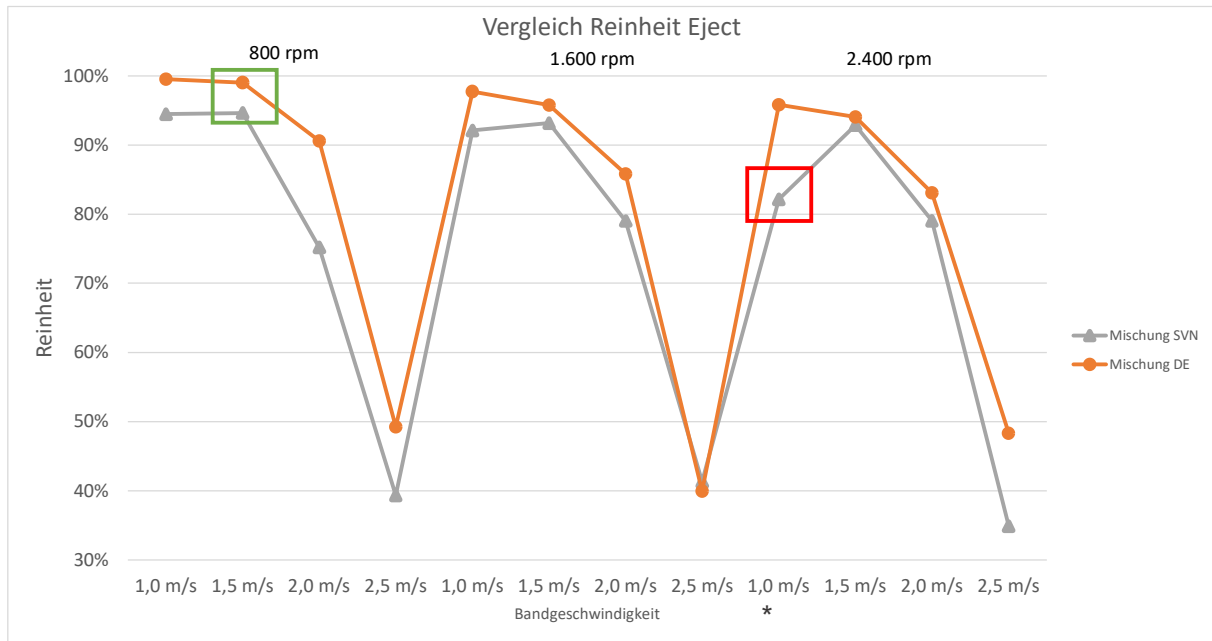


Abbildung 62: Reinheit des Eject-Stroms der Mischung DE (orange) und Mischung SVN (grau).

In der Industrie wird von den Abnehmern eine Reinheit der Produkte von mindestens 90% gefordert. Prinzipiell gilt je höher die Reinheit, umso mehr zahlt der Kunde für das Produkt.

Bei Betrachtung von Abbildung 62 fällt als Erstes auf, dass die Reinheit im Eject bei den meisten Versuchen bei der Mischung DE (orange) besser ist als bei der Mischung SVN (grau). Als Beispiel liegt bei einer Polradgeschwindigkeit von 800 rpm und bei einer Bandgeschwindigkeit von 1,5 m/s die Reinheit der Mischung DE bei 99,04 % und jene der Mischung SVN bei 94,16 % (siehe grüne Markierung in Abbildung 62). Daraus kann man ableiten, dass die resultierende Reinheit bei einem Wirbelstromscheider nicht vom Inputstrom abhängt.

Außerdem ist auffällig, dass bei niedriger Bandgeschwindigkeit und bei niedriger Polradgeschwindigkeit eine höhere Reinheit erzielt werden kann. Dies kann die Ursache haben, dass bei höheren Geschwindigkeiten falsches Material entweder mitgerissen wird oder aufgrund der zu hohen Beschleunigung fälschlicherweise über den Trennscheitel fliegt. Daraus lässt sich schließen, dass in der Praxis kleine Werte für die Polradgeschwindigkeit und die größten Bandgeschwindigkeiten zu vermeiden sind.

Bei der Mischung SVN ist bei 2.400 rpm und 1,0 m/s (siehe rote Markierung in Abbildung 62), im Vergleich zu den Versuchen mit der gleichen Bandgeschwindigkeit davor, ein geringerer Wert zu beobachten dies ist auf die schon in Kapitel 4.3.5 beschriebene Verstopfung zurückzuführen.

Die Anteile der jeweiligen Metalle und Metallverbunde im Drop-Strom für beide Mischungen sind in Abbildung 63 zu finden.

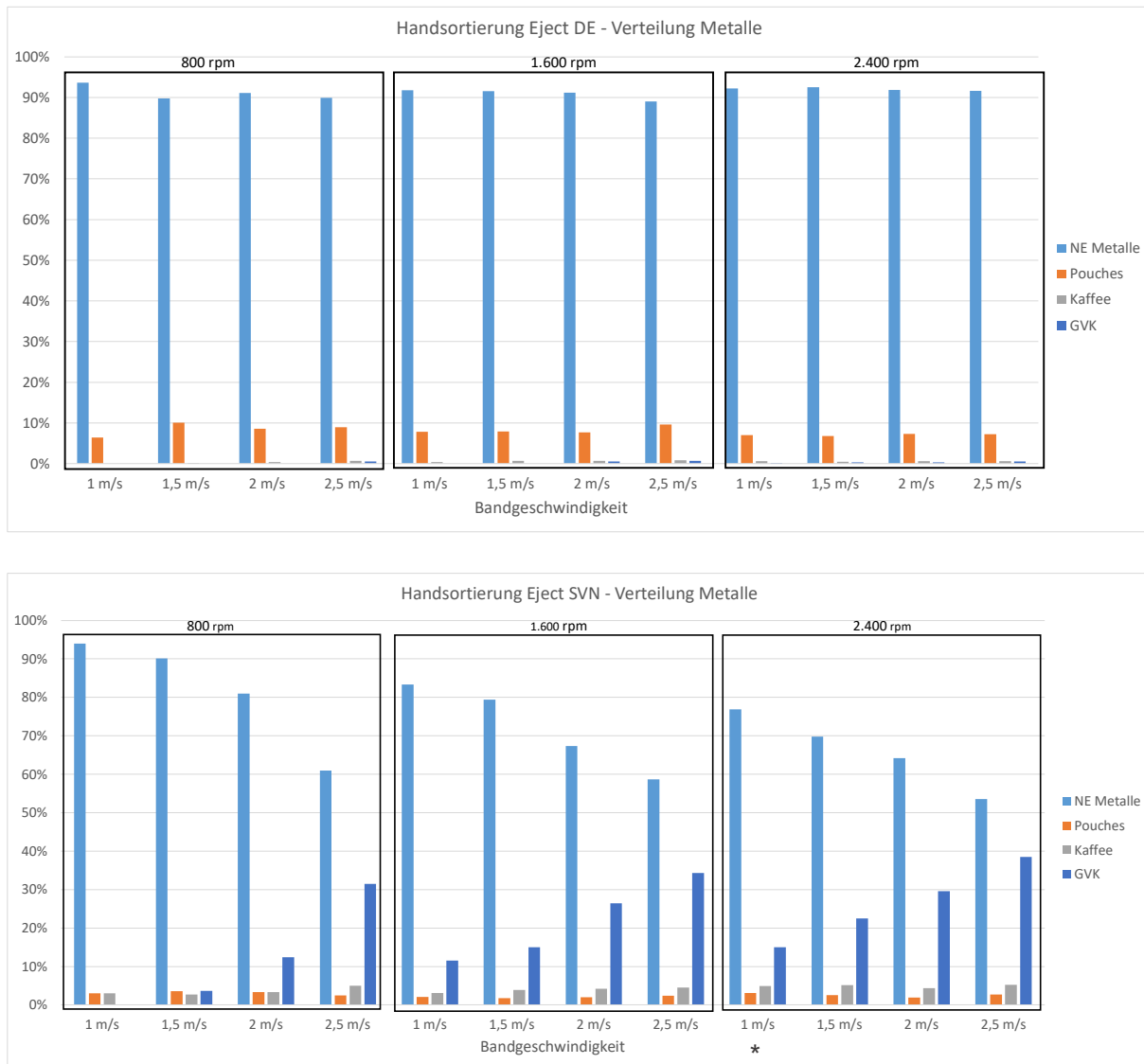


Abbildung 63: Massenanteile der Metallarten im Eject gemäß Handsortierung für die Mischung DE (oberes Diagramm) und SVN (unteres Diagramm) (hellblau: NE-Metalle, orange: Pouches, grau: Kaffeeverpackungen, dunkelblau: GVK).

Bei der Mischung DE ist in Abbildung 63 im oberen Diagramm zu erkennen, dass NE-Metalle hellblau) in der Zusammensetzung klar dominieren (88,81 – 93,60 %). Als einzig weitere relevante Fraktion sind mit 5 – 10% Pouches (orange) zu erkennen.

Die verschiedenen Versuchsparemetereinstellungen haben wenig Einfluss auf die Zusammensetzung der metallischen Materialien im Eject für die Mischung DE (oberes Diagramm), welche über alle 12 Versuchsreihen nahezu konstant ist.

Im Gegensatz zur Mischung DE sinkt beim slowenischen Material der Anteil an NE-Metallen (hellblau) mit steigender Bandgeschwindigkeit und gegengleich dazu steigt der GVK-Anteil (dunkelblau) mit steigender Bandgeschwindigkeit. Dies resultiert, wie in Kapitel 3.1.1 beschrieben aus der Tatsache, dass in der slowenischen Anlage keine Abscheidung des GVK vor dem Wirbelstromscheider geschieht. Der Anstieg der GVK-Fraktion (dunkelblau) ist mit

hoher Wahrscheinlichkeit auf das höhere Gewicht des GVK und das daraus resultierende Flugverhalten zurückzuführen.

Die Steuerung des Wirbelstromscheiders würde für die Mischung DE aufgrund der Ergebnisse vom oberen Diagramm in Abbildung 63 nicht erforderlich sein, da sich die Verteilung der NE-Metalle wenig ändert. Im Gegensatz dazu würde eine Steuerung des Wirbelstromscheiders für die Mischung SVN Sinn ergeben. Wie im unteren Diagramm in Abbildung 63 ersichtlich, stehen die NE-Metalle (hellblau) und die GVK (dunkelblau) in einem Verhältnis zueinander und durch Veränderung der Prozessparameter wäre eine Steuerung und somit Veränderung der Produktfraktion möglich.

Im Gegensatz dazu sind in Abbildung 64 die Verteilung der Metalle im Drop-Strom zu erkennen. Dabei zeigt sich, dass der Anteil an Pouches (orange) bei beiden Mischungen meist mit zunehmender Bandgeschwindigkeit steigt. Der Anteil an NE-Metallen (hellblau) im Strom sinkt bei beiden Mischungen hingegen, außer bei einer Polradgeschwindigkeit von 1.600 rpm und einer Bandgeschwindigkeit von 2,5 m/s, mit steigender Bandgeschwindigkeit.

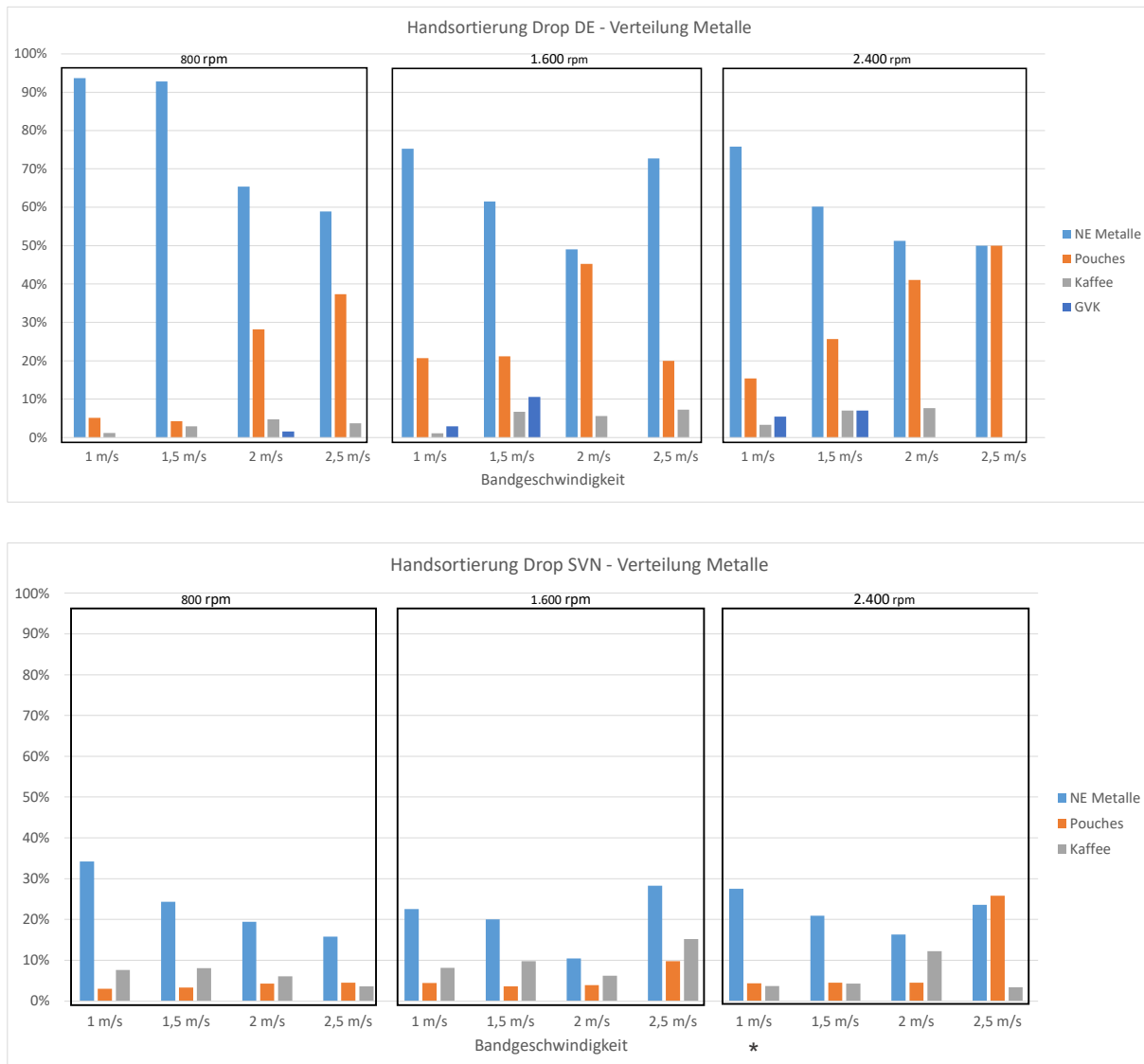


Abbildung 64: Massenanteile der Metallarten im Drop gemäß Handsortierung für die Mischung DE (oberes Diagramm) und SVN (unteres Diagramm) (hellblau: NE-Metalle, orange: Pouches, grau: Kaffeeverpackungen, dunkelblau: GVK).

Eine Auffälligkeit, welche für beide Mischungen zutrifft, ist, dass bei einer niedrigen Polradgeschwindigkeit der Anteil an Pouches und Kaffeeverpackungen im Drop im Durchschnitt geringer ist. Dies zeigt, dass diese Materialien bei einer höheren Polradgeschwindigkeit aufgrund des zu hohen Kraftimpulses nicht richtig abgeleitet werden und fälschlicherweise im Drop landen. Außerdem wird dargestellt, dass mit einer steigenden Bandgeschwindigkeit auch der Anteil an Pouches steigt. Dies zeigt, dass diese Materialien aufgrund des geringen Gewichts und der komplexen Flugeigenschaften mehr Beschleunigung benötigen, um abgetrennt zu werden.

Beim slowenischen Material (vgl. Abbildung 64 unteres Diagramm) fällt der höhere Anteil an GVK (dunkelblau) im Drop auf. Dies resultiert, wie in Kapitel 3.1.1 beschrieben, aus der Tatsache, dass in der slowenischen Anlage keine Abscheidung des GVK vor dem Wirbelstromscheider geschieht. Somit ist GVK die dominierende Fraktion und systematische

Effekte durch die verschiedenen Maschineneinstellungen können besser quantifiziert werden. Der GVK-Anteil steigt mit Erhöhung der Bandgeschwindigkeit. Es gibt jedoch eine Abweichung von dieser These, bei 1.600 rpm und 2,5 m/s ist dies mit der Verstopfung zu erklären.

In Abbildung 65 ist die Gegenüberstellung der True Positive Rate (TPR) mit der True Negative Rate (TNR) für die jeweilige Mischung zu erkennen, welche in Kapitel 3.3.3 beschrieben sind. Gute Ergebnisse werden geliefert, wenn sowohl die TPR als auch die TNR hoch sind. Wenn die TPR nicht hoch ist, gehen viele Wertstoffe verloren, und wenn die TNR niedrig ist, sind viele Störstoffe im Produkt. Somit kann festgestellt werden, dass eine hohe TPR allein für den Praxisbetrieb nicht ausreicht und zusätzlich die TNR auch hoch sein muss, um ein gutes Sortierergebnis zu erzielen.

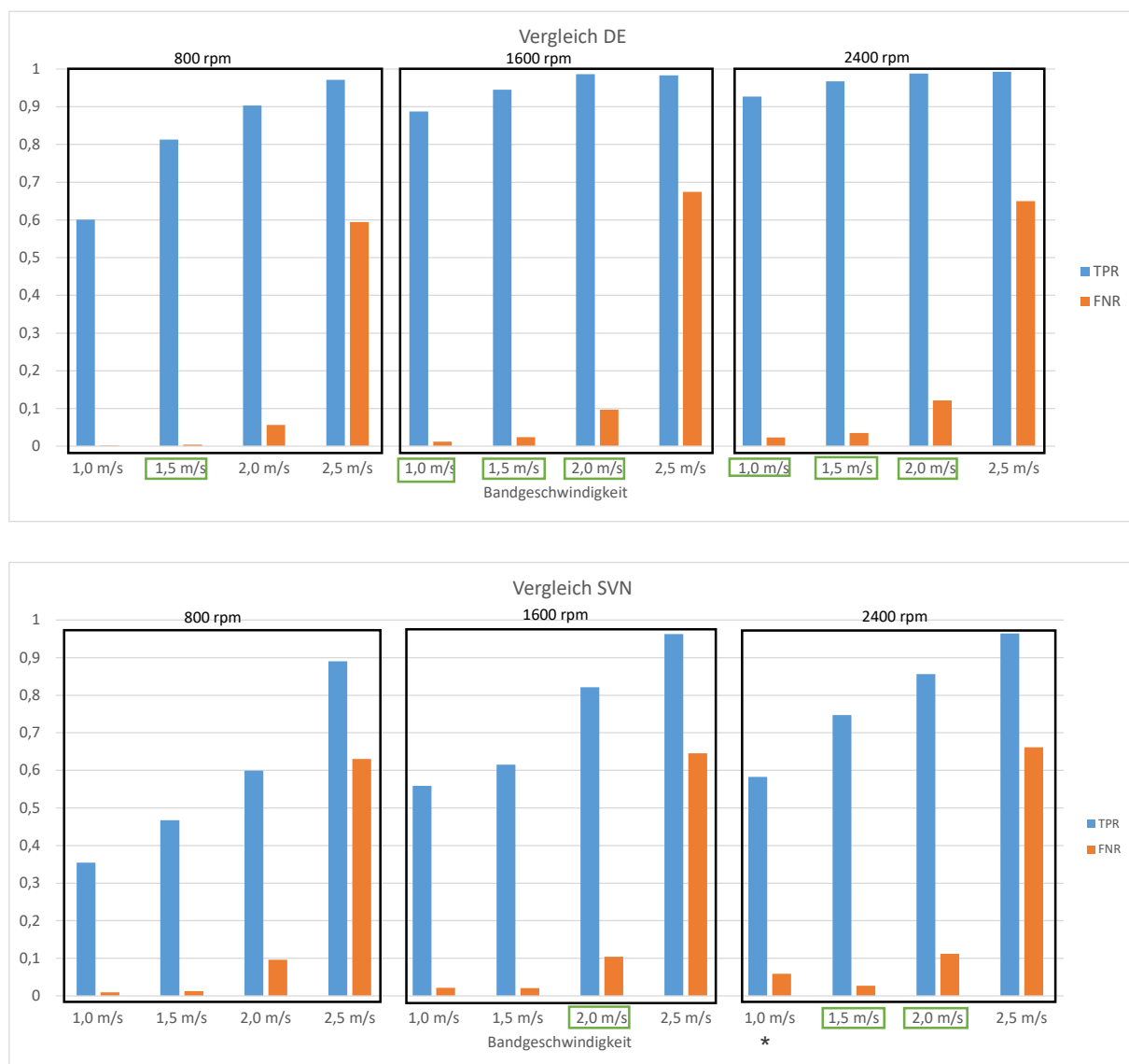


Abbildung 65: Quantifizierung des Sortierergebnisses mittels Vergleiches von TPR (blau) und TNR (orange) für die Mischung DE (oberes Diagramm) und Mischung SVN (unteres Diagramm).

Die besten Ergebnisse für die Mischung DE werden, laut oberem Diagramm in Abbildung 65, bei bestimmten Kombinationen von Polradgeschwindigkeit und Bandgeschwindigkeit erreicht (siehe grüne Markierungen). Diese Kombinationen von TPR und TNR sind am besten, da sowohl die TPR als auch die TNR über 0,9 (oder knapp dran) ist und somit ein hohes Ausbringen bei wenig Störstoffen im Produkt gewährleistet ist. Bei einer Bandgeschwindigkeit von 2,5 m/s war die TNR immer schlecht. Dies liegt daran, dass bei einer hohen Bandgeschwindigkeit viele Proben aufgrund der hohen Beschleunigung fälschlicherweise in den Eject-Strom ausgebracht werden.

Die besten Ergebnisse werden beim deutschen Material somit bei hohen Polradgeschwindigkeiten (1.600 und 2.400 rpm) und mittleren Bandgeschwindigkeiten (bis 2,0 m/s) erzielt.

Bei Betrachtung des unteren Diagrammes in Abbildung 65 ist auffällig, dass die Ergebnisse schlechter als bei der Mischung DE ausfallen, da nicht viele gute Kombinationen (hohe Werte von beiden) von TPR und TNR vorhanden sind (siehe grüne Markierung). Besonders schlechte Kombinationen der TPR- und TNR-Werte werden bei einer Bandgeschwindigkeit von 1,0 m/s und 2,5 m/s erzielt.

Bei einer schlechten Kombination von TPR und TNR wäre es nun möglich, die Einstellungen des Wirbelstromscheiders so zu steuern, dass die Kombination besser wird. Da beim Vergleich der beiden Mischungen unterschiedliche Einstellungen zum besten Ergebnis führten, könnte man eine Steuerung der Parameter des Wirbelstromscheiders dazu nutzen, um auf unterschiedliche Inputzusammensetzungen zu reagieren.

4.3.4 Pouches

Da nach Gesprächen mit Personen aus dem Fachbereich Pouch-Material als besonders problematisch benannt wurde, da es weder in der Metallfraktion noch in den Kunststofffraktionen im weiteren Recycling gewünscht ist, wurde dieses Material vertieft untersucht. Zunächst wird das Trennverhalten des Pouch-Materials in simultanen Versuchen analysiert, welche bei den Vorversuchen mit reinem Probenmaterial durchgeführt wurden. Anschließend wird das Verhalten der Pouches bei den Hauptversuchen in den Mischungen SVN und DE genauer untersucht.

Versuche nur mit Pouch

Die durchgeführten Versuche waren ident zu den in 3.2.3 beschriebenen und auch die Bewertung der Videos erfolgte ident. In Abbildung 66 sieht man die Veranschaulichung der Bewertungsergebnis der Videos.

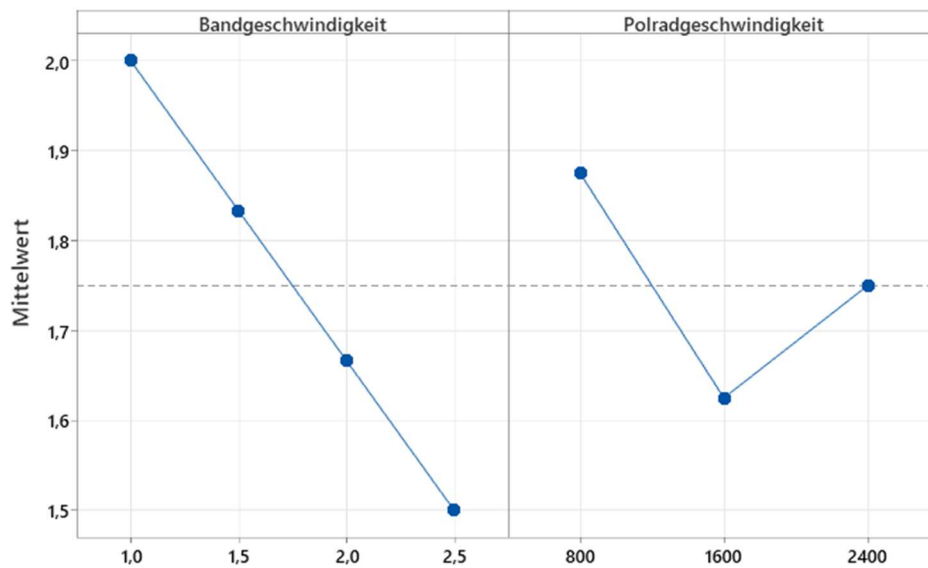


Abbildung 66: Haupteffektediagramm für die Bewertung des Trennerfolges der Pouches (Skala von 1: sehr gut bis 4: sehr schlecht).

Bei Betrachtung der Abbildung 66 fällt auf, dass der Trennerfolg mit steigender Bandgeschwindigkeit besser wurde. Außerdem ist bei einer Polradgeschwindigkeit von 1.600 rpm das beste Ergebnis zu beobachten und bei 800 das schlechteste Ergebnis. Dies ist damit zu begründen, dass die leichten Pouches mehr beschleunigt und abgestoßen werden müssen, um sie über den Trennscheitel abzuschneiden.

In Abbildung 67 ist der Einfluss der Wechselwirkungen zwischen den Versuchsparametereinstellungen dargestellt. Die beste Bewertung erfolgte, wenn eine hohe Bandgeschwindigkeit mit einer hohen Polradgeschwindigkeit kombiniert wurde. Im Vergleich zu den Ergebnissen der anderen Versuche mit reinem Material aus den Vorversuchen zum Wirbelstromscheider in Kapitel 4.2 wurden bei Pouch auch bei hohen Bandgeschwindigkeiten gute Ergebnisse erzielt. Bei den Vorversuchen wurden für das andere Material die besten Ergebnisse bei hohem Polradgeschwindigkeiten und Bandgeschwindigkeit bis zu 2,0 m/s (1,5 m/s am besten) erzielt.

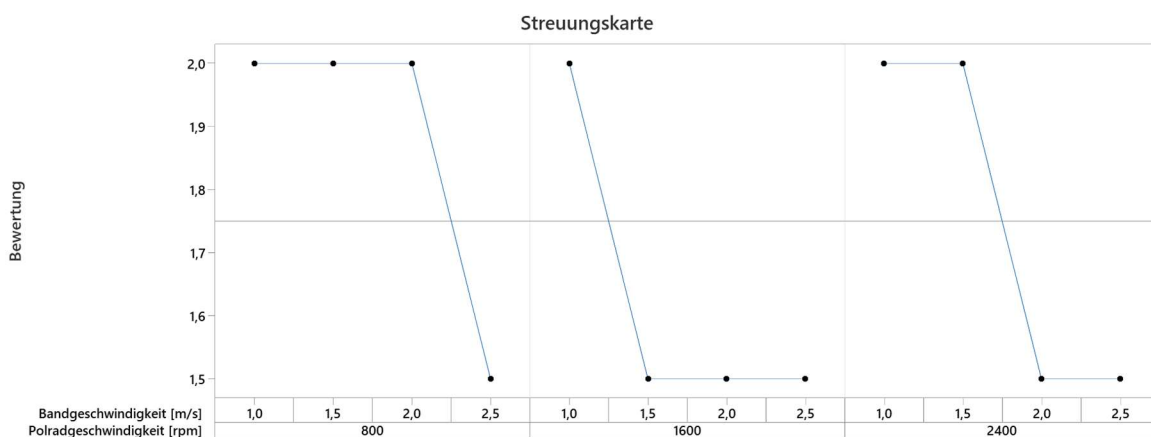


Abbildung 67: Streuungskarte für die Bewertung der Sortierung von Pouches.

Ergebnisse Hauptversuche zu Pouch

Einige interessante Beobachtungen zu den Pouches wurden schon in Kapitel 4.3.3 analysiert und diese sollen hier vertieft werden. In Abbildung 68 sieht man für beide Mischungen die prozentuelle Verteilung, d.h., welcher Anteil des Materials je Versuch im Eject (orange) oder Drop (blau) gelandet ist.

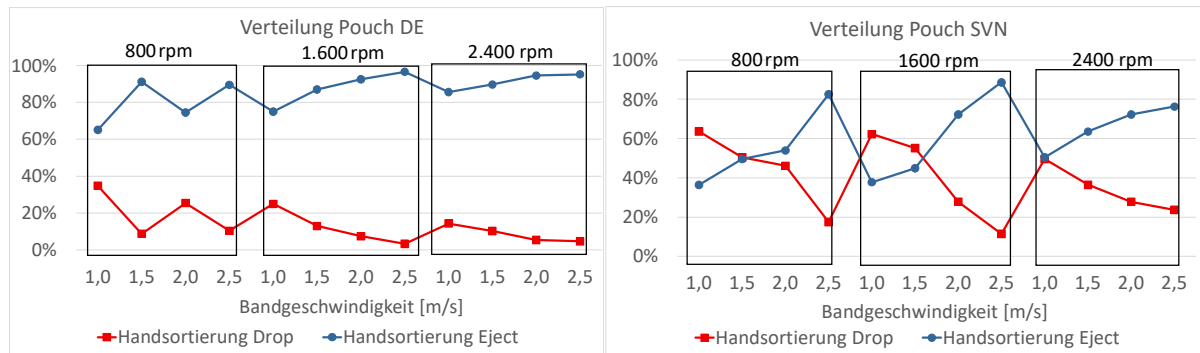


Abbildung 68: Prozentuelle Verteilung der Pouches in den beiden Strömen für die Mischung DE (links) und die Mischung SVN (rechts).

In Abbildung 68 ist zu erkennen, dass der Großteil der Pouches des deutschen Materials im Eject ausgetragen werden. Wie schon in Kapitel 4.3.3 analysiert, erhöht sich mit steigender Bandgeschwindigkeit auch der Anteil an Pouch, welcher in den Eject-Strom kommt.

Bei der Mischung SVN besteht eine höhere Fluktuation in Abhängigkeit der Band- und Polradgeschwindigkeiten. Bei 1,0 m/s landet sogar mehr Pouch im Drop als im Eject. Der Trend, dass der Anteil von Pouch im Eject wie zuvor mit der Bandgeschwindigkeit steigt, besteht ebenfalls und ist beim slowenischen Material stärker ausgeprägt.

Weiters fällt auf, dass mit steigender Polradgeschwindigkeit bei jeweils gleicher Bandgeschwindigkeit meist mehr Pouches im Eject-Strom zu finden sind. Die Ausnahme bilden die beiden Kombinationen der Versuchsparametereinstellungen von 1.600 rpm und 1,5 m/s, sowie 2.400 rpm und 2,5 m/s.

Abschließend kann festgestellt werden, dass ein selektives Austragen der Pouches nicht möglich ist.

In Abbildung 69 ist zusätzlich zu sehen, dass ungefähr 20 % an Pouches kontinuierlich über alle Versuche hinweg ungewollt im Feingut ausgetragen wurden. Dies kann die Ergebnisse leicht beeinflussen, da bei späteren Versuchen die Inputzusammensetzung leicht verändert ist. Dieser Effekt wird aber als vernachlässigbar eingestuft.



Abbildung 69: Big-Bag des Feinfraktion Austrages nach allen Durchgängen mit der Mischung DE.

4.3.5 Stoffstrommonitoring

Im kommenden Kapitel werden die Ergebnisse des Stoffstrommonitorings, wie in 3.3.4 beschrieben, mittels Metallsensor für die Sortierung der beiden Input-Mischungen einzeln betrachtet. Dabei wird insbesondere untersucht, inwiefern sich die ABAS-Metallsensoren für eine Steuerung des Wirbelstromscheiders im Anlagenbetrieb eignen könnten. Abschließend wird auf eine Verstopfung des Materials am Förderband und seine Auswirkungen auf die detektierten Daten eingegangen.

Mischung DE

In Abbildung 70 sind die erkannten Pixel für alle Versuchsparameter für die Mischung DE zu sehen. Dabei fällt auf, dass bei einer Polradgeschwindigkeit von 800 rpm und 1.600 rpm die detektierten Pixel im Eject (Sensor 2, blau) steigen. Gegenleich dazu sinken die Pixel im Drop (Sensor 1, rot). Bei einer Polradgeschwindigkeit von 2.400 rpm sinken die Pixel im Drop ebenso. Die erkannten Metallpixel bei 2.400 rpm im Eject (Sensor 2, blau) sinken allerdings mit zunehmender Geschwindigkeit ebenfalls, mit Ausnahme von 2,5 m/s. Ein Grund hierfür könnte sein, dass eine Polradgeschwindigkeit von 2.400 rpm zu hoch ist, die Objekte dadurch zu viel Rotation bekommen und den Trennscheitel dadurch nicht passieren können.

Außerdem fällt bei hohen Polradgeschwindigkeiten auf, dass die Summe der detektierten Metallpixel aus Drop und Eject kleiner ist als bei niedrigen Polradgeschwindigkeiten. Dies könnte den Grund haben, dass bei hohen Polradgeschwindigkeiten die Metalle die Kunststoffe mit in das Eject reißen. Aufgrund der Größe der Kunststoffobjekte könnten die Metalle auf diesen liegen bleiben und so nicht detektiert werden. Diese Aussage wurde bei Durchsicht der Videos der Outputbänder bestätigt, da eine hohe Bandbelegung und auch Überlagerungen der Objekte zu erkennen sind.

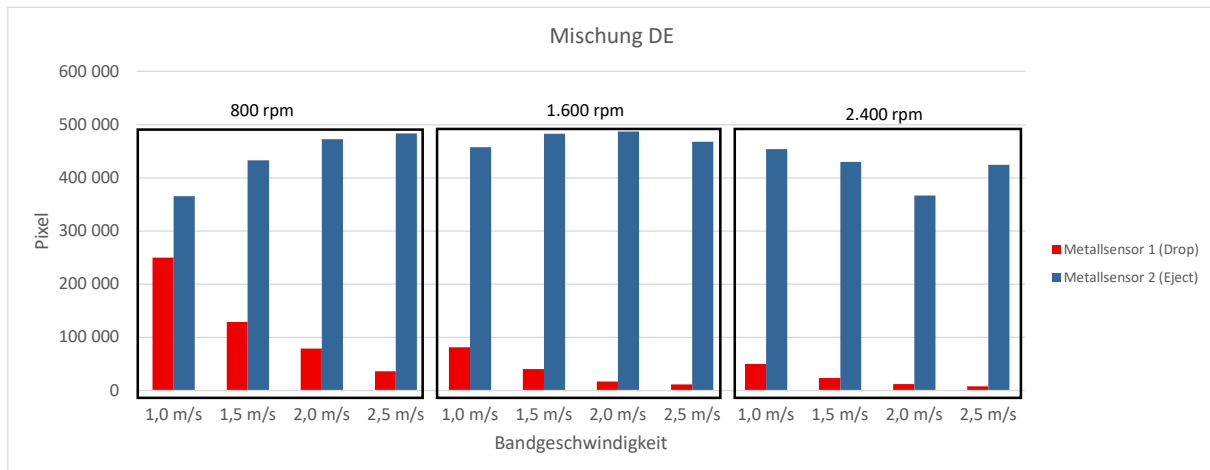


Abbildung 70: Erkannte Pixel je Metallsensor für die Mischung DE bei verschiedenen Maschineneinstellungen (rot: Metallsensor 1 im Drop, blau: Metallsensor 2 im Eject).

In Abbildung 71 ist der zeitliche Verlauf der erkannten Pixel der beiden Metallsensoren für einen exemplarischen Versuch dargestellt. Die Pixel im Eject steigern sich bis zu ihrem Maximum kontinuierlich, bis sie dann nach dem Maximum wieder kontinuierlich sinken. Beim Drop ist die Anzahl der detektierten Metallpixel über den Zeitraum annähernd konstant.

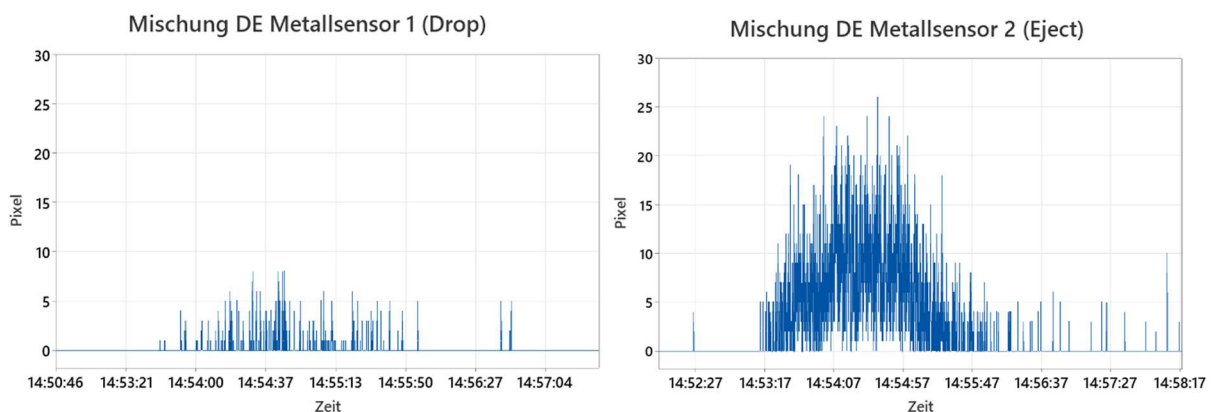


Abbildung 71: Zeitlicher Verlauf der detektierten Pixel bei einer Bandgeschwindigkeit von 1,5 m/s und einer Polradgeschwindigkeit von 2.400 rpm für die Mischung DE. Links: Metallsensor 1 (Drop), rechts: Metallsensor 2 (Eject).

Die Wechselwirkung zwischen den zwei Versuchsparametern Bandgeschwindigkeit und Polradgeschwindigkeit ist in Abbildung 72 in Form eines Wechselwirkungsdiagramm für beide Metallsensoren dargestellt. Bei Betrachtung des Drop-Stromes (Sensor 1, links) fällt auf, dass eine geringere Bandgeschwindigkeit einen geringeren Metallgehalt im Drop bewirkt. Das bedeutet ein höheres Ausbringen und somit ein besseres Ergebnis. Beim Eject-Strom (Sensor 2, rechts) sieht man gut, dass die Ergebnisse immer von einer Kombination von Polradgeschwindigkeit und Bandgeschwindigkeit abhängig sind. Es kann jedoch nicht unabhängig bestimmt werden, welche die beste Polrad- oder Bandgeschwindigkeit ist. Die Kombinationen 2,5 m/s mit 800 rpm, 2,0 m/s mit 800rpm, 2,0 m/s mit 1.600 rpm und 1,5 m/s mit 1.600 rpm ergeben die besten Ergebnisse.

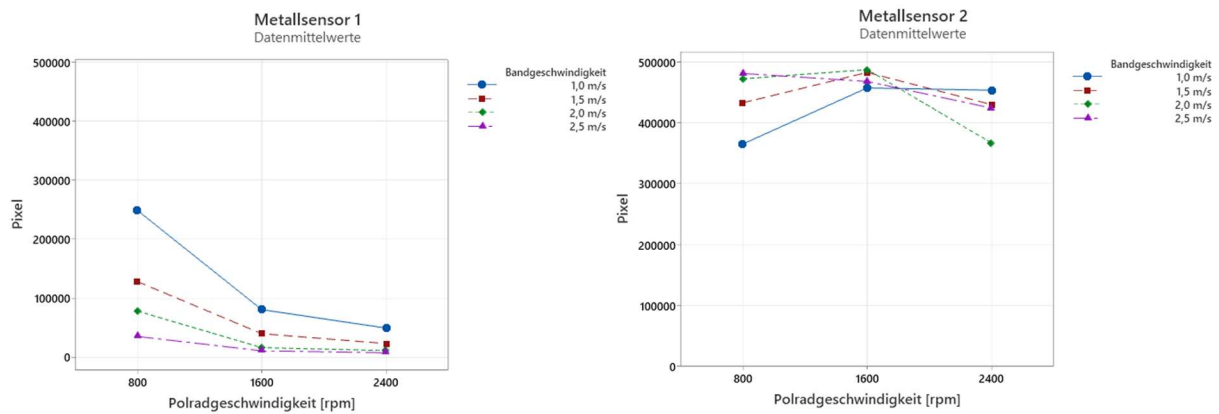


Abbildung 72: Wechselwirkungsdiagramm der Pixel für die Mischung DE für beide Sensoren. Links: Metallsensor 1 (Drop), rechts: Metallsensor 2 (Eject).

Mischung SVN

Die Summe der detektierten Metallpixel für alle Versuchsparameter der Mischung SVN sind der Abbildung 73 zu entnehmen.

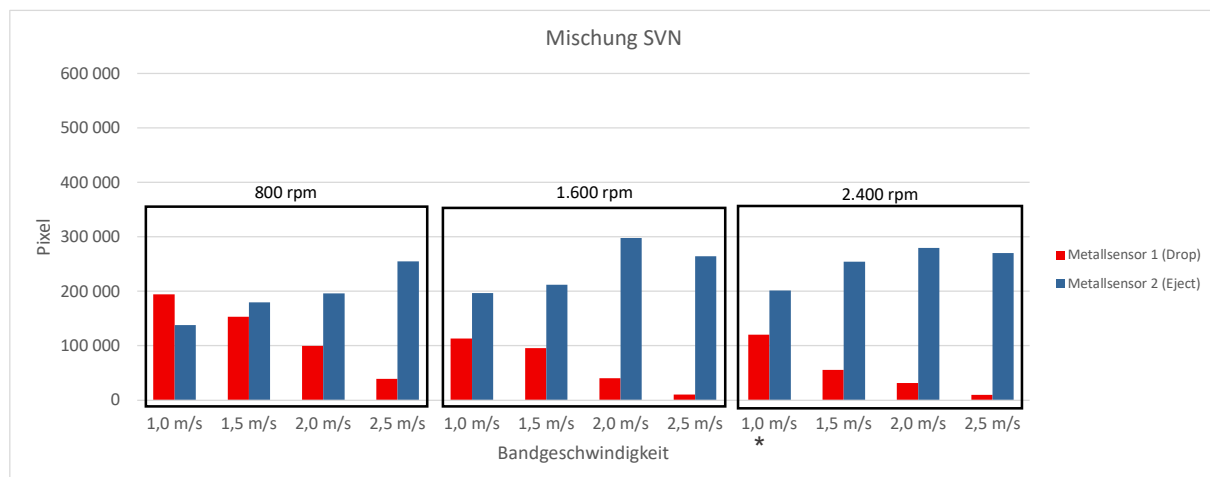


Abbildung 73: Erkannte Pixel für beide Sensoren für die Mischung SVN (rot: Metallsensor 1 im Drop, blau: Metallsensor 2 im Eject).

Bei Erhöhung der Bandgeschwindigkeit steigt bei der Mischung SVN, wie in Abbildung 73 dargestellt, die Anzahl der detektierten Pixel im Eject (Sensor 2, blau). Im Gegensatz zur Mischung DE ist dies auch bei einer Polradgeschwindigkeit von 2.400 rpm der Fall. Bei einer Polradgeschwindigkeit von 1.600 rpm und 2.400 rpm ist bei einer Bandgeschwindigkeit von 2,5 m/s allerdings ein Rückgang der detektierten Pixel im Eject (Sensor 2, blau) zu beobachten. Dies könnte die Ursache haben, dass zu viel Material auf einmal ausgetragen wird, dadurch auf dem Förderband des Metallsensors keine Vereinzlung besteht und somit nicht alle Metalle optimal detektiert werden können.

Im Vergleich zur Mischung DE landen bei der Mischung SVN prozentuell gesehen mehr Metalle im Drop (Sensor 1, rot). Eine Ursache hierfür könnte sein, dass aufgrund des vorhandenen Folienmaterial bei der Mischung SVN, welches sich oft am Trennscheitel

angestaut hat, einige Metallproben darin hängengeblieben oder abgeprallt sind und dadurch irrtümlicherweise im Drop gelandet sind.

Der zeitliche Verlauf der detektierten Metallpixel ist exemplarisch in Abbildung 74 ersichtlich. Der Unterschied der detektierten Pixel im Eject (Sensor 2) und Drop (Sensor 1) ist hier nicht so groß, wie bei der Mischung DE. Dies unterstreicht auch die vorherige Aussage, dass mehr Metalle im Drop landen. Außerdem sieht man, dass sich beim Beispiel der Mischung SVN, das Maximum nicht so stark vom Rest unterscheidet und die Pixel kontinuierlicher detektiert werden.

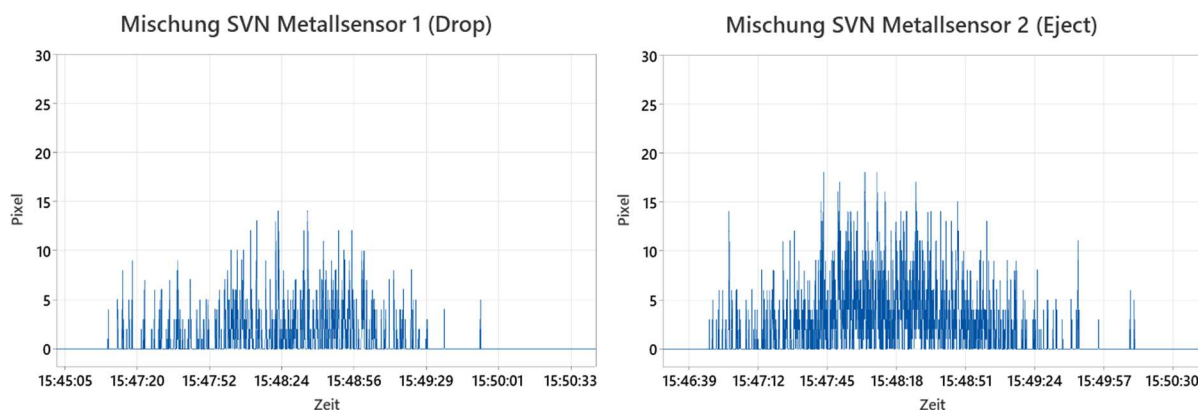


Abbildung 74: Zeitlicher Verlauf der detektierten Pixel bei einer Bandgeschwindigkeit von 1.5 m/s und einer Polradgeschwindigkeit von 1.600 rpm für die Mischung SVN. Links: Metallsensor 1 (Drop), rechts: Metallsensor 2 (Eject).

Die Wechselwirkung zwischen den zwei Versuchsparametern Bandgeschwindigkeit und Polradgeschwindigkeit ist in Abbildung 75 in Form eines Wechselwirkungsdiagramm für beide Metallsensoren dargestellt. Bei Betrachtung der Ergebnisse des Ejects (Sensor 2, rechts) fällt auf, dass bei der Kombination von den Polradgeschwindigkeiten 1.600 rpm und 2.400 rpm mit den Bandgeschwindigkeiten 2,0 m/s und 2,5 m/s die meisten Metallpixel detektiert werden und somit das beste Ergebnis erzielt wird. Dabei ist der Maximalwert bei einer Polradgeschwindigkeit von 1.600 rpm und einer Bandgeschwindigkeit von 2,0 m/s. Im Drop (Sensor 1, links) gilt für die Mischung SVN, wie schon für die Mischung DE, je höher die Bandgeschwindigkeit, desto weniger Metallpixel werden im Drop detektiert und desto besser ist das Ergebnis.

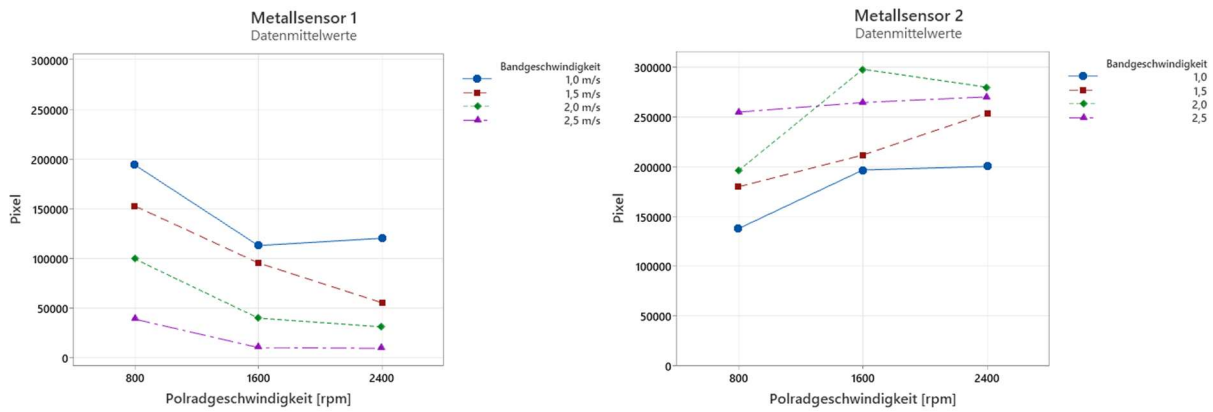


Abbildung 75: Wechselwirkungsdiagramm der Pixel für die Mischung SVN für beide Sensoren. Links: Metallsensor 1 (Drop), rechts: Metallsensor 2 (Eject).

Verstopfung

Bei dem Versuchsdurchgang mit Polradgeschwindigkeit 2.400 rpm und Bandgeschwindigkeit 1,0 m/s kam es bei der Mischung SVN aufgrund des hohen Folienanteils zu einer Verstopfung bei der Zuleitung zum Beschleunigungsband vor dem Wirbelstromscheider. In Abbildung 76 ist die Situation in der roten Markierung dargestellt. Die Verstopfung begann bei einer Polradgeschwindigkeit von 1.600 rpm mit einer Bandgeschwindigkeit von 2,5 m/s und wurde erst bei einer Polradgeschwindigkeit von 2.400 rpm mit einer Bandgeschwindigkeit von 1,5 m/s vollständig gelöst.

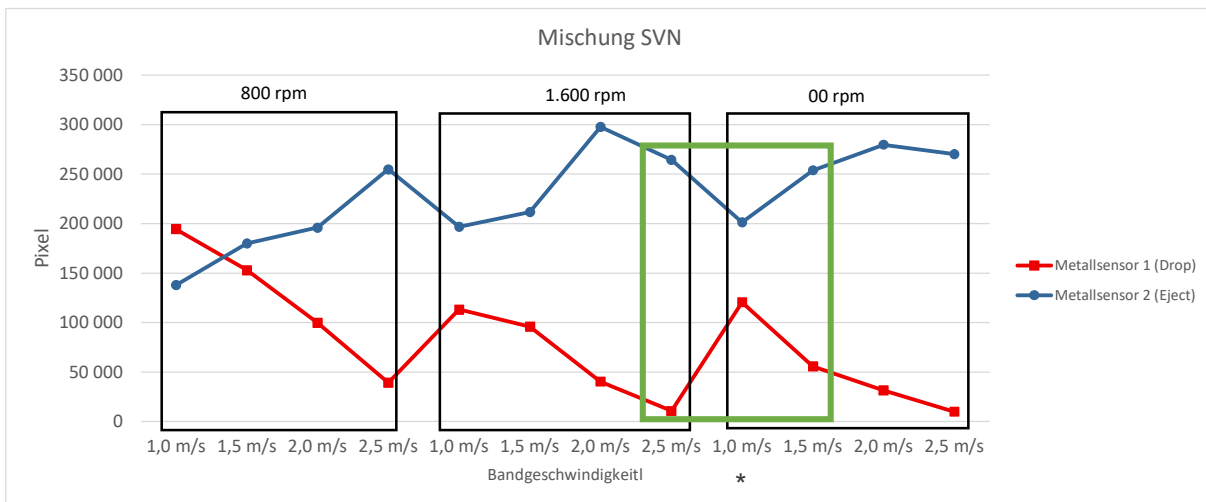


Abbildung 76: Detektierte Pixel beider Sensoren zur Veranschaulichung einer Verstopfung (rot: Metallsensor 1 im Drop, blau: Metallsensor 2 im Eject).

In Abbildung 76 kann man bei einer Polradgeschwindigkeit von 1.600 rpm erkennen, dass trotz Erhöhung der Bandgeschwindigkeit auf 2,5 m/s weniger Metallpixel im Eject (Sensor2, blau) detektiert wurden. Dies widerspricht dem Trend bei einer Polradgeschwindigkeit von 800 rpm, bei dem die detektierten Pixel beim Sprung auf 2,5 m/s gestiegen sind und somit kann dies den Beginn einer Verstopfung andeuten (grüne Markierung).

Bei der Verstopfung bei der Polradgeschwindigkeit 2.400 rpm und der Bandgeschwindigkeit 1,0 m/s ist zu erkennen, dass die detektierten Pixel in Eject (Sensor 2, blau) ein Minimum haben. Beim Vergleich mit der Mischung DE (vgl. Abbildung 70) fällt auf, dass bei einer Polradgeschwindigkeit von 2.400 rpm und bei der Bandgeschwindigkeit 1,0 m/s sogar die meisten Pixel innerhalb dieser Polradgeschwindigkeit im Eject detektiert wurden. Dies deutet nun darauf hin, dass die Verstopfung für die wenig erkannten Metallpixel verantwortlich ist. Somit zeigt sich, dass eine Verstopfung mit Stoffstromüberwachung frühzeitig erfasst werden kann.

In nachfolgender Abbildung 77 ist der zeitliche Verlauf der detektierten Pixel für die Mischung SVN vor (obere Diagramme, 1.600 rpm und 2,5 m/s) und während (untere Diagramme, 2.400 rpm und 2,5 m/s) einer Verstopfung zu sehen. Zunächst sind keine besonderen Auffälligkeiten zu erkennen (obere Diagramme). Im Vergleich dazu ist bei dem Durchgang mit der Verstopfung (untere Diagramme) gut zu erkennen das Metallpixel immer in einem Schwall erkannt werden, nämlich wenn Material von der Verstopfung gelöst wird. Dies könnte auch der Grund für die weniger detektierten Pixel sein, da durch den schwallartigen Austrag zu viel Material auf einmal am Detektionsband ankommt, wo durch die fehlende Monoschicht bzw. Vereinzlung eine schlechtere Detektion entsteht. Würden nun plötzlich weniger oder gar keine Partikel den Wirbelstromscheider passieren, könnte dies im Betrieb vom Metallsensor erkannt werden und es könnte darauf reagiert werden.

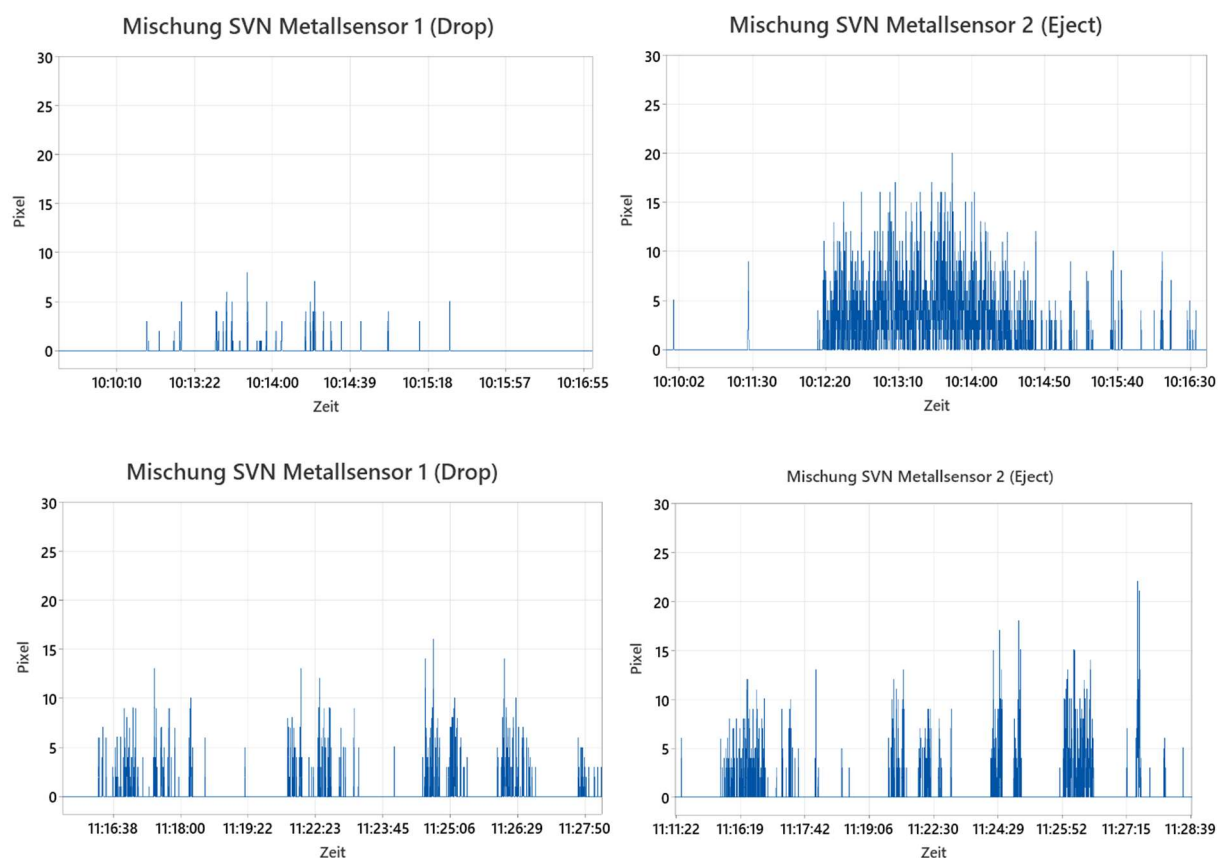


Abbildung 77: Zeitlicher Verlauf der detektierten Pixel bei einer Bandgeschwindigkeit von 2.5 m/s und einer Polradgeschwindigkeit von 1.600 rpm für die Mischung SVN. Oben: kurz vor

der Verstopfung, unten: während der Verstopfung; links: Metallsensor 1 (Drop), rechts: Metallsensor 2 (Eject).

4.3.6 Validierung des Metallsensors für Stoffstrommonitoring

Ziel war es, wie in Kapitel 3.3.3 beschrieben, herauszufinden, ob die Werte der Metallsensoren mit jenen der Handsortierung korrelieren und somit die Metallsensoren für die Überwachung von Stoffströmen genutzt werden können. Im folgenden Kapitel geschieht also eine Bewertung des Metallsensors mithilfe der Ergebnisse der Handsortierung. Die Ergebnisse für das Wertstoffausbringen ins Eject auf Basis des Metallsensors (blau) und der Handsortierung (orange) sind in Abbildung 78 dargestellt.

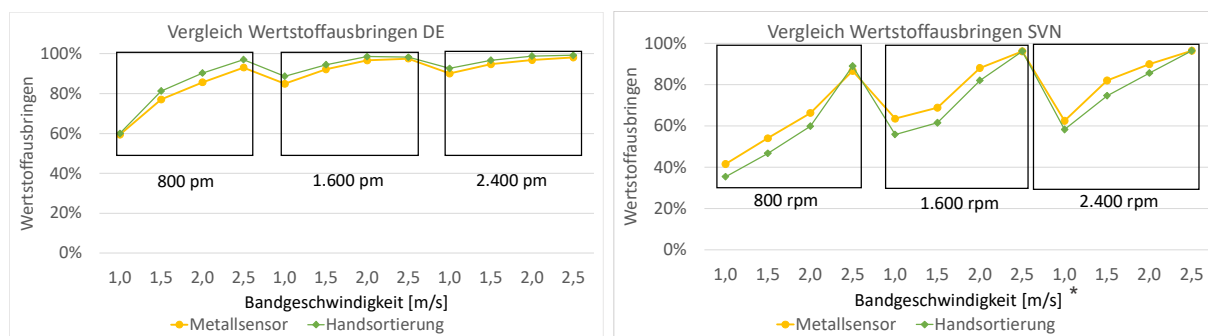


Abbildung 78: Vergleich des Wertstoffausbringens der Handsortierung mit dem des Metallsensor für die Mischung DE (links) und Mischung SVN (rechts).

Bei Betrachtung von Abbildung 78 ist zu erkennen, dass das Wertstoffausbringen auf Basis der Handsortierung dem auf Basis der Metallsensoren ähnlich ist und die Trends bezogen auf die Bandgeschwindigkeit gleichermaßen auftreten. Bei Vergleich der Mischung DE (linkes Diagramm) und SVN (rechtes Diagramm) fällt auf, dass bei DE das Wertstoffausbringen der Handsortierung leicht höher (maximal +4,66 %) als jenes des Metallsensors ist, während bei SVN das Wertstoffausbringen der Handsortierung leicht niedriger (maximal -7,62 %) ist als jenes des Metallsensors. Bei der Mischung SVN waren vermehrt Folien in der Mischung, dies hat öfters zu einer Sammlung von Material an der Trennscheitel geführt. Dadurch wurde dieses Gut dann schwallweise gelöst und dadurch könnten Überlagerungen am Förderband entstanden sein, welche der Sensor nicht alle erfasst hat. Um die Wirbelstromscheidung und auch ihre Überwachung korrekt durchzuführen, dürfen keine oder nur wenige Folien im Produktstrom vorhanden sein.

Bei der Mischung SVN ist auffällig, dass der Abstand zwischen der Handsortierung und dem Metallsensor bis zu einer Bandgeschwindigkeit von 2,5 m/s immer geringer wird. Dies ist auch beim deutschen Material für Polradgeschwindigkeiten ab 1.600 rpm zu beobachten. Bei der Mischung DE (links) hat die Handsortierung ein besseres Wertstoffausbringen und bei der Mischung SVN (rechts) hat der Metallsensor ein besseres Wertstoffausbringen. Die in diesen Absatz beschriebenen Beobachtungen sind beide auf unterschiedliche Materialzusammensetzung zurückzuführen und die Ursachen müssen in weiteren Versuchen näher untersucht werden.

Im Gegensatz zum relativen Wert des Wertstoffausbringens sieht man in Abbildung 79 den Vergleich von absoluten Werten für die Menge an Eject (oben) und Drop (unten) erfasst durch den Metallsensor (gelb) und die Handsortierung für beide Mischungen.

Es ist auffällig, dass sowohl im Eject (oben) als auch im Drop (unten) bei der Mischung SVN (links) größere Abweichungen der Kurven vorhanden sind als bei der Mischung DE. Bei der Mischung SVN (rechts) sind die größten Differenzen im Eject-Strom jeweils bei einer Bandgeschwindigkeit von 2,5 m/s zu finden sind. Im Drop ist dies genau umgekehrt, somit herrscht die größte Differenz zwischen Handsortierung (grün) und Metallsensor (gelb) bei einer Bandgeschwindigkeit von 1,0 m/s. Dies ist auf die Materialzusammensetzung zurückzuführen und die Ursachen müssen in weiteren Versuchen näher untersucht werden.

Wie schon bei Ausbringen in Abbildung 78, ist auch in Abbildung 79 bei der Mischung DE die Metallsensorkurve (gelb) oberhalb der Handsortierungskurve (grün) zu finden. Bei der Mischung SVN ist das Gegenteil der Fall und somit ist die Handsortierungskurve (grün) über der Metallsensorkurve (gelb). Dies ist auf die Materialzusammensetzung zurückzuführen und die Ursachen müssen in weiteren Versuchen näher untersucht werden.

Aufgrund der hohen Korrelation der Daten von der Handsortierung und des Metallsensors, kann der Metallsensor zur Stoffstromüberwachung verwendet werden.

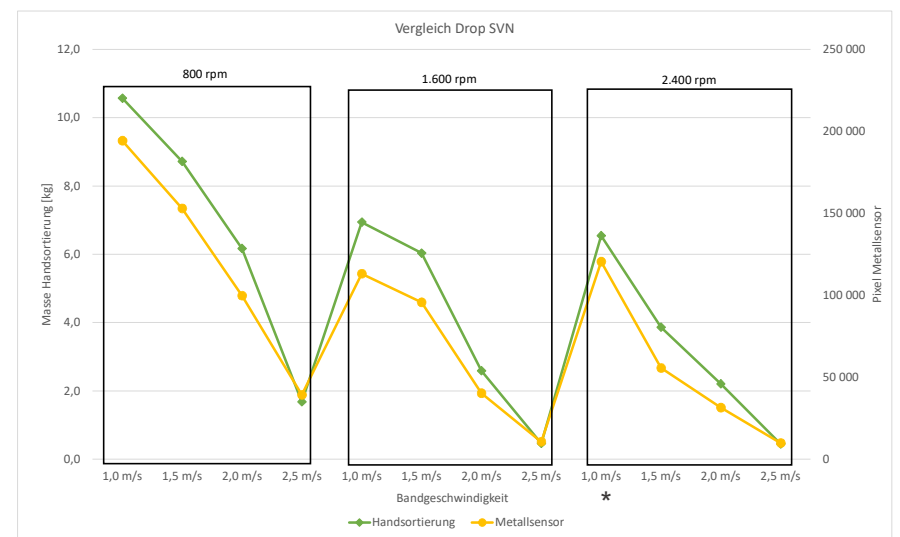
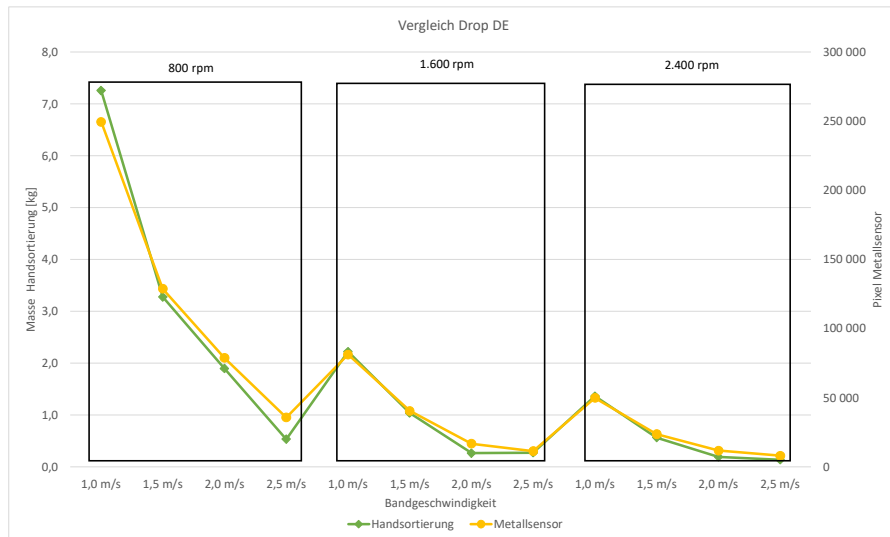
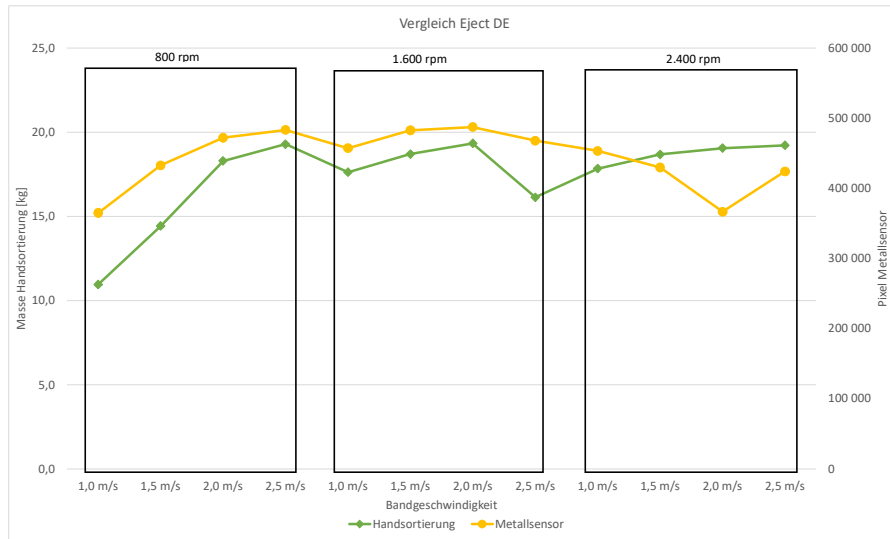


Abbildung 79: Vergleich der Handsortierung mit dem Metallsensor für den Eject (oben) und Drop-Strom (unten) der Mischung DE (links) und SVN (rechts). (gelb: Metallsensor, grün: Handsortierung).

Um zu untersuchen, wie gut der Metallsensor die Einflüsse verschiedener Parameter quantifizieren kann, wurde in Minitab ein Haupteffektdiagramm für den Eject- (vgl. Abbildung 80 obere Diagramme) und Drop-Strom erstellt (vgl. Abbildung 80 untere Diagramme).

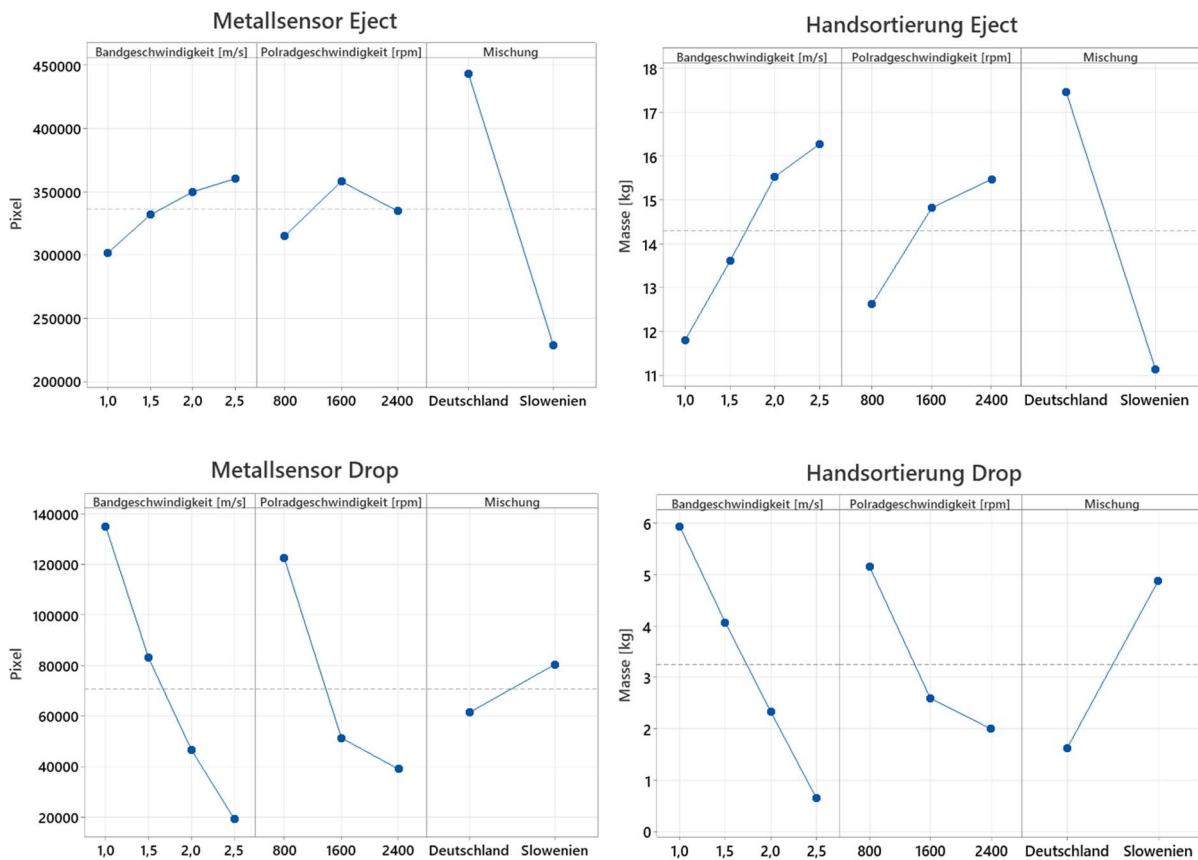


Abbildung 80: Vergleich der Pixel des Metallsensors (links) und mit der Masse der Handsortierung (rechts) für den Eject- und Drop-Strom.

Die Kurvenverläufe des Metallsensors im Vergleich zur Handsortierung sind gemäß Abbildung 80 für beide Ströme sehr ähnlich. Für den Metallsensor im Eject wäre 1.600 rpm die beste Einstellung, um mehr Pixel zu erkennen und laut Handsortierung im Eject wäre eine Polradgeschwindigkeit von 2.400 rpm die beste Einstellung. Für den Drop Strom korrelieren die Kurvenverläufe aller Parameter gut miteinander.

Allgemein lässt sich, wie bereits in Kapitel 4.3.5 beschrieben, feststellen, dass bei höherer Band- und Polradgeschwindigkeit mehr Pixel im Eject detektiert werden und somit das Trennergebnis besser ist.

Wie schon in der zuvor beschriebenen Abbildung 78 und Abbildung 79, zeigt Abbildung 80 die gute Korrelation der Ergebnisse und somit die gute Eignung zur Stoffstromüberwachung und infolgedessen zur Stoffstromsteuerung.

5 Zusammenfassung und Ausblick

Mit dem Kreislaufwirtschaftspaket gibt die Europäische Union die Recyclingziele für 2030 vor. Um diese Ziele zu erreichen, ist eine Maßnahme der Republik Österreich die einheitliche Sammlung von Leichtverpackungen inklusive Metallverpackungen. Um die dadurch entstehenden Mehrmengen an Metallverpackungen mit hohem Ausbringen und hoher Reinheit auszuschleusen, ist es notwendig den Wirbelstromscheider in LVP-Anlagen zu optimieren.

Zunächst wurden jeweils Vorversuche zum Metallsensor und zum Wirbelstromscheider durchgeführt, um relevante Parameter zu ermitteln. Bei den Hauptversuchen im Technikumsmaßstab wurden die Outputströme eines Wirbelstromscheidungers mithilfe eines Metallsensors überwacht. Ziel dieser Arbeit ist es nun herauszufinden, ob es möglich ist, mithilfe von Metallsensoren die optimalen Einstellungen des Wirbelstromscheidungers zu finden und diesen auf Basis der Sensordaten zu steuern. Eine Stoffstromüberwachung von MVA-Schlacke an einem Wirbelstromscheider wurde bereits von Bunge (2018) und Rahman und Bakker (2013) durchgeführt. Eine systematische Überwachung mit LVP-Material am Wirbelstromscheider wurde jedoch noch nicht durchgeführt.

Für das Stoffstrommonitoring wurde der ABAS-Metallsensor von EVK DI Kerschhagl GmbH genutzt. Bei den Vorversuchen zum Metallsensor wurde festgestellt, dass bei einem geringem Threshold und einer geringen minimalen Objektgröße die besten Detektionsergebnisse erzielt wurden. Noch dazu ist zu beobachten, dass bei einer geringeren minimalen Objektgröße die Streubreite geringer ist als bei größeren Werten der minimalen Objektgröße. Es wurde auch beobachtet, dass sich die verschiedenen Orientierungen der Objekte am Band auf die detektierten Pixel auswirken. Außerdem ist die Art des Materials insofern wichtig, dass die jeweilige Form, Größe und Deformation und die daraus resultierende Auflagefläche, die Anzahl der detektierten Pixel bestimmt.

Die Vorversuche zum Wirbelstromscheider haben ergeben, dass die Polrad- und Bandgeschwindigkeit die wichtigsten Parameter für eine sensorbasierte Aggregatsteuerung sind. Die Steuerung der Versuchsparameter Trennscheitelwinkel, Trennscheitelposition und Polradposition ist im laufenden Betrieb schwieriger umsetzbar als die Steuerung der Band- und Polradgeschwindigkeit. Außerdem haben die Vorversuche ergeben, dass die Polradposition keinen relevanten Einfluss auf das Trennergebnis hat.

Bei den Versuchen im Technikumsmaßstab war die Erkennung derselben Objekte entlang der Förderbandbreite nicht konstant. Objekte weiter rechts am Band wurden im Mittel schlechter erkannt. Die Hypothese für dieses Phänomen ist, dass die Sensoren leicht schief eingebaut waren, da die Detektion stark von der Distanz zum Metallsensor abhängig ist.

Die Auswertung der Sensordaten hat gezeigt, dass es möglich ist ein lineares Modell für den Zusammenhang zwischen Gewicht und Anzahl detektierter Pixel zu finden. Die Korrelation auf Basis einer Stichprobe ist allerdings nicht geeignet. Hingegen wurde bei der stoffstrombasierten linearen Regression ein gutes Bestimmtheitsmaß von 0,9988 erzielt. Für

die Praxis ist es daher von großer Relevanz, die Korrelation auf Basis einer großen Datenmenge zu erstellen.

Die Handsortierung hat gezeigt, dass es ein Optimierungspotential durch eine sensorbasierte Aggregatsteuerung gibt. Grund hierfür ist, dass es je nach Kombination der Parameter unterschiedliche Ergebnisse erzielt worden sind. Außerdem ergeben sich für die untersuchten Stoffstromzusammensetzungen, jeweils unterschiedliche beste Parameterkombinationen. Dies zeigt, dass mit einer Steuerung der Parameter auf eine unterschiedliche Stoffstromzusammensetzung reagiert werden kann.

Die gute Korrelation der Metallsensordaten mit jenen der Handsortierung zeigt, dass Stoffstrommonitoring mit Metallsensoren möglich ist. Die maximale Abweichung zwischen Wertstoffausbringen beim Metallsensor und der Handsortierung beträgt bei der Mischung DE 4,66 % und bei der Mischung SVN 7,62 %. Die durchschnittliche Abweichung bei dem Wertstoffausbringen bei der Mischung DE beträgt 2,50 % und bei der Mischung SVN 4,53 %:

Mit Metallsensoren allein ist es nicht möglich, Pouches von anderen leitfähigen Materialien zu unterscheiden und auch eine selektive Sortierung durch angepasste Parameter des Wirbelstromscheiders war nicht erfolgreich. Dies könnte durch eine mögliche mehrstufige Sortierung oder Sortierung basierend auf Sensorfusion möglich werden, was in weiteren Versuchsreihen untersucht werden müsste.

Während den Versuchen ist es bei dem Inputmaterial mit einem höheren Folienanteil zu einer Verstopfung gekommen. Die dabei aufgezeichneten Daten des Metallsensors haben ergeben, dass es möglich ist, die Verstopfung anhand der Abweichungen frühzeitig zu erkennen und somit darauf zu reagieren. Im Vergleich zu den anderen Durchgängen ist bei dem zeitlichen Verlauf der detektierten Pixel gut zu erkennen, das Metallpixel immer in einem Schwall erkannt werden, nämlich wenn Material von der Verstopfung gelöst wird. Demnach wäre Stoffstrommonitoring mittels Metallsensoren für die Erkennung von Verstopfungen vor dem Wirbelstromscheider geeignet.

Zusammenfassend kann gesagt werden, dass das Stoffstrommonitoring von Metallen im LVP-Abfall mit einem Metallsensor für konkrete Fragestellungen möglich ist. Es kann das Wertstoffausbringen bewertet und auf Unregelmäßigkeiten eingegangen werden. Die Versuchsergebnisse implizieren außerdem, dass die Steuerung der Parameter Polrad- und Bandgeschwindigkeit mittels Metallsensor möglich ist. Damit kann Stoffstrommonitoring zur Optimierung einer LVP-Anlage verwendet werden und dazu beitragen die Recyclingziele zu erreichen.

Ausblick

Um nicht nur Metallobjekte zu detektieren, wäre der nächste Schritt die NIR-Daten, welche bei den Versuchen ebenfalls aufgezeichnet wurden, zusätzlich auszuwerten. Für spezifische Fragestellungen bräuchte es Sensorfusion der Metallsensor- und NIR-Daten oder den zusätzlichen Einsatz von Künstlicher Intelligenz. Die Ergebnisse der Arbeit zeigen das Potential von Stoffstrommonitoring. Dieses könnte in einer Versuchsreihe im Anlagenbetrieb weiter untersucht werden.

6 Verzeichnisse

6.1 Literatur

- Antrekowitsch H. (2021) Metallrecycling - Sekundärmetallurgie von Aluminium. Skriptum zur Lehrveranstaltung im SS 2021 an der Montanuniversität Leoben.
- ARA (2022) Novelle von Abfallwirtschaftsgesetz und Verpackungsverordnung. [Online] <https://www.ara.at/news/novelle-von-abfallwirtschaftsgesetz-awg-und-verpackungsverordnung-vvo> [07.06.2022]
- Bilitewski B., Härdtle G. (2013) Abfallwirtschaft: Handbuch für Praxis und Lehre Berlin. 4.Auflage. Springer.Vieweg-Verlag. ISBN 978-3-540-79531-5 8 (eBook)
- BMK (2019) Sortierung und Recycling von Kunststoffabfällen in Österreich: Status 2019. [online] https://www.umweltbundesamt.at/fileadmin/site/publikationen/rep0744_hauptteil.pdf [17.01.2023]. Bundesministerium für Klimaschutz, Umwelt, Energie, Mobilität, Innovation und Technologie (BMK).
- BMK (2021a) Bundesgesetz über eine nachhaltige Abfallwirtschaft (Abfallwirtschaftsgesetz 2002 – AWG 2002). StF: BGBl. I Nr. 102/2002. [Online] <https://www.ris.bka.gv.at/GeltendeFassung/Bundesnormen/20002086/AWG%202002%2c%20Fassung%20vom%2015.01.2023.pdf> [15.01.2023]
- BMK (2021b) Die Bestandsaufnahme der Abfallwirtschaft in Österreich - Statusbericht 2021. [online] https://www.bmk.gv.at/themen/klima_umwelt/abfall/aws/bundes_awp/bawp.html [15.01.2023]
- BMK (2022a) Verlosung der Sammelregionen. [Online] https://www.bmk.gv.at/themen/klima_umwelt/abfall/Kreislaufwirtschaft/verpackungen/sammeln_verwerten/verlosung.html [18.01.2023]
- BMK (2022b) Verordnung des Bundesministers für Land- und Forstwirtschaft, Umwelt und Wasserwirtschaft über die Vermeidung und Verwertung von Verpackungsabfällen und bestimmten Warenresten (Verpackungsverordnung 2014). StF: BGBl. II Nr. 184/2014. Fassung vom 15.01.2023. DOI: 10.9785/ovs.9783504381530.2249.
- Böhm A. (2021) Aufbereitung von Ersatzbrennstoffen - Magnetscheidung im statischen und dynamischen Magnetfeld. Skriptum zu Lehrveranstaltung im SS 2021 an der Montanuniversität Leoben.
- Bunge R. (2018) Selbstoptimierender Wirbelstromscheider. Publikation am Institut für Umwelt- und Verfahrenstechnik (UMTEC) an der Ostschweizer Fachhochschule (OST).

Butterwegge G. (2010) Wertverteilungen mit Box-Plots analysieren.

[Online] <https://www.bissantz.de/know-how/clicks/wertverteilungen-mit-box-plots-analysieren/> [30.12.2022]

Data Base Camp (2022) Was ist die Konfusionsmatrix? [Online]

[https://databasecamp.de/ki/konfusionsmatrix#:~:text=Die%20Konfusionsmatrix%20\(auch%20Wahrheitsmatrix%20oder,f%C3%A4Ischlicherweise%20einer%20Klasse%20zugeordnet%20wurden.](https://databasecamp.de/ki/konfusionsmatrix#:~:text=Die%20Konfusionsmatrix%20(auch%20Wahrheitsmatrix%20oder,f%C3%A4Ischlicherweise%20einer%20Klasse%20zugeordnet%20wurden.) [11.01.2023]

Europäische Kommission (2018) Kreislaufwirtschaft: Neue Vorschriften - EU übernimmt globale Vorreiterrolle in Abfallbewirtschaftung und Recycling. [Online]

https://ec.europa.eu/commission/presscorner/detail/de/IP_18_3846 [18.01.2023]

Europäisches Parlament (2019) Richtlinie (EU) 2019/ des Europäischen Parlaments und des Rates vom 5. Juni 2019 über die Verringerung der Auswirkungen bestimmter

Kunststoffprodukte auf die Umwelt. [Online] <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/DE/ALL/?uri=CELEX%3A32019L0904> [15.01.2023]

EVK (2022) ABAS Metal detector: general information. Präsentation von EVK DI Kerschhagl GmbH.

Feuchter M. (2020) Kunststoffrecycling - Kunststoffverarbeitung. Folienskript zur Vorlesung im SS2022 an der Montanuniversität Leoben.

Gedikali L. (2013) Der ökologische, gesellschaftliche und betriebswirtschaftliche Vergleich von Einweg- und Mehrwegsystemen in der Getränkeindustrie unter besonderer Berücksichtigung der Verpackungsmaterialien Glas und Plastik. Bachelorarbeit an der FH Mittweida.

geekflare (2022) Was ist eine Konfusionsmatrix beim maschinellen Lernen? [Online]

<https://geekflare.com/de/confusion-matrix-in-machine-learning/> [11.01.2023]

Grummt S. (2022) Praxis der Sortierung und Verwertung von Verpackungen im Sinne des § 21 VerpackG 2020/2021. [Online]

https://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/1410/publikationen/2023-01-05_texte_125-2022_praxis_der_sortierung_und_verwertung_von_verpackungen.pdf [18.01.2023]

Haubenberger B. (2021) Neues Abfallwirtschaftsgesetz auf Schiene. [Online]

<https://kommunal.at/neues-abfallwirtschaftsgesetz-auf-schiene> [07.06.2022]

Ingenieurkurse (2022) Sichten von Partikeln. [Online]

<https://www.ingenieurkurse.de/mechanische-verfahrenstechnik/partikel-und-disperse-systeme/messverfahren-zur-analyse-der-partikelgroessen/probenahme/trennverfahren/sichten-von-partikeln.html> [13.01.2023]

- interseroh (2022) Informationsblatt - Verpackungsverordnungsnovelle 2021. [Online]
https://www.lizenzero.de/media/pdf/dc/13/d2/Infoblatt_VVO-Novelle-2021_V2-0.pdf
[15.01.2023]
- Kranert M. (2017) Einführung in die Kreislaufwirtschaft. 5. Auflage. Springer Vieweg-Verlag. ISBN 978-3-8348-1837-9
- Kroell N., Chen X., Greiff, K., Feil A. (2022) Optical sensors and machine learning algorithms in sensor-based material flow characterization for mechanical recycling processes: A systematic literature review. In: Waste management (New York, N.Y.) 149: 259–290. DOI: 10.1016/j.wasman.2022.05.015
- Kroell N., Chen X., Maghmoumi A., Koenig M., Feil A., Greiff K. (2021) Sensor-based particle mass prediction of lightweight packaging waste using machine learning algorithms. In: Waste management (New York, N.Y.) 136: 253–265. DOI: 10.1016/j.wasman.2021.10.017
- Kulcke A., Stangl S., Burstaller M. (2008) 2D - NIR Spektroskopie und materialelektive induktive Metallerkennung im Recycling: Technologie und Praxisbeispiele. [Online]
<https://docplayer.org/7976669-2d-nir-spektroskopie-und-materialelektive-induktive-metallerkennung-im-recycling-technologie-und-praxisbeispiele.html> [13.01.2023]
- Kulkarni A., Chong D., Batarseh F. A. (2020) Foundations of data imbalance and solutions for a data democracy. [Online]
https://www.researchgate.net/publication/353654414_Foundations_of_data_imbalance_and_solutions_for_a_data_democracy/stats [12.01.2023]
- Küppers B. (2021) Projektierung von Entsorgungsanlagen - Mechanische Aufbereitung. Folienskript zur Vorlesung im WS 2021/22 an der Montanuniversität Leoben.
- Küppers B., Schlögl S., Friedrich K., Lederle L., Pichler C., Freil J. (2021) Influence of material alterations and machine impairment on throughput related sensor-based sorting performance. In: Waste management & research : the journal of the International Solid Wastes and Public Cleansing Association: 122 – 129. DOI: 10.1177/0734242X20936745
- Küppers B., Schlögl S., Kroell N., Radkohl V. (2022) Relevance and challenges of plant control in the pre-processing stage for enhanced sorting performance. In: SBSC-Tagungsband. DOI: 10.2370/9783844085457
- labxchange (2022) How to interpret violin plots. [Online]
<https://www.labxchange.org/library/items/lb:LabXchange:46f64d7a:html:1>
[30.12.2022]

- Lamberti M., Escher F. (2007) Aluminium Foil as a Food Packaging Material in Comparison with Other Materials. In: Food Reviews International 23 (4): 407–433.
DOI: 10.1080/87559120701593830
- Land Niederösterreich (2018) Kunststoffe Wertvolle Abfaelle – Noe Abfallwirtschaftsplan 2. [Online] https://www.noegv.at/noe/Abfall/Kunststoffe_Wertvolle_Abfaelle_-_NOe_Abfallwirtschaftsplan_2.pdf [15.01.2023]
- Matthiessen Lagertechnik GmbH (2022) Funktionsweise Mathiessen Sackaufreißer. [Online] <https://www.bagsplitter.com/sackaufreisser/> [01.09.2022]
- Mayer T. (2023) Reinheit des NE-Produktes einer LVP-Anlage. Interview am 26.01.2023.
- Onusseit H. (2017) Kunststoffe ökonomisch und ökologisch fügen.
DOI: 10.1007/s35145-017-0023-9
- ÖWAV (2020) Recyclingziele 2025/30: Maßnahmen zur Erreichung der geplanten Recyclingziele. [Online] <https://www.oewav.at/Publikationen?current=397645&mode=form> [18.01.2023].
Österreichische Wasser- und Abfallwirtschaftsverband (ÖWAV).
- Paris O. (2021) Physik IB. Vorlesungsskript zur Vorlesung im WS 2020/21 an der Montanuniversität Leoben.
- Pomberger R. (2020) Entsorgungslogistik - Sammlung. Folienskript zur Vorlesung im WS 2021/22 an der Montanuniversität Leoben.
- Rahman A., Bakker M. C. M. (2013) Sensor-based control in eddy current separation of incinerator bottom ash. In: Waste management (New York, N.Y.) 33 (6): 1418–1424.
DOI: 10.1016/j.wasman.2013.02.013
- Recycle Me (2022) Mit welchen Neuerungen Sie durch die neue Verpackungsverordnung rechnen müssen. [Online] https://recycleme.eco/at/wp-content/uploads/sites/2/2022/02/2202_WP_Neuerungen-durch-die-VVO-und-AWG-Novelle_klein.pdf [10.01.2023]
- Recyclingmagazin (2019) Recycling von Getränkedoesn auf Rekordniveau. [Online] <https://www.recyclingmagazin.de/2019/10/21/recycling-von-getraenkedosen-auf-rekordniveau/> [17.01.2023]
- Reuter K. (2022) Der Violin Plot. [Online] <https://www.tqu-group.com/we-dokumente/informieren/QualityAppsTexte/ViolinPlotReuter.pdf> [30.12.2022]
- Schlögl S. (2022a) Digitalisierung und Sensorik in der Umwelttechnik - Sensorik und Stoffstrommanagement. Folienskript zur Vorlesung im WS 2022/23 an der Montanuniversität Leoben.

- Schlögl S. (2022b) Entwicklung und Erprobung eines sensorgestützten Stoffstromüberwachungssystems. In: DGAW-Tagungsband.
- Schlögl S., Küppers B. (2022) Quantifying the Delabelling Performance using Sensor-based Material Flow Monitoring. In: SBSC-Tagungsband. DOI: 10.2370/9783844085457
- Schwarzenbacher M. (2022) Quantitative Beurteilung der LIDAR-Technologie zur volumetrischen Stoffstromcharakterisierung von LVP-Material. Masterarbeit an der Montanuniversität Leoben.
- UBA (2018) Analyse der Effizienz und Vorschläge zur Optimierung von Sammelsystemen der haushaltsnahen Erfassung von Leichtverpackungen und stoffgleichen Nichtverpackungen auf der Grundlage vorhandener Daten. [Online] <https://www.umweltbundesamt.de/publikationen/analyse-der-effizienz-vorschlaege-zur-optimierung> [12.01.2023]. Umweltbundesamt (UBA).
- UBA (2022): Praxis der Sortierung und Verwertung von Verpackungen im Sinne des § 21 VerpackG 2020/2021. [Online] <https://www.umweltbundesamt.de/publikationen/praxis-der-sortierung-verwertung-von-verpackungen> [13.01.2023]
- Uepping, R. (2013) Sensorgestützte Sortiertechnik: Elektromagnetische Sensoren. Recycling und Rohstoffe – Band 6. Neuruppin: TK Verlag Karl Thome-Kozmiensky. ISBN 978-3-935317-97-9
- VOEB (2021) Vereinheitlichung der Müllsammelsysteme in Österreich gefordert [Online] <https://www.voeb.at/service/voeb-blog/detail/show-article/vereinheitlichung-der-muell-sammelsysteme-in-oesterreich-gefordert/> [07.06.2022]. Verein österreichischer Entsorgungsbetriebe (VOEB).
- Vollprecht D. (2021) Inerstoffrecycling - Glasrecycling. Folienskript zur Vorlesung im SS 2021 an der Montanuniversität Leoben.
- Walther B. (2012) Boxplot interpretieren. [Online] <https://bjoernwalther.com/boxplot-interpretieren/> [30.12.2022]
- xpertgate (2018) Elektromagnetische, mechanische und akustische Sensoren. [Online] <http://www.xpertgate.de/produkte/Elektromagnetische-Sensoren.html> [14.03.2022]
- Yi M. (2021) A complete guide to violin plots. [Online] <https://chartio.com/learn/charts/violin-plot-complete-guide/> [30.12.2022]

6.2 Abkürzungsverzeichnis

Alu

Aluminium

DE	Deutschland
FG	Feingut
FN	False Negative
FP	False Positive
GG	Grobgut
GVK	Getränkeverbundkarton
LVP	Leichtverpackung
MVA	Müllverbrennungsanlage
NE	Nichteisen
NIR	Nahinfrarot
SBMC	Sensor-based Material flow characterization
SBMM	Sensor-based material flow monitoring
SBPC	Sensor-based process control
SBQC	Sensor-based quality control
SVN	Slowenien
TN	True Negative
TNR	True Negative Rate
TP	True Positive
TPR	True Positive Rate

6.3 Tabellen

Tabelle 1: Sammelsysteme in Österreich nach Art der Sammlung (VOEB 2021).	6
Tabelle 2: Beispielhafte Maßnahmen aus der Verpackungsverordnung BGBl. Nr. 184/2014 mit jeweils zugehörigem Stichdatum (ARA 2022, Recycle Me 2022).	9
Tabelle 3: Neu meldepflichtige Produkte nach der Verpackungsverordnung BGBl. Nr. 184/2014 mit zugehörigem Stichdatum (interseroh 2022, BMK 2022b).	9
Tabelle 4: Verpackungsabfallaufkommen Österreich (BMK 2021b).	10
Tabelle 5: Altstoff aus der Haushaltsammlung nach Fraktionen (BMK 2021b).	10
Tabelle 6: Leitfähigen einiger wichtiger Metalle (Böhm 2021).	23
Tabelle 7: Versuchsparameter Vorversuche Metallsensor.	31
Tabelle 8: Anteil der Einzelfractionen an der Mischung.	34
Tabelle 9: Inputzusammensetzung Mischung DE.	40
Tabelle 10: Inputzusammensetzung Mischung SVN.	42
Tabelle 11: Einstellungen Parameter Metallsensor für Hauptversuche.	46
Tabelle 12: Einfluss verschiedener Sensoreinstellungen auf die Erkennung.	55
Tabelle 13: Gesamtergebnis der visuellen Bewertung der Videos für Trennvorgänge bei verschiedenen Sensoreinstellungen. (oben: Einfluss der Bandgeschwindigkeit blau markiert, unten: Einfluss der Polradgeschwindigkeit blau markiert).	61
Tabelle 14: Versuchsreihen Vorversuche Wirbelstromscheider.	I

6.4 Abbildungen

Abbildung 1: Kreislauf von NE-Metallen (Kranert 2017).....	5
Abbildung 2: LVP-Sammelsysteme in Niederösterreich (Land Niederösterreich 2018).....	7
Abbildung 3: Fließbild für das Recycling von Aluminium (UBA 2022).	13
Abbildung 4: Beispielhafter Aufbau einer LVP-Sortieranlage (erstellt auf Basis von (Land Niederösterreich 2018, UBA 2018, BMK 2019)).	14
Abbildung 5: Sackaufreißer mit Aufreißrotor und Aufreißkamm (Matthiessen Lagertechnik GmbH 2022).....	15
Abbildung 6: Schematischer Aufbau Trommelsieb (Kranert 2017).....	16
Abbildung 7: Schematische Darstellung der Windsichtung (Ingenieurkurse 2022).....	17
Abbildung 8: Schema eines Ballistischen Separators (Bilitewski und Härdtle 2013).	17
Abbildung 9: Schematische Darstellung Überbandmagnetscheider (Kranert 2017).....	18
Abbildung 10: Schema eines NIR-Sortierers (Kranert 2017).....	18
Abbildung 11: Schema eines Wirbelstromscheiders (Kranert 2017).	20
Abbildung 12: Schematische Darstellung des Monitorings in einer LVP-Anlage (Schlögl 2022b).....	21
Abbildung 13: Verschiedene Ebenen des Stoffstrommonitorings (Kroell et al. 2022).....	22
Abbildung 14: Schematischer Aufbau Metallsensor (EVK 2022).....	23
Abbildung 15: Links: Versuchsaufbau SMPC mittels LED-Lichtgitter, rechts: Partikelanzahlverteilung bei schlechter Einstellung des Trennscheitels (Bunge 2018). .25	
Abbildung 16: Versuchsaufbau SBMM mittels Kombination aus Metall- und NIR-Sensor (Rahman und Bakker 2013).	25
Abbildung 17: Dosenproben mit der detektierbare Fläche grün dargestellt.	27
Abbildung 18: GVK mit der detektierbaren Fläche grün dargestellt.....	28
Abbildung 19: Alufolie Proben mit der detektierbaren Fläche grün dargestellt.	28
Abbildung 20: Pouch-Proben mit den detektierbaren Flächen in grün dargestellt.	28
Abbildung 21: Abmessungen der ABAS-Leiste von EVK (EVK 2022).....	29
Abbildung 22: Versuchsaufbau für die Versuche bei EVK in Graz.	30
Abbildung 23: Untersuchte Orientierungen der Proben: (1) „vorne“, (2) „hinten“, (3): „quer vorne“, (4) „quer hinten“.	31
Abbildung 24: Beispielhafte Darstellung eines Boxplots (Butterwegge 2010).	32
Abbildung 25: Beispielhafte Darstellung eines Violinen-Plots (labxchange 2022).	33
Abbildung 26: Probenmaterial: (1) PET, (2) PE-, (3) PP/PS Mischung und (4) NE-Metall.	33

Abbildung 27: (1) Anteil NE-Metalle an der Mischung, (2) PET- (links), PE- (Mitte) und PP/PS-(rechts) Anteil an der Gesamtmischung.	34
Abbildung 28: Einstellmöglichkeiten Polrad (aktuelle Lochposition mit Winkel 0°).	35
Abbildung 29: Einstellmöglichkeiten Trennscheitelwinkel (gewählte Position 2L).....	36
Abbildung 30: Einstellmöglichkeiten Kerben (gewählte Position 3).	36
Abbildung 31: Fließbild des Stadler Technikum in Krsko.	37
Abbildung 32: Versuchsaufbau Videokamera auf Trennscheitel gerichtet.....	38
Abbildung 33: Links: Pouch-Input; rechts: Zusammensetzung Mischung DE.....	40
Abbildung 34: Vereinfachtes Fließbild der slowenischen LVP-Anlage; Probenahmestelle rot markiert.	41
Abbildung 35: Zusammensetzung Mischung SVN.	42
Abbildung 36: 3D-Ansicht Stadler Technikum.....	43
Abbildung 37: Draufsicht Stadler Technikum. blau: Inputstrom, gelb: Eject-Strom, rot: Drop-Strom.	43
Abbildung 38: Versuchsaufbau Videokamera.	44
Abbildung 39: Links: Aufbau Sensoren Messstelle 2– Seitenansicht; rechts: Schematischer Aufbau.....	45
Abbildung 40: Aufbau Sensoren Messstelle 2 - Draufsicht.	45
Abbildung 41: Objekte für die Kalibration der beiden Metallsensoren.	46
Abbildung 42: Ausgewählte Partikel für die Bestimmung des Pixelgewichtes: (1) GVK, (2) Kaffeeverpackungen, (3) Pouch und (4) NE-Metalle.....	47
Abbildung 43: Unterschiedliche Positionierung der Partikel am Band.....	47
Abbildung 44: Entscheidungsbaum Versuchsparameter Hauptversuche.....	48
Abbildung 45: Sortierfraktion der Handsortierung: (1) Kunststoffe, (2) NE-Metalle, (3) Pouch, (4), GVK (5), Chipsverpackungen, (6) Kaffeeverpackungen und (7) Rest.....	49
Abbildung 46: Bandbelegung Mischung DE: links: Messstelle 1; rechts: Messstelle 2.....	50
Abbildung 47: Beispielhafte Abbildung einer Konfusionsmatrix (Data Base Camp 2022).....	52
Abbildung 48: Vergleich der verschiedenen Einstellungen des Metallsensors (braun: 2-1.000; grau: 2-10.000, violett: 10-10.000, grün: 10-1.000).....	56
Abbildung 49: Vergleich der verschiedenen Materialien mit verschiedenen Sensoreinstellungen (braun: 2-1.000; grau: 2-10.000, violett: 10-10.000, grün: 10-1.000).	57

Abbildung 50: Vergleich der Orientierung der Objekte am Band über alle vier Einstellungsmöglichkeiten des Metallsensors (orange: „vorne“; gelb: „hinten“, blau: „quer vorne“, grün: „quer hinten“)	59
Abbildung 51: Haupteffektediagramm zur Bewertung aller relevanten Versuchsparameter des Wirbelstromscheiders	62
Abbildung 52: Multi-Vari-Bild zur Bewertung der Zusammenhänge aller relevanten Versuchsparameter des Wirbelstromscheiders. Die Feldvariable ist die Bandgeschwindigkeit [m/s]	63
Abbildung 53: Prozentueller Anteil der erkannten Metallpixel nach Positionierung am Band bei Metallsensor 1 (links) und Metallsensor 2 (rechts) je Material (blau: GVK, orange: Pouch, grau: NE-Metalle, gelb: Kaffeeverpackungen)	64
Abbildung 54: Vergleich der beiden Sensoren bezogen auf erkannte Pixel (links) und Erkennungsratenebene (rechts) (rot = Metallsensor1 im Drop, blau = Metallsensor 2 im Eject)	65
Abbildung 55: Erkennungsrate nach Position für GVK an Metallsensor 1 (Drop)	66
Abbildung 56: Erkennungsrate nach Position für Kaffeeverpackungen an Metallsensor 1 (Drop)	66
Abbildung 57: Erkennungsrate nach Position für NE-Metalle an Metallsensor 2 (Eject)	67
Abbildung 58: Erkennungsrate nach Position für Pouch an Metallsensor 2 (Eject)	68
Abbildung 59: Verteilungen innerhalb einer Materialart am Beispiel Pouch bei Metallsensor 1 (links, Drop) und Metallsensor 2 (rechts, Eject). Der Mittelwert der Daten ist als Linie dargestellt	68
Abbildung 60: Links: Partikelbasiertes Pixelgewicht (oben: Drop, unten: Eject), rechts: Stoffstrombasiertes Pixelgewicht (oben: Drop, unten: Eject) für Metallsensor 2	70
Abbildung 61: Links: Partikelbasiertes Pixelgewicht, rechts: Stoffstrombasiertes Pixelgewicht für beide Metallsensoren	71
Abbildung 62: Reinheit des Eject-Stroms der Mischung DE (orange) und Mischung SVN (grau)	72
Abbildung 63: Massenanteile der Metallarten im Eject gemäß Handsortierung für die Mischung DE (oberes Diagramm) und SVN (unteres Diagramm) (hellblau: NE-Metalle, orange: Pouches, grau: Kaffeeverpackungen, dunkelblau: GVK)	73
Abbildung 64: Massenanteile der Metallarten im Drop gemäß Handsortierung für die Mischung DE (oberes Diagramm) und SVN (unteres Diagramm) (hellblau: NE-Metalle, orange: Pouches, grau: Kaffeeverpackungen, dunkelblau: GVK)	75
Abbildung 65: Quantifizierung des Sortiererergebnisses mittels Vergleiches von TPR (blau) und TNR (orange) für die Mischung DE (oberes Diagramm) und Mischung SVN (unteres Diagramm)	76

Abbildung 66: Haupteffektdiagramm für die Bewertung des Trennerfolges der Pouches (Skala von 1: sehr gut bis 4: sehr schlecht).....	78
Abbildung 67: Streuungskarte für die Bewertung der Sortierung von Pouches.	78
Abbildung 68: Prozentuelle Verteilung der Pouches in den beiden Strömen für die Mischung DE (links) und die Mischung SVN (rechts).....	79
Abbildung 69: Big-Bag des Feinfraktion Austrages nach allen Durchgängen mit der Mischung DE.....	80
Abbildung 70: Erkannte Pixel je Metallsensor für die Mischung DE bei verschiedenen Maschineneinstellungen (rot: Metallsensor 1 im Drop, blau: Metallsensor 2 im Eject). ..	81
Abbildung 71: Zeitlicher Verlauf der detektierten Pixel bei einer Bandgeschwindigkeit von 1,5 m/s und einer Polradgeschwindigkeit von 2.400 rpm für die Mischung DE. Links: Metallsensor 1 (Drop), rechts: Metallsensor 2 (Eject).	81
Abbildung 72: Wechselwirkungsdiagramm der Pixel für die Mischung DE für beide Sensoren. Links: Metallsensor 1 (Drop), rechts: Metallsensor 2 (Eject).	82
Abbildung 73: Erkannte Pixel für beide Sensoren für die Mischung SVN (rot: Metallsensor 1 im Drop, blau: Metallsensor 2 im Eject).	82
Abbildung 74: Zeitlicher Verlauf der detektierten Pixel bei einer Bandgeschwindigkeit von 1.5 m/s und einer Polradgeschwindigkeit von 1.600 rpm für die Mischung SVN. Links: Metallsensor 1 (Drop), rechts: Metallsensor 2 (Eject).	83
Abbildung 75: Wechselwirkungsdiagramm der Pixel für die Mischung SVN für beide Sensoren. Links: Metallsensor 1 (Drop), rechts: Metallsensor 2 (Eject).	84
Abbildung 76: Detektierte Pixel beider Sensoren zur Veranschaulichung einer Verstopfung (rot: Metallsensor 1 im Drop, blau: Metallsensor 2 im Eject).	84
Abbildung 77: Zeitlicher Verlauf der detektierten Pixel bei einer Bandgeschwindigkeit von 2.5 m/s und einer Polradgeschwindigkeit von 1.600 rpm für die Mischung SVN. Oben: kurz vor der Verstopfung, unten: während der Verstopfung; links: Metallsensor 1 (Drop), rechts: Metallsensor 2 (Eject).	85
Abbildung 78: Vergleich des Wertstoffausbringens der Handsortierung mit dem des Metallsensor für die Mischung DE (links) und Mischung SVN (rechts).....	86
Abbildung 79: Vergleich der Handsortierung mit dem Metallsensor für den Eject (oben) und Drop-Strom (unten) der Mischung DE (links) und SVN (rechts). (gelb: Metallsensor, grün: Handsortierung).	88
Abbildung 80: Vergleich der Pixel des Metallsensors (links) und mit der Masse der Handsortierung (rechts) für den Eject- und Drop-Strom.....	89
Abbildung 81: Konfusionsmatrizen aller Versuchsreihe. Mischung DE: Versuchsreihen 1-12; Mischung SVN: Versuchsreihen 13-24.	II

Anhang

Tabelle 14: Versuchsreihen Vorversuche Wirbelstromscheider.

Material	Trenschneitel- winkel	Gewicht	Durchlaufzeit	Durchsatz	Polradposition	Uhrzeit	Uhrzeit	Datum	Trenschneitel- position	Bandgeschwind- igkeit	Speed pole system
		[kg]	[min]	[kg/min]	[Lochnr.]	[h]	[h]		[Kerbennr.]	[m/s]	[rpm]
PET	4L	41,5	1,93	21,47	Loch2	12:40	12:43	13.06.2022	3	1; 1,5; 2; 2,5	2400
PET	3L	41,5	1,93	21,47	Loch2	13:26	13:30	13.06.2022	3	1; 1,5; 2; 2,5	2400
PET	2L	41,5	1,93	21,47	Loch2	13:33	13:35	13.06.2022	3	1; 1,5; 2; 2,5	2400
PET	2R	41,5	1,93	21,47	Loch2	13:38	13:39	13.06.2022	3	1; 1,5; 2; 2,5	2400
PET	3R	41,5	1,93	21,47	Loch2	13:49	13:50	13.06.2022	3	1; 1,5; 2; 2,5	2400
PET	4R	41,5	1,93	21,47	Loch2	13:52	13:54	13.06.2022	3	1; 1,5; 2; 2,5	2400
PE	4L	57	1,82	31,38	Loch2	14:43	14:47	13.06.2022	3	1; 1,5; 2; 2,5	2400
PE	3L	57	1,82	31,38	Loch2	14:57	14:59	13.06.2022	3	1; 1,5; 2; 2,5	2400
PE	2L	57	1,82	31,38	Loch2	15:07	15:08	13.06.2022	3	1; 1,5; 2; 2,5	2400
PE	2R	57	1,82	31,38	Loch2	15:13	15:15	13.06.2022	3	1; 1,5; 2; 2,5	2400
PE	3R	57	1,82	31,38	Loch2	15:18	15:20	13.06.2022	3	1; 1,5; 2; 2,5	2400
PE	4R	57	1,82	31,38	Loch2	15:21	15:23	13.06.2022	3	1; 1,5; 2; 2,5	2400
PP/PS	4L	61,5	1,98	31,10	Loch 2	16:00	16:02	13.06.2022	3	1; 1,5; 2; 2,5	2400
PP/PS	3L	61,5	1,98	31,10	Loch 2	16:07	16:08	13.06.2022	3	1; 1,5; 2; 2,5	2400
PP/PS	2L	61,5	1,98	31,10	Loch 2	16:10	16:12	13.06.2022	3	1; 1,5; 2; 2,5	2400
PP/PS	2R	61,5	1,98	31,10	Loch 2	16:17	16:19	13.06.2022	3	1; 1,5; 2; 2,5	2400
PP/PS	3R	61,5	1,98	31,10	Loch 2	16:20	16:23	13.06.2022	3	1; 1,5; 2; 2,5	2400
PP/PS	4R	61,5	1,98	31,10	Loch 2	16:27	16:30	13.06.2022	3	1; 1,5; 2; 2,5	2400
NE Metalle	4L	51	1,68	30,40	Loch 2	09:23	09:25	14.06.2022	3	1; 1,5; 2; 2,5	800; 1600; 2400
NE Metalle	3L	51	1,68	30,40	Loch 2	09:34	09:36	14.06.2022	3	1; 1,5; 2; 2,5	800; 1600; 2400
NE Metalle	2L	51	1,68	30,40	Loch 2	09:45	09:48	14.06.2022	3	1; 1,5; 2; 2,5	800; 1600; 2400
NE Metalle	2R	51	1,68	30,40	Loch 2	09:56	09:58	14.06.2022	3	1; 1,5; 2; 2,5	800; 1600; 2400
NE Metalle	3R	51	1,68	30,40	Loch 2	10:03	10:06	14.06.2022	3	1; 1,5; 2; 2,5	800; 1600; 2400
NE Metalle	4R	51	1,68	30,40	Loch 2	10:12	10:14	14.06.2022	3	1; 1,5; 2; 2,5	800; 1600; 2400
NE Metalle	4L	51	1,68	30,40	Loch1	10:57	10:58	14.06.2022	3	1; 1,5; 2; 2,5	800; 1600; 2400
NE Metalle	3L	51	1,68	30,40	Loch 1	11:06	11:08	14.06.2022	3	1; 1,5; 2; 2,5	800; 1600; 2400
NE Metalle	2L	51	1,68	30,40	Loch1	11:13	11:15	14.06.2022	3	1; 1,5; 2; 2,5	800; 1600; 2400
NE Metalle	2R	51	1,68	30,40	Loch1	11:21	11:23	14.06.2022	3	1; 1,5; 2; 2,5	800; 1600; 2400
NE Metalle	3R	51	1,68	30,40	Loch1	11:28	11:30	14.06.2022	3	1; 1,5; 2; 2,5	800; 1600; 2400
NE Metalle	4R	51	1,68	30,40	Loch1	11:35	11:37	14.06.2022	3	1; 1,5; 2; 2,5	800; 1600; 2400
NE Metalle	4L	51	1,68	30,40	Loch 3	11:51	11:53	14.06.2022	3	1; 1,5; 2; 2,5	800; 1600; 2400
NE Metalle	3L	51	1,68	30,40	Loch 3	12:36	12:38	14.06.2022	3	1; 1,5; 2; 2,5	800; 1600; 2400
NE Metalle	2L	51	1,68	30,40	Loch 3	12:39	12:41	14.06.2022	3	1; 1,5; 2; 2,5	800; 1600; 2400
NE Metalle	2R	51	1,68	30,40	Loch 3	12:50	12:53	14.06.2022	3	1; 1,5; 2; 2,5	800; 1600; 2400
NE Metalle	3R	51	1,68	30,40	Loch 3	12:58	13:00	14.06.2022	3	1; 1,5; 2; 2,5	800; 1600; 2400
NE Metalle	4R	51	1,68	30,40	Loch 3	13:05	13:07	14.06.2022	3	1; 1,5; 2; 2,5	800; 1600; 2400
NE Metalle	4L	51	1,68	30,40	Loch 4	13:24	13:26	14.06.2022	3	1; 1,5; 2; 2,5	800; 1600; 2400
NE Metalle	3L	51	1,68	30,40	Loch 4	13:33	13:35	14.06.2022	3	1; 1,5; 2; 2,5	800; 1600; 2400
NE Metalle	2L	51	1,68	30,40	Loch 4	13:39	13:42	14.06.2022	3	1; 1,5; 2; 2,5	800; 1600; 2400
NE Metalle	2R	51	1,68	30,40	Loch 4	13:51	13:53	14.06.2022	3	1; 1,5; 2; 2,5	800; 1600; 2400
NE Metalle	3R	51	1,68	30,40	Loch 4	14:08	14:12	14.06.2022	3	1; 1,5; 2; 2,5	800; 1600; 2400
NE Metalle	4R	51	1,68	30,40	Loch 4	14:35	14:38	14.06.2022	3	1; 1,5; 2; 2,5	800; 1600; 2400
Mischung	4L	33,5	1,40	23,93	Loch 1	15:03	15:05	14.06.2022	3	1; 1,5; 2; 2,5	800; 1600; 2400
Mischung	3L	33,5	1,40	23,93	Loch 1	15:15	15:17	14.06.2022	3	1; 1,5; 2; 2,5	800; 1600; 2400
Mischung	2L	33,5	1,40	23,93	Loch 1	15:27	15:29	14.06.2022	3	1; 1,5; 2; 2,5	800; 1600; 2400
Mischung	2R	33,5	1,40	23,93	Loch 1	15:35	15:37	14.06.2022	3	1; 1,5; 2; 2,5	800; 1600; 2400
Mischung	3R	33,5	1,40	23,93	Loch 1	15:43	15:45	14.06.2022	3	1; 1,5; 2; 2,5	800; 1600; 2400
Mischung	4R	33,5	1,40	23,93	Loch 1	15:50	15:52	14.06.2022	3	1; 1,5; 2; 2,5	800; 1600; 2400

Die Bandgeschwindigkeits- und die Polradgeschwindigkeits-Werte wurden der Reihe nach für je eine Versuchsreihe eingestellt. In der Tabelle 14 sind sie aus Platzspargründen nebeneinander geschrieben.

1		tc		2		tc		3		tc		4		tc		5		tc	
		positive	negative			positive	negative			positive	negative			positive	negative			positive	negative
pc	positive	10,961	0,05	pc	positive	14,435	0,14	pc	positive	18,31	1,9	pc	positive	19,295	19,895	pc	positive	17,625	0,41
	negative	7,275	34,34		negative	3,315	32,46		negative	1,955	31,845		negative	0,575	13,59		negative	2,24	32,766
6		tc		7		tc		8		tc		9		tc		10		tc	
		positive	negative			positive	negative			positive	negative			positive	negative			positive	negative
pc	positive	18,7	0,825	pc	positive	19,34	3,195	pc	positive	16,17	24,285	pc	positive	17,84	0,78	pc	positive	18,68	1,18
	negative	1,08	32,885		negative	0,27	29,95		negative	0,28	11,74		negative	1,405	32,62		negative	0,63	31,965
11		tc		12		tc		13		tc		14		tc		15		tc	
		positive	negative			positive	negative			positive	negative			positive	negative			positive	negative
pc	positive	19,055	3,885	pc	positive	19,245	20,595	pc	positive	5,965	0,35	pc	positive	8,025	0,455	pc	positive	9,4	3,1
	negative	0,225	27,97		negative	0,14	11,095		negative	10,88	37,005		negative	9,15	36,68		negative	6,3	29,235
16		tc		17		tc		18		tc		19		tc		20		tc	
		positive	negative			positive	negative			positive	negative			positive	negative			positive	negative
pc	positive	14,558	22,458	pc	positive	9,09	0,78	pc	positive	9,965	0,73	pc	positive	13,205	3,505	pc	positive	14,495	20,585
	negative	1,8	13,16		negative	7,18	35,07		negative	6,23	34,18		negative	2,885	30,04		negative	0,57	11,33
21		tc		22		tc		23		tc		24		tc				tc	
		positive	negative			positive	negative			positive	negative			positive	negative			positive	negative
pc	positive	9,34	2,03	pc	positive	11,83	0,91	pc	positive	13,895	3,68	pc	positive	13,9	25,955				
	negative	6,68	32,555		negative	4,015	32,565		negative	2,335	29,225		negative	0,515	13,305				

Abbildung 81: Konfusionsmatrizen aller Versuchsreihe. Mischung DE: Versuchsreihen 1-12; Mischung SVN: Versuchsreihen 13-24.