

Diplomarbeit

### Bewertung des Einflusses eines Ballistikseparators auf Schwankungen von LVP-Stoffströmen mittels sensorgestützter Überwachung

ausgeführt zum Zwecke der Erlangung des akademischen Grads Diplom-Ingenieurin eingereicht an der TU Wien, Fakultät für Bau- und Umweltingenieurwesen

Master's Thesis

## Evaluating the impact of ballistic separation technology on the variation of plastic flows using sensor based monitoring

Submitted in satisfaction of the requirements for the degree of Diploma in engineering of the TU Wien, Faculty of Civil and Environmental Engineering

von

## Johanna Thea Beaupoil

Matr.Nr.: 12123552

Betreuung:

Univ.-Prof. Dipl.-Ing. Dr.techn. Johann Fellner
Dipl.-Ing. Dr.techn. Jakob Lederer
Institut für Wassergüte und Ressourcenmanagement
Forschungsbereich Abfallwirtschaft und Ressourcenmanagement
Technische Universität Wien,
Karlsplatz 13/226-2, 1040 Wien, Österreich



Wien, Jänner 2024



Ich habe zur Kenntnis genommen, dass ich zur Drucklegung meiner Arbeit unter der Bezeichnung

## **Diplomarbeit**

nur mit Bewilligung der Prüfungskommission berechtigt bin.

Ich erkläre weiters an Eides statt, dass ich meine Diplomarbeit nach den anerkannten Grundsätzen für wissenschaftliche Abhandlungen selbstständig ausgeführt habe und alle verwendeten Hilfsmittel, insbesondere die zugrunde gelegte Literatur, genannt habe.

Weiters erkläre ich, dass ich dieses Diplomarbeitsthema bisher weder im In- noch Ausland (einer Beurteilerin/einem Beurteiler zur Begutachtung) in irgendeiner Form als Prüfungsarbeit vorgelegt habe und dass diese Arbeit mit der vom Begutachter beurteilten Arbeit übereinstimmt.

Wien, im Jänner 2024



Johanna Thea Beaupoll, BSc.

## Kurzfassung

Steigende Abfallmengen und sowohl rechtlich als auch gesellschaftlich höhere Ansprüche an die umweltverträgliche Verwertung dieser erfordern Effizienzsteigerungen in den Aufbereitungsprozessen. Besonders Kunststoffe und die überwiegend daraus hergestellten Leichtverpackungen stellen aufgrund ihrer kurzen Lebensdauer und Inhomogenität eine Herausforderung für die stoffliche Verwertung dar. Bislang liegen die Verwertungsquoten in Europa deutlich unter den gesetzlich geforderten Quoten der kommenden Jahre. Eine effizientere Gestaltung des Sortierprozesses und daraus resultierende optimierte Reinfraktionen des Leichverpackungsgemischs sind wichtige Einflussgrößen auf die Steigerung der Verwertungsquoten. Schwankungen des Durchsatzes stellen ein bekanntes Problem in Abfallbehandlungsanlagen dar. Eine Überlastung der Aggregate wirkt sich negativ auf die Performance aus, während ein zu geringer Durchsatz wirtschaftliche Einbußen bedeuten kann. In dieser Diplomarbeit wurde eine Methode entwickelt, durch Volumenstrom- und Nahinfrarotsensoren gemessene Schwankungen in Abfallströmen mittels Schwellenwerten zu quantifizieren. Außerdem wurde der Einfluss eines Ballistikseparators auf die Vergleichmäßigung eines Modellabfallstromes untersucht. Verschiedene Parameter des Ballistikseparators (Paddelbelag, Winkel) und des Stoffgemischs (Durchsatz, Folienanteil) wurden getestet. Die Ergebnisse deuten darauf hin, dass geschlossene Paddelbeläge, sowie flachere Winkel und geringere Folienanteile die Fähigkeit des Ballistikseparators Schwankungen auszugleichen, verbessern. Ein Einfluss des Durchsatzes konnte nicht festgestellt werden. Die der durchgeführten Versuche weisen darauf hin, dass Auswertung sich Schwankungen eher in die 2D-Fraktion des Ballistikseparators fortpflanzen. Eine Ausnahme bildet die Parameterkombination geschlossene Paddelbeläge 17.5°. Der geringe Anteil des 2D-Materials im Gemisch stellt ein Hindernis für die korrekte Beurteilung der Schwankungen in dieser Fraktion dar, weshalb weitere, umfassendere Versuche für die Bestätigung dieser Ergebnisse erforderlich sind.

#### Abstract

Increasing amounts of waste and higher legal and social demands for environmentally compatible recycling require efficiency improvements in the treatment processes. Particularly plastics and the lightweight packaging made predominantly from it, pose a challenge for recycling due to their short period of use and inhomogeneity. To date, recycling rates in Europe are significantly below the legally required rates for the upcoming years. A more efficient design of the sorting process and the resulting optimized pure fractions of the lightweight packaging mixture are important factors influencing the increase in recycling rates. Fluctuations in throughput rate are a wellknown problem in waste treatment plants. Overloading of the aggregates has a negative effect on the performance, while a very low throughput rate can cause economic losses. In this thesis, a method was developed to quantify fluctuations in waste streams using threshold values. In addition, the influence of various parameters of the ballistic separator (paddle coating, angle) and of the lightweight plastic waste mixture (throughput, film content) on the uniformity of the stream was investigated. The results indicate that closed paddle coverings, as well as flatter angles and lower film fractions, increase the ballistic separator's ability to compensate fluctuations in the waste stream. An influence of the throughput could not be determined. The evaluation of the tests indicate that fluctuations tend to propagate into the 2D fraction of the ballistic separator. An exception is the parameter combination closed paddle covering 17.5°. The small proportion of 2D material in the mixture may have presented a challenge to the correct assessment of fluctuations in this fraction. Therefore, further research and more tests are needed to confirm these results.

# Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Abfallhierarchie laut Abfallrahmenrichtlinie (Eigene Darstellung)
Abbildung 2: Schematische Darstellung einer LVP-Sortieranlage (Eigene Darstellung
nach Schlögl 2021; Schwarzenbacher 2022)
Abbildung 3: Funktionsprinzip des Ballistikseparators (Eigene Darstellung nach Martens und Goldmann 2016)
Abbildung 4: Offene und geschlossene Paddelbeläge auf dem Ballistikseparator
(Eigene Abbildung)
Abbildung 5: Verluste bei dem stofflichen Aufbereitungsprozess von
Verpackungsabfällen (Eigene Darstellung nach Küppers et al. 2022)
Abbildung 6: Beispieldarstellung von NIR-Absorptionsspektren (Küppers et al. 2019)
Abbildung 7: Fließbild Test- und Innovationszentrum von der Stadler Anlagenbau
GmbH in Krsko (Eigene Darstellung) 19
Abbildung 8: Probenahme des Versuchsmaterials (PP/PS/PE Gemisch)
Abbildung 9: Bestimmung der Schüttdichten der Fraktion 3D-Gemisch
Abbildung 10: Anlernmaterialien für die Erstellung der Sensorrezepte
Abbildung 11: Spektren der angelernten Materialien im Rahmen der Versuche 23
Abbildung 12: Diagramme für die Echtzeitüberwachung der NIR-Sensordaten 24
Abbildung 13: Ballistikseparator STT2000 von der Stadler Anlagenbau GmbH (Stadler
Anlagenbau GmbH 2023b)25
Abbildung 14: Positionen der Sensoren in der Anlage (Ausschnitt aus Abbildung 7)26
Abbildung 15: Montage der Sensoren (1) 27
Abbildung 16: Montage der Sensoren (2) 27
Abbildung 17: Vergleich von berechnetem und tatsächlichem Durchsatz 31
Abbildung 18: Positionen für vermehrten Materialverlust
Abbildung 19: Vergleich der Bandbelegung bei verschiedenen Durchsätzen (links: 1,5
t/h, rechts: 5,9 t/h)
Abbildung 20: Veranschaulichung der Zeiträume für die Datenauswertung der
Mitnehmerversuche
Abbildung 21: Abgeschlossene Datenaufbereitung am Beispiel eines beliebigen
Datensatzes
Abbildung 22: Prinzip der Datenaufbereitung der Versuche zu
Durchsatzschwankungen
Abbildung 23: Grafischer Vergleich der Datenaufbereitungsschritte der Versuche zu
Durchsatzschwankungen
Abbildung 24: Vergleich der erzeugten Schwankung zu den Rohdaten und den
aufbereiteten Rohdaten
Abbildung 25: Gegenpendler bei zu hohen gleitenden Mittelwerten

Abbildung 26: Übertragung der Schwankungsausprägung vom Inputsensor in die Outputsensoren
Abbildung 27: Vergleich der Rohdaten zu der Median/Mittelwert/Mittelwert Applikation 49
Abbildung 28: Prinzip der Datenaufbereitung der Versuche zu materialspezifischen Schwankungen
Abbildung 29: Grafische Darstellung der Datenaufbereitung auf die Rohdaten der materialspezifischen Schwankungen
Abbildung 30: Schwellenwertprinzip bei der Aufbereitung der Daten zu den materialspezifischen Schwankungen
Abbildung 31: Datenaufbereitung der Volumenstromdaten
Abbildung 33: Relative Abweichung des Mitnehmerbandes
Abbildung 34: Einfluss der Bandübergaben dargestellt durch Abweichung der gemessenen Schwankung zu der erzeugten Schwankung (Schwankungsbreite) 58 Abbildung 35: Runden bis Ausgleich 1,5 t/h
Abbildung 36: Runden bis Ausgleich 2,4 t/h
Abbildung 38: Vergleich der Schwankungsminima zwischen den Sensoren
Abbildung 40: Winkeleinfluss auf die Schwankungsausbreitung des 2D-Materials 65 Abbildung 41: Paddel- und Durchsatzeinfluss auf die Schwankungsausprägung des
3D-Materials
Abbildung 42: Paddel- und Durchsatzeinfluss auf die Schwankungsausprägung des 2D-Materials
Abbildung 43: Materialabnutzung der Fraktion FE-Dose

## Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: Vergleich der aktuellen Recyclingquoten und gesetzlichen	Vorgaben bis
2030 (Eigene Darstellung nach Eurostat 2023; Bundesministerium i	für Land- und
Forstwirtschaft, Umwelt und Wasserwirtschaft Österreich 2014;	Europäisches
Parlament 20.12.1994; Deutscher Bundestag 05.07.2017)	6
Tabelle 2: Bandgeschwindigkeiten während der Versuche	19
Tabelle 3: Zusammensetzung des 3D-Materialgemischs	20
Tabelle 4: Schüttdichten der verwendeten Fraktionen	22
Tabelle 5: Versuchsparameter und Einstellungen	
Tabelle 6: Versuchsplan für die Durchsatzschwankungen	33
Tabelle 7: Versuchsplan für die materialspezifischen Schwankungen	
Tabelle 8: Pixelgewichte	37

Tabelle 9: Zeiten, bis die Schwankung die Sensoren erreicht
Tabelle 10: Vergleich Berechnung relative Abweichungen dividiert durch starren oder
gleitenden Mittelwert
Tabelle 11: Schwellenwerte für die Quantifizierung des Schwankungsausgleiches . 47
Tabelle 12: Materialnummern für die Berechnung der Korrelationskoeffizienten 53
Tabelle 13: Prozentuale Schwellenwerte für die Quantifizierung der Gleichmäßigkeit
von Stoffströmen 61
Tabelle 14: Korrelationsfaktoren berechneter Zeiten und verwendeter Parameter 69
Tabelle 15: Relative Streckung von Tetra ganz und Tetra kompakt

## Abkürzungsverzeichnis

3D	dreidimensional
2D	zweidimensional
bzw.	beziehungsweise
FE	Eisen
KrWG	Kreislaufwirtschaftsgesetz
Lidar	Light detection and radiation
LVP	Leichtverpackungen
M-%	Massenprozent (Prozent bezogen auf eine Masse)
NE	Nicht-Eisen
PE-LD	Polyethylen low density
PE-HD	Polyethylen high density
PET	Polyethylenterephthalat
PP	Polypropylen
PS	Polystyrol
Px-%	Pixelprozent (Prozent bezogen auf eine Pixelzahl)
VerpackG	Verpackungsgesetz
Vol-%	Volumenprozent
z.B.	zum Beispiel

## Inhaltsverzeichnis

1	Ein	leitu	ing	1
	1.1	Pro	blemstellung	2
	1.2	Zie	lsetzung und Forschungsfragen	2
2	The	eore	tische Grundlagen	4
	2.1	Re	chtliche Grundlagen	4
	2.2	Au	fbereitung von Leichtverpackungsabfällen	6
	2.2	.1	Sortieranlagen	6
	2.2	.2	Ballistikseparator	9
	2.2	.3	Herausforderungen bei der Aufbereitung	11
	2.3	Se	nsorische Stoffstromüberwachung	14
	2.3	.1	Möglichkeiten der sensorischen Stoffstromüberwachung	14
3	Ма	teria	al und Methoden	18
	3.1	Ve	rsuchsanlage	18
	3.2	Pro	bematerial	20
	3.3	Eir	gesetzte Technologien	22
	3.3	.1	Sensoren und Software	22
	3.3	.2	Ballistikseparator	24
	3.4	Ve	rsuchsaufbau	25
	3.5	Ve	rsuchsdurchführung	27
	3.6	Da	tenauswertung	35
	3.6	.1	Allgemeine Datenauswertung	35
	3.6	.2	Mitnehmerversuche	38
	3.6	.3	Durchsatzschwankungen	39
	3.6	.4	Materialspezifische Schwankungen	49
4	Erg	jebn	isse und Diskussion	56
	4.1	Mit	nehmerversuche	56
	4.2	Du	rchsatzschwankungen	57
	4.3	Ma	terialspezifische Schwankungen	67
5	Faz	zit		72
6	Aus	sblic	k	74
7	Lite	eratu	Irverzeichnis	75

robierte gedruckte Originalversion dieser Diplomarbeit ist an der TU Wien Bibliothek verfügbar	roved original version of this thesis is available in print at TU Wien Bibliothek.
Die approbie	The approve
2	
he	e e
<b>3ibliot</b>	Your knowledge hu
	Z

8	Anhang	81
8	Anhang	8

## 1 Einleitung

"Es gibt nur einen Planeten Erde, aber bis 2050 wird der weltweite Verbrauch ein Niveau erreichen, als ob wir drei davon hätten." (Europäische Kommission 2020) Sowohl circa 50% der Treibhausgasemissionen, als auch mehr als 90% des Biodiversitätsverlustes und der Wasserverschmutzung stammen laut der Europäischen Kommission aus der Gewinnung und Verarbeitung von Ressourcen. Während sich der Verbrauch von Ressourcen bis 2050 verdoppeln wird, steigt das Abfallaufkommen um 70% an. Um eine effizientere Ressourcennutzung zu etablieren, hat die Europäische Kommission im Jahr 2020 einen Aktionsplan für die Kreislaufwirtschaft für ein sauberes und wettbewerbsfähiges Europa veröffentlicht, in dem unter Anderem zu einer Stärkung des Kreislaufwirtschaftsprinzipes aufgerufen wird. (Europäische Kommission 2020)

Auch in den Sustainable Development Goals der Vereinten Nationen findet sich das Ziel, das Abfallaufkommen durch Vermeidung, Verminderung, Recycling und Wiederverwendung zu senken. (United Nations o. D.)

Kunststoffe sind aufgrund ihrer Vielfältigkeit und ihres geringen Gewichtes ein gefragter Werkstoff für zahlreiche Anwendungen. Ein Hauptanwendungsgebiet für Kunststoffe stellt der Verpackungsbereich dar. (Knappe et al. 2021) Während die Menge der Materialien für die Verpackungsherstellung in Europa stetig steigt und sich der Verbrauch von Kunststoffen in den nächsten 20 Jahren verdoppeln soll (Europäische Kommission 2020). werden für die Einhaltung der Kreislaufwirtschaftsziele strengere Quoten für das Recycling dieser verabschiedet (Schlögl und Küppers 2022). Knappe et al. kamen in ihrer Potentialanalyse zur Steigerung des Kunststoffrecyclings und des Rezyklateinsatzes zu dem Schluss, dass die Mehrheit der Kunststoffabfälle energetisch verwertet wird. Um den gesetzlich festgelegten Quoten über die stoffliche Verwertung gerecht werden zu können, ist es Behandlung von Kunststoffabfällen maßgeblich nötig, die Sortierung und voranzutreiben. Besonders die Digitalisierung dieser Prozesse im Hinblick auf "smart waste factories" könnte Potentiale bergen, die werkstoffliche Verwertung effizienter zu gestalten. (Curtis et al. 2021; Küppers et al. 2020) Die Stoffstromüberwachung mittels sensorbasierter Systeme, wie beispielsweise Volumenstromsensoren oder Nahinfrarotspektroskopie wäre dafür denkbar. (Schlögl 2021)

Die Sortierung von getrennt gesammelten Leichtverpackungsabfällen (LVP) findet in für diese Aufgabe konzipierten Sortieranlagen statt. Das Ziel bei der Sortierung des bei der Abfallsammlung erzeugten Gemischs verschiedener Leichtverpackungen ist es, diese in möglichst reine Fraktionen von Kunststoffsorten zu separieren. Dadurch wird eine optimale Ausgangslage für nachfolgende Recyclingprozesse geschaffen. (Bundesverband Sekundärrohstoffe und Entsorgung) Ein häufig verwendetes Standardaggregat in diesen Anlagen stellt der Ballistikseparator dar, durch welchen eine Trennung von hartem, rollendem dreidimensionalem (3D) Material und weichem, zweidimensionalem (2D) Material vorgenommen wird. (Sigmund 2018)

#### 1.1 Problemstellung

Wie bereits erläutert könnte die sensorische Stoffstromüberwachung mittels Volumenstromsensoren eine vielversprechende Methode sein, zu der Digitalisierung von LVP-Anlagen beizutragen und durch Echtzeitmonitoring und entsprechende Reaktionen eine Effizienzsteigerung dieser Anlagen zu bewirken.

Für den Transport der Materialströme in den Anlagen werden überwiegend Gurtbandförderer genutzt, welche glatt, profiliert oder mit Stollen/Mitnehmern ausgestattet sein können. (Neubauer et al. 2021) Um die Volumenstrommessung verlässlich in der gesamten Anlage nutzen zu können, werden Daten benötigt, die einen Einfluss von Mitnehmern auf die Volumenstrommessung aufzeigen, um die Daten der verschiedenen Bänder vergleichbar zu machen. In der Literatur lassen sich bisher keine solchen Untersuchungen finden.

Stoffströme in Sortieranlagen unterliegen in der Regel Schwankungen in Durchsatz und Zusammensetzung. Diese beeinflussen die Performance der einzelnen Aggregate und somit auch die Performance der Gesamtanlage. (Küppers et al. 2022; Heinrichs et al. 2022) Die Schwankungen können beispielsweise durch Dosieraggregate oder Materialverhalten ausgelöst werden. Ein zu hoher Durchsatz wirkt sich negativ auf die Sortierleistung aus, während ein zu geringer Durchsatz Einbußen bezüglich der Wirtschaftlichkeit einer Sortieranlage mit sich bringt. (Heinrichs et al. 2022) Bisher existiert keine standardisierte Möglichkeit für die Quantifizierung dieser Schwankungen. Auch der Einfluss der einzelnen Aggregate auf schwankende Stoffströme ist kaum untersucht. Eine Quantifizierung von Schwankungen durch Stoffstromüberwachung in Echtzeit in Kombination mit detaillierten Informationen über den Einfluss von Aggregaten auf Fluktuationen könnte eine Möglichkeit darstellen, diese gezielt zu kontrollieren und dadurch die Sortierleistung zu verbessern. (Feil und Pretz 2018)

### 1.2 Zielsetzung und Forschungsfragen

Im Rahmen dieser Arbeit wurden praktische Versuche im semi-industriellen Maßstab durchgeführt, die der Beantwortung von zwei zugrunde liegenden Forschungsfragen dienen. Die Forschungsfragen gehen aus Gesprächen mit dem Anlagenhersteller Stadler Anlagenbau GmbH hervor. Sie umfassen ungelöste Probleme in der Planung und dem Betreiben von Sortieranlagen. 1. Inwiefern beeinflussen Mitnehmer die Messungen von Volumenstromsensoren bei unterschiedlichen Durchsätzen?

Die These, die durch die Versuche validiert oder widerlegt werden soll, lautet: Mit höherem Durchsatz steigt der Effekt von Mitnehmern auf die Volumenstrommessung, da sich Material auf den Mitnehmern türmt und die gemessene Höhe der Materialschicht verfälscht.

Für die Beantwortung dieser Fragestellung werden Volumenstrommessungen bei verschiedenen Durchsätzen und Folienanteilen des Materialgemischs sowohl auf einem glatten Förderband als auch auf einem Band, welches mit Mitnehmern besetzt ist, durchgeführt und verglichen.

#### 2. Welchen Einfluss hat der Ballistikseparator auf mittelfristige Durchsatzschwankungen eines LVP-Stoffstroms mit unterschiedlichen Folienanteilen?

Eine erste Vermutung ist, dass die Vergleichmäßigung von Schwankungen in den 2D-Stoffstrom besser ist als in den 3D-Stoffstrom, da das 2D-Material eine längere Aufenthaltszeit auf dem Ballistikseparator hat. Somit werden die Schwankungen eher in den 3D-Strom übertragen und im 2D-Strom ausgeglichen.

Um diese Fragestellung zu untersuchen, werden in einer Versuchsanlage künstlich Schwankungen von 45 Sekunden erzeugt und Durchsatzdaten des Gesamtstoffstroms und der beiden Outputströme mittels sensorgestützter Messmethoden generiert. Es wird eine Methode erarbeitet, die die Quantifizierung der Schwankungen anhand der aufgezeichneten Durchsatzdaten ermöglicht und damit eine Vergleichbarkeit der Vergleichmäßigungsfähigkeit des Ballistikseparators bei verschiedenen Parametern ermöglicht. Die veränderlichen Parameter *Paddelbelag, Winkel der Paddelfläche, Folienanteil* und *Drehzahl* werden einbezogen. Des Weiteren werden Versuche durchgeführt, die Erkenntnisse über die materialspezifische Verweilzeit liefern, um die These der längeren Aufenthaltszeit des 2D-Materials zu beleuchten.

## 2 Theoretische Grundlagen

In diesem Kapitel werden die theoretischen Grundlagen der Thematik erläutert. Auf eine Einführung in die rechtlichen Rahmenbedingungen der Abfallwirtschaft in der Europäischen Union und einen Überblick über die geltenden Verwertungsziele und die aktuellen Recyclingquoten folgt eine Übersicht über die Sammlung und Aufbereitung von LVP-Abfällen in Österreich und Deutschland. Besonderes Augenmerk liegt auf der Vorstellung der Sortieranlagen und der Sortieraggregate. Es werden sowohl die Auswirkungen von Schwankungen in Anlagen als auch der Stand der Technik von sensorischer Stoffstromüberwachung thematisiert.

#### 2.1 Rechtliche Grundlagen

Für das Erreichen der Ziele der Kreislaufwirtschaft wurden auf europäischer Ebene weitreichende rechtliche Regelungen festgelegt, welche unter anderem die Abfallrahmenrichtlinie und die Richtlinie über Verpackungen und Verpackungsabfälle umfassen. Die Umsetzung dieser Richtlinien erfolgte in Deutschland durch das Gesetz zur Förderung der Kreislaufwirtschaft und Sicherung der umweltverträglichen Bewirtschaftung von Abfällen (Kreislaufwirtschaftsgesetz, KrWG) und das Verpackungsgesetz (VerpackG). (Umweltbundesamt Deutschland 2022) In Österreich wurden die europäischen Richtlinien durch das Abfallwirtschaftsgesetz und die Verpackungsverordnung in nationales Recht umgesetzt. (Parlament Österreich 2002, 2014)

In der Abfallrahmenrichtlinie ist der Begriff *Abfall* rechtlich definiert. Danach sind Abfälle Stoffe oder Gegenstände, derer sich ihr Besitzer entledigt, entledigen muss oder entledigen will. (Europäisches Parlament 19.11.2008)

Als zentrales Objekt der Richtlinie gilt die Abfallhierarchie, die sowohl in deutsches als auch in österreichisches Recht übernommen wurde. Diese stellt eine Prioritätenreihenfolge für den Umgang mit Abfällen dar. Sie ist jedoch nicht verpflichtend für alle Abfälle zu sehen, da immer die Maßnahme bevorzugt werden muss, die den besten Schutz für Mensch und Umwelt sicherstellt. Die bevorzugte Maßnahme kann je Abfallart individuell sein. (Bilitewski und Härdtle 2013)

Die Abfallhierarchie ist in Abbildung 1 dargestellt. Die erste Priorität bei der Behandlung von Abfällen hat die Vermeidung. Darunter fällt zum einen die Reduzierung von Abfallmengen, aber beispielsweise auch die Verringerung von schädlichen Stoffen in Materialen. Auf die Vermeidung folgt die Vorbereitung zur Wiederverwendung. Darunter fallen Reinigung und Reparaturen von Abfällen, sodass diese wiederverwendet werden können. Das Recycling umfasst alle Verwertungsverfahren zur Herstellung von Materialen für den ursprünglichen oder zu

4

anderen Zwecken. Es folgt die sonstige Verwertung, die zum Beispiel die energetische Verwertung von Abfällen beinhaltet. Als letzte Priorität wird die Beseitigung genannt. (Bilitewski und Härdtle 2013)



#### Abbildung 1: Abfallhierarchie laut Abfallrahmenrichtlinie (Eigene Darstellung)

In der europäischen Abfallrahmenrichtlinie findet sich neben der Definition von Abfällen auch eine Definition von Verpackungen. Diese umfasst alle Produkte zur Aufnahme, zum Schutz, zur Handhabung, zur Lieferung und zur Darbietung von Waren. Verpackungen können aus beliebigen Stoffen bestehen. (Europäisches Parlament 19.11.2008)

Gegenstand dieser Arbeit sind Abfälle aus Leichtverpackungsmaterialien. Leichtverpackungen werden in Deutschland vorwiegend über den gelben Sack oder die gelbe Tonne gesammelt. Diese umfassen Verpackungen aus Weißblech, Aluminium und verschiedenen Kunststoffarten sowie Getränkekartons. (Umweltbundesamt Deutschland 2021) In Österreich erfolgt die landesweite Erfassung von Leichtverpackungsabfällen erst seit dem 01.01.2023 durch eine Umstellung des Sammelsystems. Dadurch sind die Sammelquoten bereits deutlich gestiegen, es muss jedoch ein weiterer Anstieg erfolgen, um die Recyclingquoten der Europäischen Union erfüllen zu können. (Bundesministerium für Klimaschutz, Umwelt, Energie, Mobilität, Innovation und Technologie Österreich 2023)

In Tabelle 1 ist eine Gegenüberstellung der aktuell erreichten Recyclingquoten und den für 2030 rechtlich festgelegten Quoten in Europa, Deutschland und Österreich aufgeführt. Sowohl für Leichtverpackungen aus Plastik und Metallen als auch für die Gesamtheit der Verpackungen, welche auch andere Materialien wie Glas miteinschließen, liegen die Recyclingvorgaben bis 2030 in der EU, Deutschland und Österreich über den aktuell erreichten Quoten. Besonders deutlich wird die Diskrepanz zwischen den aktuellen Recyclingquoten und den gesetzlichen Vorgaben bis 2030 bei Kunststoffverpackungen.

Tabelle 1: Vergleich der aktuellen Recyclingquoten und gesetzlichen Vorgaben bis 2030 (Eigene Darstellung nach Eurostat 2023; Bundesministerium für Land- und Forstwirtschaft, Umwelt und Wasserwirtschaft Österreich 2014; Europäisches Parlament 20.12.1994; Deutscher Bundestag 05.07.2017)

Material	Europäiscl	ne Union	Deutschland		Österreich	
	Aktuelle Recyclingquote (2020) in M-%	Vorgabe bis 2030 in M-%	Aktuelle Recyclingquote (2020) in M-%	Vorgabe bis 2030 in M-%	Aktuelle Recyclingquote (2020) in M-%	Vorgabe bis 2030 in M-%
Verpackungen (gesamt)	64	70	68,1		63,7	70
Kunststoff	37,6	55	46,2	70	31,6	55
Eisenmetalle	75.7	80	02.4	90	66.1	80
Aluminium	75,7	60	03,4	90	00,1	60

#### 2.2 Aufbereitung von Leichtverpackungsabfällen

Nachfolgend wird ein Überblick in die Behandlung von LVP-Abfällen gegeben. Dafür wird sowohl das Gesamtkonzept der Sortieranlagen erläutert als auch ein detaillierterer Einblick in die Funktionsweise des Ballistikseparators gegeben. Auch die Herausforderungen bei der Aufbereitung von LVP-Material werden beleuchtet.

#### 2.2.1 Sortieranlagen

Wie bereits in Kapitel 1 erwähnt, werden für Abfälle aus Leichtverpackungen, die unter dem Aspekt der stofflichen Verwertung behandelt werden sollen, spezielle LVP-Sortieranlagen konstruiert. Nachfolgend werden diese Anlagen erläutert. LVP-Sortieranlagen können je nach Inputmaterial und Anforderung sehr variabel gestaltet sein, sodass es keinen allgemein gültigen Aufbau gibt. (Cimpan et al. 2016) Durch die kürzliche Umstellung des Sammelsystems und somit der Zusammensetzung von Verpackungsabfällen in Österreich befinden sich die Anlagen in der Weiterentwicklung (Verband Österreichischer Entsorgungsbetriebe 17.06.2021). In Deutschland lässt sich angesichts der etablierten bundesweiten Erfassung von LVP-Abfällen bereits von einer gewissen Standardisierung der Anlagen sprechen. (Knappe et al. 2021)

Ein beispielhaftes Schema einer LVP- Sortieranlagen ist in Abbildung 2 dargestellt. Nach der Anlieferung durch die Sammelfahrzeuge gelangt das Material in einen Bunker, in dem es bis zu der Aufgabe in die Anlage zwischengelagert wird. Die Aufgabe erfolgt meist mittels manuell gesteuerter Greifarme oder Radladern. Ein Sacköffner legt die Gebinde frei, in denen das Material teilweise angeliefert wird, wenn die Sammlung beispielsweise mittels gelber Säcke erfolgt. (Neubauer et al. 2021) Durch Siebe wird der Abfall in verschiedene Korngrößenbereiche klassiert. In Abbildung 2 wird dieser Klassierungsschritt durch ein Trommelsieb repräsentiert. Es erfolgt eine Auflockerung des Materials durch die Drehbewegung der Siebtrommel. Diese ist geneigt, sodass der Stoffstrom von einem zum anderen Ende des Siebes befördert wird. Bei hoher Drehgeschwindigkeit des Siebes kann es wegen zu geringer Aufenthaltszeit des Materials zu unzureichender Trennwirkung kommen, während eine geringe Drehgeschwindigkeit Agglomerationen zur Folge haben kann. (Feil und Pretz 2020)

Windsichter trennen Stoffströme aufgrund von Dichte, Korngröße und Kornform in eine Schwer- und eine Leichtfraktion. Ein von einem Ventilator erzeugter Luftstrom durchströmt einen Kanal, dem das Material zugeführt wird. Die Schwerfraktion fällt herunter, die Leichtfraktion wird durch den Luftstrom in einen Abscheider befördert. Die dort vorherrschenden Strömungsbedingungen sorgen für eine Beruhigung des abgetrennten Materials. Die Geschwindigkeit des Luftstroms kann variiert und so auf die abzutrennenden Materialien angepasst werden. Für die Abtrennung von Kunststofffolien beträgt sie bei vorklassiertem Hausmüll ca. 10-12 m/s. Um eine gute Trennwirkung zu gewährleisten, sollte eine spezifische Belastung von 0,35 kg pro Kubikmeter Sichtluft nicht überschritten werden. (Kranert et al. 2017) Für die Abtrennung von Kunststofffolien aus biogenen Siedlungsabfällen können Abscheidegrade von etwa 80% erreicht werden. (Wellacher und Kunter 2017)

Es folgt die Abscheidung von Eisen- (FE) und Nicht-Eisen- (NE) Metallen bzw. ihren Legierungen aus dem Leichtverpackungsgemisch. Die Abtrennung magnetisierbarer Eisenmetalle, im Fall des betrachteten Stoffstroms zum Beispiel Weißblechdosen, erfolgt durch einen Überbandmagneten. Dieser befindet sich längs oder quer zur Förderrichtung des Materials über dem Bandförderer und transportiert die Metalle durch Magnetisierung mittels einem eigenen, am Magneten angebrachten Förderband, aus dem Stoffstrom. (Bilitewski und Härdtle 2013; Feil und Pretz 2020)

Nicht magnetische Metalle, die in einem Leichtverpackungsgemisch meist in Form von Aluminiumdosen vorliegen, werden durch Wirbelstromscheider abgetrennt. Dabei können auch mit Aluminium beschichtete Flüssigkeitskartons fehlausgetragen werden. (Knappe et al. 2021) Das Prinzip basiert auf der Induktion von Spannungen in stark leitfähige Partikel. Die dabei entstehenden Wirbelströme sind von einem eigenen Magnetfeld umgeben, welches dem Erregerfeld entgegengesetzt ist. Dadurch kommt es zu einem Abstoßmechanismus, der Partikel von der Trommel des Wirbelstromscheiders wegbewegt. Durch einen Trennscheitel kann basierend auf der Flugbahn eingestellt werden, welche Partikel ausgetragen werden. Dabei spielen z.B. die Größe und Form der Partikel, aber auch der elektrische Widerstand eine Rolle. (Kranert et al. 2017) Nach der Metallabscheidung folgt die Aufbereitung durch Ballistikseparatoren. Da diese in der vorliegenden Arbeit von zentraler Bedeutung sind, wird die Funktionsweise ausführlich in Kapitel 2.2.2 erläutert.

Die mehrstufige NIR-Sortierung ist ein wichtiger Bestandteil von LVP- Sortieranlagen. Durch diese etablierte Art der sensorgestützten Sortierung werden unterschiedliche Materialklassen erkannt und sortiert. (Knappe et al. 2021) In dem vorliegenden Beispiel wird ein Mischkunststoffstrom in die Kunststoffe Polystyrol (PS), Polyethylenterephthalat (PET), Polyethylen (PE) und Polypropylen (PP), sowie eine Papier-, Pappe-, Kartonfraktion und eine verbleibende Mischkunststofffraktion separiert. Oberhalb des Zulaufförderbandes befindet sich eine Scannereinheit, die das Material identifiziert und die Partikel einer Materialklasse zuordnet. Die genaue Funktionsweise der Scannereinheit ist in Kapitel 2.3.1 erläutert. Durch die hinterlegte Bandgeschwindigkeit kann der Zeitpunkt bestimmt werden, an dem die identifizierten Partikel die am Ende des Bandes befindliche Düsenleiste erreichen. Diese befördert die auszusortierenden Partikel mittels Druckluft in den Auswurf/Eject. Die Partikel, die ausgestoßen werden, gelangen in den Durchlauf/Reject. nicht Bei der Positivsortierung wird der Wertstoff mittels Druckluft in die Ejectfraktion ausgetragen, während die Negativsortierung auf den Austrag des Wertstoffs in die Rejectfraktion abzielt. Die Störstoffe gelangen in die Ejectfraktion. (Lorber 2010) In Sortieranlagen können beide Arten der Sortierung nacheinander verwendet werden. Beginnend mit dem "Rougher" werden die Wertstoffe in die Ejectfraktion ausgetragen, wobei die Ausbeute des Wertstoffes in der Ejectfraktion im Fokus steht. Dabei kann es passieren, dass Störstoffe mitgerissen werden. Es folgt der "Cleaner", welcher die Störstoffe der entstandenen Ejectfraktion aussortiert und somit auf eine hohe Reinheit der Wertstofffraktion abzielt. Durch den "Scavenger" können falsch ausgetragene Wertstoffe aus den Störstoffraktionen zurückgewonnen werden. Dieses Prinzip verspricht die Kombination von einer hohen Ausbeute des Wertstoffes bei gleichzeitig hoher Reinheit des Stoffstroms. Bei der Verwendung von einer einzelnen Sortiereinheit kann der Fokus entweder auf der Reinheit oder dem Ausbringen liegen, da sich beide Eigenschaften widersprechen. (Schlögl 2021; Feil und Pretz 2020)

Die Handsortierung wird in modernen Sortieranlagen meist lediglich als abschließende Qualitätskontrolle durchgeführt. (Schlögl 2021)

Für die NIR-Sortierung ist es notwendig, dass das Material im Zulauf vereinzelt ist und keine Überlagerungen vorliegen. Andernfalls kommt es zu Fehlerkennung der Materialien oder Mitreißern während des Druckluftaustrages. (Kroell et al. 2022)

Besonders Folien erschweren den Prozess der NIR-Sortierung, da sie andere Partikel aufgrund ihrer Größe verdecken und eine Relativbewegung auf dem Förderband verrichten, wodurch die durch die Bandgeschwindigkeit errechnete Position der Partikel abweichen kann. (Kranert et al. 2017; Jansen et al. 2015; Knappe et al. 2021)



Abbildung 2: Schematische Darstellung einer LVP-Sortieranlage (Eigene Darstellung nach Schlögl 2021; Schwarzenbacher 2022)

#### 2.2.2 Ballistikseparator

Das zentrale Aggregat dieser Arbeit ist der Ballistikseparator. Aus diesem Grund wird die Funktion in diesem Kapitel näher erläutert.

Der Ballistikseparator findet in verschiedenen Aufbereitungsprozessen Anwendung, wie beispielsweise bei der Trennung von Störstoffen in Ersatzbrennstoffaufbereitungsanlagen, bei der mechanisch-biologischen Aufbereitung von Restmüll, bei der Nachsortierung von Fraktionen für die Verfüllung in eine Deponie (Augustin Entsorgung Holding GmbH 2023), aber auch bei der Trennung von Papier, Pappe und Kartonagen (Stadler Anlagenbau GmbH 2023a).

In LVP-Sortieranlagen wird er verwendet, um flache Partikel wie Folien von rollbaren Partikeln mit ballistischen Eigenschaften wie unbeschädigte Flaschen und Schalen voneinander zu trennen. (Feil und Pretz 2020) Je nach Ausführung kann auch eine dritte Fraktion, die Feinfraktion, erzeugt werden. Häufig wird auch von der Trennung in 2D- und 3D- Partikel gesprochen. Erstere sind eher weich und flach, letztere eher hart und rollend. (Sigmund 2018) Diese Definition wird für die folgenden Kapitel dieser Arbeit übernommen.

Der Ballistikseparator trennt Partikel nach ihren Eigenschaften, ist allerdings nicht *typselektiv*, sodass Artikel der gleichen Art in unterschiedliche Fraktionen ausgetragen werden können. Als Beispiel sind hier Getränkekartons aufzuführen, die durch ihre Verformbarkeit sowohl in unbeschädigter, dreidimensionaler Form, als auch in kompaktierter, zweidimensionaler Form vorliegen können.

Die Trennung erfolgt mittels kreisförmiger Bewegungen von Paddelsegmenten, die auf einer geneigten Ebene angebracht sind. Diese Ebene lässt sich bis zu 25° neigen. Die Kreisbewegung der Paddel, welche zwischen 300 und 800 Millimetern breit sein können, erfolgt versetzt. 3D-Partikel erfahren eine nach unten gerichtete Bewegung aufgrund der Schwerkraft, während 2D-Partikel eine Aufwärtsbewegung erfahren, die durch Reibungskräfte bedingt ist. (Feil und Pretz 2020) In Abbildung 3 ist das beschriebene Funktionsprinzip des Ballistikseparators verdeutlicht.



# Abbildung 3: Funktionsprinzip des Ballistikseparators (Eigene Darstellung nach Martens und Goldmann 2016)

Die Paddelbeläge können je nach Anwendungszweck variieren. In Abbildung 4 ist ein Vergleich von offenen und geschlossenen Paddelbelägen zu sehen. Die offenen Paddelbeläge können ebenfalls anhand der Größe der Lochung variieren. In der

Abbildung sind Paddel mit einer Lochung von 45 Millimeter zu sehen (vorne), bei denen Material, welchen kleiner als 45 Millimeter ist in das Feingut ausgetragen wird. Bei geschlossenen Paddelbelägen (hinten) entfällt die Feinfraktion. Durch die etablierte Aufteilung der Ebene in mehrere Paddel entsteht eine höhere Transportgeschwindigkeit des Materials in die 2D-Fraktion als bei der Verwendung eines großen Paddels. (Sigmund 2018)

Die Neigung der Ebene beeinflusst die Sortierperformance des Aggregates. Ein flacher Winkel der Paddelebene führt tendenziell zu einer reineren 3D-Fraktion als ein steiler Winkel, während es sich bei der 2D-Fraktion gegenteilig verhält. Ein weiterer Einflussfaktor ist der Durchsatz. Eine Durchsatzreduzierung wirkt sich positiv auf die Reinheit beider Fraktionen aus. Außerdem kann die Reinheit durch den Einsatz mehrerer aufeinanderfolgender Ballistikseparatoren gesteigert werden. (Sigmund 2018; Möllnitz et al. 2021)



Abbildung 4: Offene und geschlossene Paddelbeläge auf dem Ballistikseparator (Eigene Abbildung)

In LVP-Sortieranlagen befindet sich der Ballistikseparator häufig nach den Trommelsieben und vor den NIR-Sortierern. Dort dient er der Vorkonditionierung des Stoffstroms für die gegen Folien anfällige Sensorsortiertechnik. (Sigmund 2018; Feil und Pretz 2020)

#### 2.2.3 Herausforderungen bei der Aufbereitung

Da LVP-Abfälle eine variable Zusammensetzung haben und die Trennung in sortenreine Fraktionen eine Herausforderung darstellt, wird LVP-Sortieranlagen im Allgemeinen eine geringe Effizienz zugeschrieben. Generell beeinflusst nicht allein der Sortierprozess die Effizienz der Aufbereitung von Abfällen. Wie in Abbildung 5 veranschaulicht, gibt es drei Hauptprozessschritte, von denen jeder zu der endgültigen

Verwertungsrate beiträgt. Diese sind die Sammlung, die Sortierung und das Recycling des sortierten Konzentrates. In der Darstellung wird jedem einzelnen Prozess ein Wirkungsgrad 80% zugeschrieben. Dadurch können 100% n von von Verpackungsabfall 51% zu Rezyklat verarbeitet werden, während die Verluste anderen Verwertungswegen, beispielsweise energetischer Verwertung, zugeführt werden. Während die Steigerung der Sammelquoten hauptsächlich durch politische Maßnahmen beeinflusst werden kann, spielen bei der Sortierung und dem Recycling in erster Linie technische Verbesserungen eine Rolle. (Küppers et al. 2022)



Abbildung 5: Verluste bei dem stofflichen Aufbereitungsprozess von Verpackungsabfällen (Eigene Darstellung nach Küppers et al. 2022)

Jedoch sind nicht ausschließlich technische Faktoren relevant. Wagner et al. (2017) nennen drei mögliche Größen, die Einfluss auf den Sortierprozess nehmen:

- Technische Möglichkeiten
- Wirtschaftliche Möglichkeiten
- Rechtliche Rahmenbedingungen

Die **rechtlichen Grundlagen** wurden bereits in Kapitel 2.1 behandelt. Festgelegte Quoten für die werkstoffliche Verwertung schaffen dabei die Rahmenbedingungen.

In Hinblick auf die **wirtschaftlichen Möglichkeiten** ist zu beachten, dass durch den Recyclingprozess erzeugte Rezyklate in Konkurrenz zu dem Primärrohstoff stehen. Oft bevorzugen Hersteller im Kunststoffbereich die Verwendung von Primärrohstoffen, da diese eine gute Verfügbarkeit und einen geringeren Preis als recycelte Kunststoffe aufweisen. Hinzu kommen Vorbehalte gegenüber der Reinheit und Funktionsfähigkeit von Rezyklaten. (Jetzke und Richter 2020) Doch auch bei Marktpreisen, die vorteilhaft für die Rezyklate sind, können die Kosten für den Aufbereitungsprozess derzeit kaum gedeckt werden. Abhängig von der Größe der Anlage betragen die Prozesskosten für die LVP-Aufbereitung in Anlagen mit geringeren Durchsätzen etwa 110 €/t und bei durchsatzstärkeren Anlagen ca. 70 €/t. Die Kosten für die Sortierung der Abfälle machen 30% bis 50% der Gesamtkosten des Behandlungsprozesses aus. (Cimpan et al. 2016) Für eine wirtschaftliche Effizienzsteigerung und einen vermehrten Ersatz von Primärrohstoffen durch Rezyklate leistet die Steigerung der Sortierproduktivität einen notwendigen Beitrag. (Jetzke und Richter 2020)

Die technischen Möglichkeiten grenzen die Erzeugung von hochwertigen, sortenreinen Produkten ein. Durch technische Innovationen können Parameter

innerhalb einer Anlage beeinflusst werden, die die Gesamteffizienz einer Anlage abbilden. Feil et al. (2016) haben diese Parameter, die die Effizienz von Sortieranlagen genauer beschreiben, wie folgt definiert:

 Die Massenrückgewinnung R<sub>M</sub> bildet das Verhältnis der Masse des Sortierproduktes (m<sub>Output</sub>) zu der Gesamtmasse des eingespeisten Materials (m<sub>Input</sub>) ab.

$$R_M(\%) = \frac{m_{Output}}{m_{Input}} \times 100 \tag{1}$$

 Die Ausbeute R<sub>W</sub> beschreibt das Verhältnis zu der im Output enthaltenen Masse eines Wertstoffes zu der Masse des Wertstoffes, welche im Input enthalten ist. Dabei stellt m<sub>Output</sub> beziehungsweise m<sub>Input</sub> die Masse des Outputbeziehungsweise Inputstroms dar, während c<sub>Output</sub> und c<sub>Input</sub> die Konzentrationen in der jeweiligen Fraktion abbilden.

$$R_W(\%) = \frac{(m_{Output} \times c_{Output})}{(m_{Input} \times c_{Input})} \times 100$$
<sup>(2)</sup>

 Das Verhältnis von der in dem entsprechenden Outputstrom enthaltenen Masse Wertstoffes bzw. des rezyklierbaren Produktes m<sub>rezyklierbare Masse</sub> zu der Gesamtmasse des entsprechenden Outputstroms wird als Reinheit P<sub>M</sub> bezeichnet. Die Gesamtmasse des Outputstroms wirdin der folgenden Formel über die Addition von m<sub>rezyklierbare Masse</sub> und die Masse der Störstoffe m<sub>Störstoffe</sub> berechnet.

$$P_{M}(\%) = \frac{m_{rezyklierbare\ Menge}}{(m_{rezyklierbare\ Menge} + m_{Störstoffe})} \times 100$$
(3)

Die bereits erwähnte Komplexität des Stoffstroms stellt eine Herausforderung für Sortierprozesse dar. Die derzeit geringe Verwertungsrate des Abfalls ist außerdem auch auf zeitweise Überbeschickung zurückzuführen. Das bedeutet, dass die Anlagen mit einem höheren Durchsatz betrieben werden, als in der Auslegung geplant wurde, sodass Aggregate ihre angestrebten Effizienzen nicht erreichen. (Cimpan et al. 2016)

Über die generelle Überlastung einer Anlage hinaus haben Schwankungen in Menge und Zusammensetzung einen großen Einfluss auf deren Leistung. (Küppers et al. 2022) Fluktuationen können durch verschiedene Mechanismen ausgelöst werden. Dazu zählt der unregelmäßige Stoffaustrag aus Aggregaten (z.B. Trommelsiebe) und unregelmäßige Beschickung durch manuell gesteuerte Verlader. Feil und Pretz (2018) und Curtis et al. (2021) schlagen vor, eine zeitliche Einteilung der erzeugten Schwankungen einzuführen. Schwankungen, die aufgrund von vorgelagerten Aggregaten erzeugt werden, werden demnach als kurzfristige Schwankungen (<15 Sekunden) klassifiziert. Die diskontinuierliche Aufgabe von Material, beispielsweise durch Verladung mittels Staplern, bringt mittelfristige Schwankungen (15-600 Sekunden) mit sich. Langfristige Schwankungen (>600 Sekunden) ergeben sich durch Anlagenstopps oder durch den Ausfall einzelner Maschinen. Diese Einteilung ermöglicht die zeitlich differenzierte Untersuchung von Schwankungen und der Fähigkeit von Aggregaten, diese zu glätten.

Durchsatzspezifische Schwankungen erzeugen vorübergehend höhere Durchsätze, worauf ein Abschnitt mit geringerem Durchsatz folgt. Wie bereits beschrieben führen zu hohe Durchsätze zu einer Überbelastung von Aggregaten und damit zu Performance-Einbußen. Zu geringe Durchsätze können in Abfallbehandlungsanlagen zu Gewinneinbußen führen, da die spezifischen Behandlungskosten bei gleichbleibenden Fixkosten für die Aufbereitung steigen. (Romen 2020)

Die Probleme, die durch zu hohe Durchsätze auftreten können, werden anhand des Beispiels der NIR-Sortierer erläutert. Diese befinden sich wie in Kapitel 2.2.1 beschrieben in LVP-Anlagen häufig hinter Ballistikseparatoren und dienen der Sortierung von chemisch sortengleichen Kunststoffen. Ebenfalls bereits angesprochen wurde die Notwendigkeit der Vereinzelung von Material auf dem Zulaufband zu den NIR-Sortierern. Überlagerung von Materialien kann zu Fehlerkennung durch Mischspektren führen oder Mitreißer beim Austrag begünstigen. Besonders Folien stellen ein Problem bei der NIR-Sortierung dar, weil sie durch ihre große Oberfläche anderes Material verdecken. (Jansen et al. 2015) Unter anderem aus diesem Grund liegen die Effizienzen von sensorbasierten Sortierern oft unter denen der Herstellerangaben. (Kroell et al. 2022)

#### 2.3 Sensorische Stoffstromüberwachung

In diesem Kapitel wird ein Überblick über die sensorische Stoffstromüberwachung gegeben. Dabei werden zur Verfügung stehende Systeme, der aktuelle Einsatz und die Potentiale thematisiert, die diese Methode bietet.

#### 2.3.1 Möglichkeiten der sensorischen Stoffstromüberwachung

Für die vorliegende Diplomarbeit werden die praktischen Versuche mittels Volumenstrommessung und Nahinfrarotspektroskopie überwacht. Beide Systeme werden folgend kurz beschrieben.

**Volumenstrommessung mittels LIDAR-Technologie:** Eine Möglichkeit der volumetrischen Messung von Stoffströmen stellt die "Light Detection and Ranging (LIDAR)" – Technologie dar. LIDAR basiert auf Lichtlaufzeitmessung. Bei der Lichtlaufzeitmessung wird zunächst ein Lichtstrahl von dem Sensor auf eine *Kalibrationsebene* ausgesandt, deren Abstand zu dem Sensor bekannt ist. Befinden sich nach der Kalibration Objekte auf der Ebene, detektiert der Sensor die Zeit t, die das reflektierte Licht benötigt, um wieder bei Detektionseinheit des Sensors einzutreffen. Durch die Geschwindigkeit des Lichtes c kann die Entfernung d des Objektes wie in Formel 4 ermittelt werden (Beyerer et al. 2012).

$$d = \frac{1}{2}ct \tag{4}$$

Durch die vorangegangene Kalibrierung wird der Abstand des Förderbandes ermittelt, sodass ein Volumenstrom errechnet werden kann, indem der Sensorabstand zum gemessenen Objekt von dem Sensorabstand zum Förderband subtrahiert wird. Durch die hinterlegte Bandbreite und die Bandgeschwindigkeit kann die Fläche pro Zeiteinheit kalkuliert werden und mit der Höhe (Abstand Sensor – Objekt) multipliziert werden. Das Ergebnis ist der Volumenstrom in Volumen pro Zeiteinheit.

Nahinfrarotspektroskopie: Die Nahinfrarot (NIR) – Spektroskopie basiert auf den Reflexionseigenschaften von Materialien. Bei der Bestrahlung mit Licht im NIR-Bereich, welches Wellenlängen von 800 bis 2400 Nanometer abdeckt, werden Molekülschwingungen angeregt. Ein Teil der Wellenlängen wird absorbiert, während ein anderer Teil diffus reflektiert wird. Das reflektierte Licht wird von dem Sensor detektiert. Das Spektrum der absorbierten und reflektierten Wellenlängen unterscheidet sich je Molekül in Zusammensetzung und Intensität, wodurch verschiedenen Materialien charakteristische Spektren zugeordnet werden können. (Lorber 2010) Eine beispielhafte Darstellung der Spektren beliebiger Materialien ist in der folgenden Grafik abgebildet. Die X-Achse kennzeichnet die Wellenlänge in Nanometer. Die Y-Achse bildet die Intensität in Watt pro Quadratmeter ab. Die rot hinterlegten Bereiche kennzeichnen die Bereiche, an denen die Spektren charakteristische Ausschläge aufweisen und können in der entsprechenden Software mit höherer Wichtigkeit versehen werden.



Abbildung 6: Beispieldarstellung von NIR-Absorptionsspektren (Küppers et al. 2019)

Da die Eindringtiefe der NIR-Strahlung 3 bis 4 Millimeter beträgt, wird eine gewisse Beständigkeit gegenüber Verschmutzungen gewährleistet. (Bilitewski und Härdtle 2013) Allerdings können sogenannte *Multilayerkunststoffe*, die aus mehreren übereinander gelagerten Materialien bestehen, dennoch ein Problem bei der Erkennung darstellen, da Mischspektren entstehen können. (Feil und Pretz 2020)

Durch das Aufnehmen und Hinterlegen von Spektren bekannter Materialien wird eine *Spektrendatenbank* erstellt. Wird ein Partikel von dem Sensor detektiert, kann dieser das vorliegende Spektrum mit denen der Datenbank abgleichen und einer Materialklasse zuordnen, sofern diese in der Datenbank vorhanden ist. Um die Zuordnung der Spektren so korrekt wie möglich ausführen zu können, müssen die Spektren gut voneinander differenzierbar sein. Die Spektren unterliegen immer einem gewissen Rauschen, welches häufig durch die Verwendung der ersten Ableitung geglättet und normiert wird. Das Rauschen der Spektren muss kleiner sein als die Differenzen der zu unterscheidenden Spektren. Dies ist bei Kunststoffen, mit Ausnahme von rußgeschwärzten Kunststoffen, der Fall. (Parrodi et al. 2021)

Stand der Technik und Potentiale der sensorischen Stoffstromüberwachung: Curtis et al. (2021) und Parrodi et al. (2021) stellten in Untersuchungen fest, dass sowohl die quantitative Stoffstromüberwachung mittels Messtechniken zur Volumenstrommessung und NIR-Spektroskopie auch als die qualitative Stoffstromüberwachung mittels **NIR-Spektroskopie** Abfallwirtschaft in der grundsätzlich möglich ist und valide Ergebnisse liefert.

Bisher werden Massenbilanzen von Abfallbehandlungsanlagen häufig nur durch Waagen an den Ein- und Ausgängen quantifiziert. Bezogen auf LVP-Stoffströme spricht gegen diese Art der Materialstromüberwachung allerdings die geringe Dichte des Materials, weil sie zu ungenauen Aussagen führt. Außerdem geben die Ein- und Ausgangskontrollen keinen Aufschluss über die Materialzusammensetzung oder das Verhalten der Stoffströme während des Prozesses. (Feil et al. 2019)

Obwohl die Echtzeitüberwachung des Materialflusses in einer Anlage große Vorteile mit sich bringen könnte, haben bisher wenige Anlagen eine ausgereifte volumetrische Überwachung. (Feil et al. 2016) Überwiegend in großen, fortschrittlichen Anlagen mit Kapazitäten von bis zu 100.000 Tonnen pro Jahr wird die automatische Überwachung von Stoffströmen genutzt und teilweise Forschungsarbeit geleistet, um neue Technologien zu testen. (Cimpan et al. 2016)

In der Literatur lassen sich einige Studien finden, die das Potential der Echtzeit-Stoffstromüberwachung verdeutlichen, um die Performance von Anlagen zu verbessern. (Curtis et al. 2021; Heinrichs et al. 2022; Kleinhans et al. 2022) Auch die Relevanz der Gleichmäßigkeit von Stoffströmen für die Effizienz einer Anlage wird in einigen Studien hervorgehoben. Feil und Pretz (2018) vertreten die Auffassung, dass die Vergleichmäßigung von Stoffströmen erhebliche Potentiale in Bezug auf Kapazitätssteigerungen und qualitative Steigerungen bietet, allerdings bisher kaum Beachtung findet. Auch Heinrichs et al. (2022) sind der Meinung, dass Materialflusskontrolle eine Möglichkeit darstellt, den Durchsatz und somit die Effizienz von Anlagen steigern zu können.

Die Verknüpfung von tiefgehendem Wissen über die Fähigkeit von Aggregaten, Schwankungen in Stoffströmen ausgleichen zu können, mit Echtzeitdaten aus der sensorischen Stoffstromanalyse stellt die Grundlage für eine intelligente Anlagensteuerung dar. (Küppers et al. 2022)

## 3 Material und Methoden

In diesem Kapitel wird ein Überblick über die Versuchsanlage, das Probematerial und den Versuchsaufbau gegeben. Die Vorgehensweise für die Auswertung der Daten wird hergeleitet und dargestellt.

### 3.1 Versuchsanlage

Die Versuche für diese Diplomarbeit wurden in einer sechswöchigen Versuchsperiode im März und April 2023 im Test- und Innovationszentrum von der Stadler Anlagenbau GmbH in Krško in Slowenien durchgeführt. Die Witterungsbedingungen waren für diese Zeit entsprechend.

In dem Testzentrum werden sowohl wissenschaftliche Versuche, die der Innovation des Kunststoffsortierprozesses dienen sollen, als auch Vorführungen und Schulungen für Kunden und Mitarbeiter durchgeführt. (Stadler Anlagenbau GmbH 14.12.2020)

In der Anlage stehen verschiedene Aggregate, die einen klassischen Sortierprozess in einer LVP-Anlage simulieren können. Ein Fließbild der Anlage ist in Abbildung 7 dargestellt. Die Materialaufgabe erfolgt mittels eines Gabelstaplers mit Schaufel in den Bunker. Über eine Förderschnecke, deren Geschwindigkeit manuell eingestellt werden kann, wird das Material auf die Prozesslinie aufgegeben. Nachdem das Material den Ballistikseparator erreicht hat, wird es in die zwei Fraktionen 2D-Material und 3D-Material sortiert. Die 2D-Fraktion wird nach dem Austrag unter dem Ballistikseparator entlanggeführt. Die 3D-Fraktion fällt wenig später auf dasselbe Förderband. Bei offenen Paddelbelägen entsteht zusätzlich eine Feinfraktion, die aus dem Kreislauf ausgeschleust wird. Es folgen ein Überbandmagnet und ein Wirbelstromscheider. Abschließend befindet sich eine NIR-Sortiereinheit. Die Besonderheit der Anlage stellt die mögliche Kreislaufführung dar. Durch Reversion der Förderbänder unter der NIR-Sortiereinheit kann das Material entweder wieder vor die Dosierschnecke oder aus dem Kreislauf in einen Bunker befördert werden. Ausgeschleust wird das Material, je nachdem ob der NIR-Sortierer aktiv ist, als Eject und Reject getrennt voneinander. Bei einer Kreislaufführung wird das Material wieder zusammengeführt. Die Rundenzeit, die das Material benötigt, um den Kreislauf einmal zu passieren, wurde anhand von runden Hartplastikdeckeln mit einem Durchmesser von circa 20 Zentimetern gemessen. Dafür wurde ein Deckel vor dem Inputsensor in den Kreislauf geführt und die Zeit gestoppt, bis dieser wieder an dem gleichen Ort ankam. Die Messung wurde 20-mal bei geschlossenen Paddeln mit einer Winkeleinstellung von 20°, einem Folienanteil von 10 M-% und einem Durchsatz von 3,7 t/h, sowie 12-mal bei gleichen Einstellungen und einem Durchsatz von 1,5 t/h durchgeführt. Aus den Zeiten wurde das arithmetische Mittel gebildet, welches zu einer Rundenzeit von 2:03 Minuten führte. Zu beachten ist, dass die Deckel in die 3D-Fraktion ausgetragen wurden. Die

2D-Fraktion hat einen durch die Bandführung bedingten längeren Weg im Kreislauf zurückzulegen. Durch Zeitmessungen von den Outputstellen beider Ströme und dem Vergleich dieser konnte ermittelt werden, dass bei dem 2D-Materialstrom mit einer Rundenzeit von 2:10 Minuten zu rechnen ist (ohne Berücksichtigung der Verweilzeit auf dem Ballistikseparator).

Es besteht die Möglichkeit, einzelne Aggregate außer Betrieb zu nehmen sowie die Geschwindigkeiten der Förderbänder zu regulieren. Während der Versuche waren der Überbandmagnet, der Wirbelstromscheider und der NIR-Sortierer zumeist ausgeschaltet. Ausschließich für die Versuche zu den materialspezifischen Schwankungen waren diese eingeschaltet und wurden verwendet, um dafür hinzugefügte Metalle wieder aus dem Stoffstrom zu entfernen.



Abbildung 7: Fließbild Test- und Innovationszentrum von der Stadler Anlagenbau GmbH in Krsko (Eigene Darstellung)

Die Bandgeschwindigkeiten aller Bänder, die während der gesamten Versuchszeit eingestellt waren, sind in Tabelle 2 dargestellt.

Bandnummer	Geschwindigkeit [m/s]
1110	0,67
2011	0,52
2110	1,01
3010	1,04
3040	0,93
3030	1,14
3110	1,14
4010	1,5
4110	1,1
5010	1,05
4040	0,57
5030	0,69
5110	67,6
6010	1,13
6050	1,14
6110	1,66
6040	1,14
Loopband dunkelblau	1,32
Loopband hellblau	Stufe 1: 1,31
	Stufe 2: 2,6

Tahollo 2	· Rand	aoschwindi	akoiton	währond	dor	Varsucha
	. Danu	yeschwinnun	yneileii	wainenu	uer	versuche

#### 3.2 **Probematerial**

Für die Versuche wurde ein Gemisch aus verschiedenen Materialien eines LVP-Abfallstromes erstellt, in dem ein Teil die 3D-Fraktion und der andere Teil die 2D-Fraktion eines Ballistikseparators abdecken sollte. Der Anteil der jeweiligen Teile wurde während der Versuche variiert, sodass sich unterschiedliche 3D- und 2D-Anteile ergaben.

Das Ziel bei der Erstellung des 3D-Materialgemischs war es, eine Repräsentation eines typischen Stoffstroms in einer LVP-Anlage zu erreichen, welcher der 3D-Fraktion eines Ballistikseparators entspricht. Dafür wurde sich für die Zusammenstellung des Materialgemischs an Daten der Firma Stadler Anlagenbau orientiert. Für diese Daten wurden Analysen des Inputmaterials von mehreren Sortieranlagen in Deutschland durchgeführt. Um die Komplexität des Gemischs zu reduzieren, wurden die Daten umgerechnet, sodass das Gemisch aus den Materialien Polypropylen (PP), Polystyrol (PS) und Polyethylenterephthalat (PET) besteht, wobei letzteres in PET-Flaschen und PET-Schalen aufgeteilt wurde. In Tabelle 3 sind Anteile des 3D-Gemischs aufgezeigt.

Tabelle 3: Zusammensetzung des 3D-Materialgemischs

Material	Anteil [M-%]	
PP	58	
PS	8	
PET-Flasche	21	
PET-Schale	12	

Das Material stammt aus einer Sortieranlage in Celje in Slowenien. Ein Teil des Materials befand sich bei Versuchsbeginn bereits in der Versuchsanlage in Krško, während ein anderer Teil am 23.03.2023 aus der Sortieranlage entnommen wurde. Die PET-Fraktionen konnten als Reinfraktion entnommen werden, PP, PS und Polyethylen-High Density (PE-HD) lagen als gemischte Fraktion vor und wurden in der Versuchsanlage in Krško mittels des NIR-Sortierers nachgereinigt. Auf die Verwendung von PE-HD in dem Versuchsgemisch wurde verzichtet, da die 2D-Fraktion durch Folien aus Polyethylen-Low Density (PE-LD) repräsentiert wurde und Fehlerkennung aufgrund von ähnlichen Spektren ausgeschlossen werden sollte.

Die Folienfraktion sowie ergänzende Materialen wie Flüssigkeitskartons und Aluminiumdosen wurden ebenfalls aus der Anlage in Celje entnommen. Die für einige Versuchsreihen verwendeten FE-Dosen wurden aus Deutschland angeliefert.

Während der Probenahmen konnten keine ungewöhnlichen Begebenheiten festgestellt werden, die die Beschaffenheit des Probenmaterials beeinflusst haben könnten. Die Probenahme des PP – PS – PE-HD Gemischs aus einem Bunker der Anlage in Celje ist in Abbildung 8 dargestellt.

Die Schüttdichten der einzelnen Komponenten sind in Tabelle 4 aufgeführt. Je nach Anteil der 2D-Fraktion ändert sich die Schüttdichte des finalen Versuchgemischs. Die Bestimmung der Schüttdichten erfolgte durch Aufschüttung der Materialien in Wannen mit einem Fassungsvermögen von 80 Litern bis zum Rand, ohne das Material dabei zu kompaktieren. Dabei wurden je Fraktion drei Wannen gefüllt und der arithmetische Mittelwert gebildet. In Abbildung 9 ist dieser Prozess für die Fraktion *3D-Gemisch* dargestellt. Der Wassergehalt des Materials wurde bei den Versuchen nicht beachtet.



Abbildung 8: Probenahme des Versuchsmaterials (PP/PS/PE Gemisch)



Abbildung 9: Bestimmung der Schüttdichten der Fraktion 3D-Gemisch

Material	Schüttdichte [kg/m <sup>3</sup> ]
PP	30,2
PS	34,4
PET-Flasche	25,6
PET-Schale	18,3
PE-LD	7,5
3D-Gemisch	41,9
95 M-% 3D-Gemisch/5 M-% PE-LD	40,2
90 M-% 3D-Gemisch/10 M-% PE-LD	38,5
85 M-% 3D-Gemisch/15 M-% PE-LD	36,7
Tetra (kompaktiert)	40,8
Alu (kompaktiert)	29,8
FE-Dosen	63,1

Tabelle 4: Schüttdichten der verwendeten Fraktionen

#### 3.3 Eingesetzte Technologien

In diesem Kapitel werden die Modelle der verwendeten Sensoren und des Ballistikseparators sowie die Software für die Überwachung und Aufzeichnung der Daten vorgestellt.

#### 3.3.1 Sensoren und Software

Für die Überwachung der Stoffströme während der Versuche wurden drei NIR-Sensoren des Models HELIOS NIR G2-320 Class von der Firma EVK Kerschhaggl GmbH und vier Volumenstromsensoren mit LIDAR-Technologie des Models Tim561 von der Firma SICK verwendet. Die Sensoren liefern sekündliche Daten über die Anzahl der erkannten Pixel pro Fraktion oder über den Volumenstrom in m<sup>3</sup>/min. Die Standorte der Sensoren sind in Kapitel 3.4 beschrieben.

Vor der erstmaligen Verwendung der NIR-Sensoren wurden Weiß- und Schwarzabgleiche durchgeführt. Für den Weißabgleich wurde eine Aufnahme getätigt, bei der weiße Fliesen unter dem Erkennungsbereich des Sensors lagen. Der Schwarzabgleich wurde mittels einer Aufnahme des Förderbandes abgedeckt. Der Aufnahmebereich des Sensors wurde so eingestellt, dass ausschließlich das Förderband ohne seitliche Abstreifer zu sehen war.

Für die Erkennung der Materialklassen wurde ein *Sensorrezept* erstellt. Dafür wurden einige repräsentative Artikel jeder Klasse entnommen. Mit der Software *EVK SQALAR* wurden NIR-Aufnahmen der Partikel von den Sensoren angefertigt und die Spektren der Materialklasse zugeordnet. Auf die so erstellte Sensordatenbank kann die Software zugreifen und in der Echtzeitüberwachung die Partikel jeder angelernten Materialklasse anhand ihrer charakteristischen Spektren zuordnen. Es wurden die Materialklassen *PP, PS, PET, PE-LD, Metalle, Tetra (Getränkekartons)* und *Background* angelernt. Pixel, die keiner Materialklasse zugeordnet werden können,

werden automatisch zu der Klasse *Not classified* gezählt. Da die Materialien *Aluminium- und FE-Dosen* keine eindeutigen Spektren zeigten, wurden diese mit einem speziellen Lack behandelt, dessen Spektrum sich von denen der anderen Materialien absetzt. Die verwendeten Anlernmaterialien können Abbildung 10 entnommen werden. Abbildung 11 zeigt das Sensorrezept mit allen angelernten Spektren des Inputsensors.



Abbildung 10: Anlernmaterialien für die Erstellung der Sensorrezepte



Abbildung 11: Spektren der angelernten Materialien im Rahmen der Versuche

Während der Versuche wurden die NIR-Sensordaten in Echtzeit überwacht. Dafür wurde die Software EVK Stream Supervisor verwendet. Die erkannten Pixel je

Materialklasse wurden, wie in Abbildung 12 gezeigt, in Form von Flächendiagrammen dargestellt.

Für die Kalibrierung der Volumenstromsensoren wurde der Abstand des Sensors von dem jeweiligen Förderband und die Bandgeschwindigkeit hinterlegt. Anschließend wurde ein Referenzscan bei leerem, laufendem Band aufgenommen.



Abbildung 12: Diagramme für die Echtzeitüberwachung der NIR-Sensordaten

#### 3.3.2 Ballistikseparator

Der für die Versuche verwendete Ballistikseparator STT2000 von der Stadler Anlagenbau GmbH ist auf einen Durchsatz von 2 t/h ausgelegt und bietet Winkeleinstellungen von 0° bis 25°. Außerdem sind die Drehzahl anpassbar und die Paddelbeläge tauschbar. (Stadler Anlagenbau GmbH 2023)

In der folgenden Abbildung ist die Außenansicht des Modells STT2000 zu sehen.



Abbildung 13: Ballistikseparator STT2000 von der Stadler Anlagenbau GmbH (Stadler Anlagenbau GmbH 2023b)

#### 3.4 Versuchsaufbau

Die Sensoren wurden wie in Abbildung 14 zu sehen in der Anlage montiert. Der Inputstrom des Ballistikseparators wurde mit einem Volumenstromsensor und einem NIR-Sensor überwacht. Der 2D-Strom wurde ebenfalls mit beiden Sensorarten überwacht, welche sich jedoch nicht an derselben Position befanden. Der Volumenstromsensor wurde hinter dem NIR-Sensor montiert. da bei der nebeneinanderliegenden Anbringung ein starker Einfluss der Halogenlampe auf den Volumenstromsensor festgestellt werden konnte. Das 3D-Material konnte nur im freien Fall erfasst werden. Diese Überwachungsart ist für einen Volumenstromsensor ungeeignet, deshalb wurde dieser ausschließlich mit einem NIR-Sensor überwacht. Nachdem das 2D- und 3D-Material wieder zusammengeführt werden, gelangt es auf ein Steigband mit Mitnehmern, auf welchem ein Volumenstromsensor angebracht wurde. Ein weiterer Sensor wurde auf einem der folgenden Bänder ohne Mitnehmer angebracht, sodass ein Vergleich der Volumenstromdaten beider Bandarten möglich ist.

Die Montage der Sensoren ist in Abbildung 15 und Abbildung 16 dargestellt.



Abbildung 14: Positionen der Sensoren in der Anlage (Ausschnitt aus Abbildung 7)


Abbildung 15: Montage der Sensoren (1)



Abbildung 16: Montage der Sensoren (2)

# 3.5 Versuchsdurchführung

Es wurden verschiedene Einstellungen des Ballistikseparators und des Versuchsgemischs getestet. In Tabelle 5 ist eine Übersicht der Parameter und der während der Versuche verwendeten Einstellungen aufgeführt.

Parameter	Einstellungen
Paddelart	offene Paddel (OP), geschlossene Paddel (GP)
Winkel [°]	15;17,5;20;22,5
Durchsatz [t/h]	1,5; 2,4; 3,7
Paddeldrehzahl [Umdrehungen/min]	60;70;75;80;85;90;100
Folien(2D) -anteil Versuchsgemisch [M-%]	5;10;15

Tabelle 5:	Versuchsparameter	und Einstellungen
------------	-------------------	-------------------

Die Versuche können in drei Kategorien unterteilt werden:

1. Versuche zu dem Einfluss von Mitnehmern

Für diese Versuche wurden die Volumenströme eines Bandes mit Mitnehmern und eines glatten Bandes bei verschiedenen Durchsätzen und Folienanteilen erfasst und verglichen.

2. Versuche zu Durchsatzschwankungen

Für die Untersuchung von masse- bzw. volumenspezifischen Schwankungen wurde Material aus dem Kreislauf durch Revision des Bandes unter dem NIR-Sortierer ausgeschleust, sodass Schwankungen des Durchsatzes entstanden.

### 3. Versuche zu materialspezifischen Schwankungen

Die Versuche zu den materialspezifischen Schwankungen dienen zur Ermittlung der materialspezifischen Verweilzeit auf dem Ballistikseparator und der Pufferwirkung auf materialspezifische Schwankungen. Dafür wurde eine bestimmte Menge nicht im Versuchsgemisch vorhandener Materialien manuell hinzugefügt. Das Material wurde am unteren Ende des Steigbandes zwischen dem Delabeler und dem Ballistikseparator hinzugefügt. Die NIR-Spektren dieser Materialien unterscheiden sich von denen des Versuchsgemischs und können so mit dem NIR-Sensor detektiert werden.

Aus folgenden Gründen wurden die Parametereinstellungen ausgewählt:

Generell stellen die ausgewählten Parameter die veränderlichen Faktoren des Aggregates oder des Stoffstroms dar, die in einer bestehenden Anlage angepasst werden können. Der Einfluss der verschiedenen Parameter auf die Vergleichmäßigungsfähigkeit des Ballistikseparators sollen untersucht werden.

**Paddelart:** In bestehenden Anlagen werden sowohl offene als auch geschlossene Paddelbeläge verwendet, sodass beide Arten verglichen werden.

**Winkel:** Der verwendete Ballistikseparator lässt die Winkeleinstellungen von 15° bis 25° zu. 17,5° stellt eine in der Anlagenpraxis häufig genutzte Winkeleinstellung dar, allerdings finden sich auch Anlagen mit Winkeleinstellungen von 15°,20° und 22,5°. (Küppers und Ludes 2023 (Stadler intern)) Die Winkeleinstellungen von 17,5° und 20° wurden für beide Paddelarten getestet, da diese in der Praxis am häufigsten verwendet werden. Die Einstellungen von 15° und 22,5° mussten aus zeitlichen Gründen aufgeteilt werden, sodass 15° bei offenen Paddelbelägen und 22,5° bei geschlossenen Paddelbelägen getestet wurde.

**Durchsatz:** Der verwendete Ballistikseparator ist für einen Materialdurchsatz von 2 t/h ausgelegt. Mit den Durchsätzen 1,5 t/h, 2,4 t/h und 3,7 t/h werden Durchsätze um diesen Bereich abgedeckt. Die Wannenaufgabe erfolgte immer bei einem Durchsatz

von 3,7 t/h, da dieser dem in der Anlagenpraxis vorzufindenden Durchsatz am nächsten kommt.

**Folienanteil:** Mit 10 M-% wurde ein Folienanteil festgelegt, der charakteristisch für einen LVP-Stoffstrom nach Aufbereitung mittels Windsichtern ist. (Küppers und Ludes 2023 (Stadler intern)) Durch Veränderung der Prozessbedingungen des Windsichters oder des Inputmaterials der Anlage können die Werte des Folienanteils allerdings schwanken. Der 2D-Anteil oder die Einstellung der Luftgeschwindigkeit kann die Funktionsweise der Sichters beeinflussen. (Schlögl 2021) Um einen Bereich um die charakteristischen 10 M-% abzudecken, werden für die Versuche ebenfalls Folienanteile von 5 M-% und 10 M-% abgedeckt.

Paddeldrehzahl: Die Paddeldrehzahl, die für den Zeitraum der Schwankungserzeugung und die Zeit der Vergleichmäßigung eingestellt wurde, wurde unter Zuhilfenahme der Echtzeitanalysediagramme (Abbildung 12) ausgewählt. Es wurde die Drehzahl verwendet, die optisch eine hohe Reinheit beider Outputströme lieferte. Diese Methodik wurde angewendet, da diese Drehzahleinstellung auch in der Anlagenpraxis verwendet werden sollte, um eine gute Performance des Ballistikseparators zu garantieren. Bei steilerem Winkel steigt die ausgewählte Drehzahl, da eine höhere Drehzahl benötigt wird, um den Materialtransport des 2D-Materials in den 2D-Austrag entgegen der Schwerkraft zu ermöglichen. Für die Versuche mit den materialspezifischen Schwankungen wurde die gleiche Drehzahl wie bei den Versuchen mit Durchsatzschwankungen als optimale Drehzahl verwendet. Bei Versuchen mit dem charakteristischen Folienanteil von 10 M-% wurde eine breitere Drehzahleinstellung getestet. Die geringste Drehzahl wurde ebenfalls anhand der Diagramme ermittelt, wobei darauf geachtet wurde, dass die Reinheit der 2D-Fraktion annähernd 100% betrug. Als höchste Drehzahl wurde die maximale Drehzahl des Ballistikseparators gewählt. Um den gesamten Bereich abzudecken, wurde ebenfalls der Mittelwert der niedrigsten und höchsten Drehzahl sowie die bereits beschriebene optisch optimale Drehzahl getestet.

Begonnen wurde stets mit der Verfüllung des 3D-Materialgemischs in den Aufgabebunker. Die Folie wurde nach dem Start der Dosierschnecke manuell gleichmäßig auf ein Förderband hinzugegeben. Die Berechnung ist in Formel 5 aufgezeigt. Insgesamt wurden 200 kg Material in den Kreislauf eingetragen. Diese Komponente ist in der nachfolgenden Formel als Materialaufgabe in Kilogramm bezeichnet. Der Startdurchsatz betrug immer 5,9 t/h. Dieser wurde mit der Umlaufzeit in Stunden multipliziert, um die zu verfüllende Menge zu errechnen.

 $Materialaufgabe = Durchsatz \times Umlaufzeit \times 1000$ 

Die Anteile des 3D Materialgemischs variierten nach Folienanteil. Die Massenverteilung für die verschiedenen Folienanteile ergibt sich wie folgt:

- 5 M-% Folienanteil: 190 kg 3D-Materialgemisch, 10 kg Folie
- 10 M-% Folienanteil: 185 kg 3D-Materialgemisch, 15 kg Folie
- 15 M-% Folienanteil: 180 kg 3D-Materialgemisch, 20 kg Folie

Für den Beginn der Schwankungserzeugung wurde abgewartet, bis der Aufgabebunker vollkommen leer und das Material gleichmäßig in dem Kreislauf verteilt war. Die Simulation einer mittelfristigen Schwankung erfolgte durch Ausschleusen des Materials für 45 Sekunden. So ergibt sich nach den Durchsatzreduzierungen ein neuer Durchsatz in t/h, der nach Formel 6 berechnet werden kann. Für die Berechnung wird der vorherige Durchsatz (Durchsatz<sub>alt</sub>) in t/h mit einem von der Umlaufzeit abhängigen Faktor multipliziert. Die Umlaufzeit wird dabei in Sekunden angegeben.

$$Durchsatz_{neu} = Durchsatz_{alt} \times (1 - \frac{45}{Umlaufzeit})$$
(6)

Durch die Revision des Bandes für 45 Sekunden bei einem Ausgangsdurchsatz von 5,9 t/h wurde beispielsweise eine mittelfristige Schwankung bei 3,7 t/h simuliert. Nach jeder Schwankungserzeugung wurde bei laufender Anlage 20 Minuten bzw. 10 Runden gewartet, bis die nächste Schwankung erzeugt wurde.

Das Material, welches in den 45 Sekunden aus dem Kreislauf ausgeschleust wurde, wurde mittels NIR-Sortiereinheit in 3D-Materialgemisch und Folie separiert, indem die positive Sortierung von PE-LD ausgewählt wurde. Das getrennte Material wurde händisch nachsortiert, gewogen und für folgende Versuche wiederverwendet. Die Feinfraktion wurde ebenfalls verwogen. Durch das Gewicht des ausgeschleusten Materials (*Materialausgeschleust*) in Tonnen konnte mittels Formel 7 ein *tatsächlicher Durchsatz* (*Durchsatztatsächlich*) in t/h berechnet werden.

$$Durchsatz_{tatsächlich} = \frac{Material_{ausgeschleust}}{45} \times 3600$$
(7)

Dieser konnte mit dem berechneten Durchsatz, welcher nach Formel 5 oder Formel 6 berechnet werden kann, abgeglichen werden. Es stellte sich heraus, dass der *tatsächliche Durchsatz* von dem berechneten Durchsatz abweicht. Bei höheren Durchsätzen werden diese Abweichungen größer. Ein Vergleich beider Durchsätze ist in Abbildung 17 aufgezeigt. Zusammenhänge mit dem Folienanteil konnten bei diesen Versuchen nicht festgestellt werden.



Abbildung 17: Vergleich von berechnetem und tatsächlichem Durchsatz

Eine mögliche Erklärung dieser Abweichung lässt sich durch rollendes Material an den Seiten der Steigbänder erklären. Dieses Material bewegt sich nicht stetig durch die Anlage, sondern verbleibt länger an einer Stelle. Des Weiteren konnten Materialverluste durch herunterfallendes Material nicht vermieden werden, obwohl dieses fortlaufend aufgelesen und dem Kreislauf erneut zugeführt wurde. Besonders Folien verfingen sich häufig an einigen Stellen. In Abbildung 18 sind Beispiele für diese Stellen des Materialverlustes zu sehen.



Abbildung 18: Positionen für vermehrten Materialverlust

Nachdem die Schwankungserzeugung für 1,5 t/h beendet war, wurde das im Kreislauf verbleibende Material über den NIR-Sortierer separiert und verwogen. Für einen folgenden Versuch mit einem anderen Folienanteil wurde die entsprechende Menge des Materialgemischs erneut in den Bunker befördert und der Folienanteil manuell hinzugefügt. Der Ablauf der Schwankungserzeugung blieb unverändert. In Tabelle 6 ist der Versuchsplan für die Versuche der Durchsatzschwankungen abgebildet.

Für die Versuche mit Wannenaufgabe ist der Versuchsplan in Tabelle 7 dargestellt, wobei die verwendeten Parameter aus bereits beschriebenen Gründen ausgewählt wurden. Aus zeitlichen Gründen konnte bei der Einstellung *GP\_17,5*° lediglich der Folienanteil 15 M-% mit dem Material *Tetra kompakt* beprobt werden.

Paddelart	Winkel [°]	Folienanteil [M-%]	Durchsatz [t/h]	Drehzahl
			3,7	
		5	24	
		-	1.5	
			3.7	
	15	10	24	
	_	10	2, <del>1</del> 1.5	
		15	27	
			3,7	
			2,4	
			1,5	75
		F	3,7	
		5	2,4	
			1,5	
OP	17 5	10	3,7	
	17,5	10	2,4	
			1,5	
			3,7	
		15	2,4	
			1,5	
			3,7	
		5	2,4	
			1,5	
			3,7	
	20	10	2.4	85
			1.5	
		15	37	
			24	
			15	
			3.7	
		5	2.4	
			1.5	
			27	
	17.5	10	3,7	75
		10	2,4	
			1,5	
		45	3,7	
		15	2,4	
			1,5	
			3,7	
		5	2,4	
GP			1,5	
•			3,7	
	20	10	2,4	
			1,5	
			3,7	
		15	2,4	05
			1,5	85
			3,7	
		5	2.4	
		_	1.5	
	22,5		37	
		10	24	
			1.5	
			1,0	

Tabelle 6: Versuchsplan für die Durchsatzschwankungen

Paddelart	Winkel [°]	Folienanteil [M-%]	Drehzahl	Materialklasse	Paddelart	Winkel [°]	Folienanteil [M-%]	Drehzahl	Materialklasse	
GP	17,5	15	75	Tetra kompakt (3 Wannen)	OP	15	5	75	Tetra kompakt	
	20	5	85	Tetra kompakt					Tetra ganz	
				Tetra ganz					Alu-Dosen kompakt	
				Alu-Dosen					FE-Dosen ganz	
				FE-Dosen ganz			10	60	Tetra kompakt	
		10	70	Tetra kompakt					Tetra ganz	
				Tetra ganz					Alu-Dosen kompakt	
				Alu-Dosen					FE-Dosen ganz	
				kompakt FE-Dosen ganz					75	Tetra kompakt
			85	Tetra kompakt					Tetra ganz	
				Tetra ganz					Alu-Dosen kompakt	
				Alu-Dosen					FE-Dosen ganz	
				kompakt FE-Dosen ganz				80	Tetra kompakt	
			100	Tetra kompakt					Tetra ganz	
				Tetra ganz					Alu-Dosen kompakt	
				Alu-Dosen					FE-Dosen ganz	
				kompakt				100	Tetra kompakt	
		15	85	Tetra kompakt				100	Tetra ganz	
		10	00	Tetra ganz					Alu-Dosen kompakt	
				Alu-Dosen					FE-Dosen ganz	
				kompakt			45	75	Total loove old	
	22.5	5	05	FE-Dosen ganz			15	/5	Tetra kompakt	
	22,5	5	65							
				Alu-Dosen				75	FE-Dosen ganz	
				kompakt						
		10	70	FE-Dosen ganz		17,5	5	75	Tetra kompakt	
		10	70						Alu-Dosen kompakt	
							10		Tetra kompakt	
				kompakt			10			
				FE-Dosen ganz					Alu-Dosen kompakt	
			85	Tetra kompakt			45	75	FE-Dosen ganz	
				Tetra ganz			15	/5	Tetra kompakt	
				kompakt					Alu-Dosen kompaki	
				FE-Dosen ganz					FE-Dosen ganz	
			100	Tetra kompakt		20	5	85	Tetra kompakt	
				Tetra ganz					Tetra ganz	
				kompakt					Аш-дозен котракт	
				FE-Dosen ganz					FE-Dosen ganz	
							10	70	Tetra kompakt	
									Tetra ganz	
									FE-Dosen ganz	
								85	Tetra kompakt	
									Tetra ganz	
									Alu-Dosen kompakt	
									FE-Dosen ganz	
								100	Tetra kompakt	
									Tetra ganz	
									Alu-Dosen kompakt	
									FE-Dosen ganz	
							15	85	Tetra kompakt	
									Tetra ganz	
									Alu-Dosen kompakt	
									FE-Dosen ganz	

Tabelle 7: Versuchsplan für die materialspezifischen Schwankungen

Zusätzlich zu den Versuchen wurden *Pixelgewichte* für jede verwendete Fraktion erfasst. Diese werden benötigt, um die Masse eines Pixels einer bestimmten Fraktion

zu erhalten und Umrechnungen der Pixeldaten in Massedaten zu ermöglichen. Außerdem können durch diese Methode systematische Material-Fehlerkennungen der Sensoren korrigiert werden. Für die Ermittlung der Pixelgewichte wurde der Inhalt von je fünf Wannen, welche mit einer bekannten Masse des jeweiligen Materials in Reinform gefüllt waren, durch jeden der drei NIR-Sensoren befördert. Das bekannte Gewicht des Materials wird durch die Anzahl der detektierten Pixel geteilt, sodass ein Gewicht pro Pixel resultiert.

Sowohl die Zeiten der Schwankungserzeugungen als auch die Zeiten der Aufgabe des Materials für die Pixelgewichtbestimmung und weiterer Ereignisse wurde anhand einer Atomuhr erfasst und dokumentiert.

## 3.6 Datenauswertung

In diesem Kapitel wird die Vorgehensweise bei der Datenauswertung erläutert. Dafür werden zuerst die allgemeinen Aufbereitungsschritte vorgestellt, worauf eine Einteilung in die drei Versuchsarten *Mitnehmerversuche*, *Versuche zu Durchsatzschwankungen* und *Versuche zu materialspezifischen Schwankungen* vorgenommen wird.

### 3.6.1 Allgemeine Datenauswertung

Die Aufzeichnungen der durchgeführten Versuche liefern sowohl Daten der Volumenstromsensoren als auch der NIR-Sensoren, die separat voneinander aufbereitet werden.

Volumenstromsensoren: Die zeitliche Komponente wird in Form eines Unixzeitstempels hinterlegt. Diese wurde mittels Formel 8 in mitteleuropäische Zeit umgerechnet. Da bei allen vier Volumenstromsensoren eine Zeitversatz von sieben Sekunden zu der Atomuhr gemessen wurde, wurde dieser in dem Zeitstempel korrigiert. Einige Werte des Sensors, der über dem Outputband des 2D-Austrages befestigt war, wurden als "Not a Number-Werte" ausgegeben, wobei es sich um einen Fehler des Sensors handelt. Diese wurden aus den Datensätzen entfernt. Einen weiteren Fehler stellt die Ausgabe vereinzelter negativer Volumenstromwerte dar, die auf den Wert Null korrigiert wurden. Des Weiteren konnten bei dem Sensor auf dem Band vor dem Überbandmagneten fehlerhafte Messungen eines Volumenstromes bei leerem Band identifiziert werden, die durch einen Korrekturfaktor korrigiert wurden. Der Korrekturfaktor von 0,185 m3/min wurde durch den Mittelwert eines 10-minütigen Zeitraums ohne Bandbelegung ermittelt. Negative Werte des Volumenstroms können entweder durch die Subtraktion des Korrekturfaktors oder durch Messabweichungen (in der Größenordnung – 10<sup>-3</sup> m<sup>3</sup>/min) auftreten. Diese wurden mit der Zahl Null ersetzt, da sie in dem Versuchskontext unbrauchbar sind.

$$mitteleurop \ddot{a}ische Zeit = \frac{(Unixzeitstempel + 3600 \times 2)}{86400} + 25569$$
(8)

**NIR-Sensoren:** Die Aufnahmefläche wird von den NIR-Sensoren unterteilt, sodass Pixeldaten in 10 nebeneinander liegenden Kanälen aufgezeichnet werden. Diese wurden bei der Datenaufbereitung zusammengefasst, sodass sekundengenaue Daten über die ganze Länge des Aufnahmebereiches vorlagen.

Um Messungenauigkeiten der Materialerkennung auszugleichen, wurde auf die bereits beschriebenen Pixelgewichte zurückgegriffen. Diese ermöglichen eine Ermittlung der falsch klassierten Anteile jeder Materialklasse. Es konnte eine Fehlerkennung des Hintergrundes bei Zeiträumen ohne Materialfluss beobachtet werden. Sowohl Teile des Förderbandes als auch Teile des Bleches, welches im freien Fall den Hintergrund darstellt, wurden als PP erkannt. Da die Bandbelegung für die Bestimmung der Pixelgewichte deutlich geringer war, als bei den Versuchen und so mehr freiliegender Hintergrund mit aufgezeichnet wurde, wurde für die Bestimmung der Pixelgewichte ein Korrekturfaktor für das leere Band errechnet. Dieser ergibt sich aus dem Mittelwert der PP Pixel von fünf 20-sekündigen Zeiträumen ohne Materialbelegung. Dieser Korrekturfaktor wurde für jeden Sensor getrennt berechnet. Der Faktor wurde von den sekündlichen PP-Pixeldaten abgezogen und zu den Hintergrundpixeln addiert, sodass die Anzahl der Gesamtpixel gleichblieb. Da es sich bei dem Korrekturfaktor um einen Mittelwert handelt, ist es möglich, dass einige Pixelwerte kleiner als Null wurden. In diesem Fall wurde der Betrag der Pixel mit dem Wert Null ersetzt, da keine negativen Pixel möglich sind.

Für die Bestimmung der Pixelkorrekturen wurden die Pixel pro Materialklasse und Materialmenge addiert und die Anteile an der Gesamtpixelzahl berechnet. Die so entstandenen *Verteilungsmatrizen* für jeden Sensor sind im Anhang aufgezeigt. Aus den Verteilungsmatrizen lassen sich Anteile der korrekt und falsch erkannten Pixel in den Reinfraktionen ablesen. (Beispiel: Bei der PP-Reinfraktion hat der Inputsensor 95% der Pixel der korrekten Fraktion *PP* zugeordnet. Je 1% der Pixel wurden fälschlicherweise den Fraktionen *PS*, *Tetra* und *Not Classified* zugeordnet, 2% der Fraktion *LDPE*) Die ermittelten Anteile werden im Folgenden mit *X* bezeichnet.

Die Mehrheit der Fehlerkennungen der Materialien ist auf die Fraktion *PP* zurückzuführen, weshalb den Pixeldaten der Fraktionen *PET*, *PS* und *PE-LD* der fehlerkannte Anteil des PP's hinzuaddiert wurde, während er von der Fraktion *PP* abgezogen wurde. Diese Korrektur wurde auf jeden Sekundenwert angewendet. Die Berechnungsformeln 9, 10, 11 und 12 für die korrigierten Pixelzahlen je Fraktion sind nachfolgend aufgeführt. Für die Formeln werden die Mengen der Pixel der jeweiligen Fraktionen verwendet. Die Anteile von Fraktionen werden mit *X* beschrieben.

$$PP_{korrigiert} = PP - \left(\frac{PET}{X_{PET \ an \ PET}} \times X_{PP \ an \ PET}\right) - \left(\frac{PS}{X_{PS \ an \ PS}} \times X_{PP \ an \ PS}\right) - \left(\frac{PE}{X_{PE \ an \ PE}} \times X_{PP \ an \ PE}\right)$$
(9)

$$PET_{korrigiert} = PET + \frac{PET}{X_{PET an PET}} \times X_{PP an PET}$$
(10)

$$PS_{korrigiert} = PS + \frac{PS}{X_{PS an PS}} \times X_{PP an PS}$$
(11)

$$PE_{korrigiert} = PE + \frac{PE}{X_{PE an PE}} \times X_{PP an PE}$$
(12)

Die Pixelgewichte wurden bestimmt, indem das zuvor ermittelte Gewicht durch die Anzahl der in der Durchgangszeit aller vom Sensor erkannten Pixel geteilt wurde. Die Ergebnisse sind in Tabelle 8 aufgelistet. Die Pixelgewichte können für die materialspezifische Umrechnung von Pixelzahl in Massen verwendet werden.

	Pixelgewicht (g/Pixel)							
	Inputsensor	2D-Sensor	3D-Sensor					
PP	9,71 x 10 <sup>-2</sup>	2,40 x 10 <sup>-2</sup>	5,02 x 10 <sup>-2</sup>					
PS	7,89 x 10 <sup>-3</sup>	1,46 x 10 <sup>-2</sup>	4,34 x 10 <sup>-2</sup>					
PET-Flasche	9,37 x 10 <sup>-3</sup>	1,85 x 10 <sup>-2</sup>	4,87 x 10 <sup>-2</sup>					
PET-Tray	5,56 x 10 <sup>-3</sup>	1,30 x 10 <sup>-2</sup>	2,76 x 10 <sup>-2</sup>					
LDPE	4,52 x 10⁻³	4,79 x 10 <sup>-3</sup>	7,47 x 10 <sup>-3</sup>					
Tetra kompakt	1,08 x 10 <sup>-2</sup>	2,18 x 10 <sup>-2</sup>	6,29 x 10 <sup>-2</sup>					
Tetra ganz	1,03 x 10 <sup>-2</sup>	2,40 x 10 <sup>-2</sup>	6,71 x 10 <sup>-2</sup>					
Alu	8,47 x 10 <sup>-3</sup>	2,00 x 10 <sup>-2</sup>	7,31 x 10 <sup>-2</sup>					
FE	3,28 x 10 <sup>-2</sup>	1,37 x 10 <sup>-1</sup>	2,50 x 10 <sup>-1</sup>					

#### Tabelle 8: Pixelgewichte

Auf die Korrektur des leeren Bandes, wie bei der Bestimmung der Pixelgewichte aufgeführt, wurde für die Versuchsdaten verzichtet, da das Band deutlich flächendeckender belegt war. Ein Vergleich der Bandbelegung des niedrigsten (1,5 t/h, links) und des höchsten (5,9 t/h, links) Durchsatzes bei jeweils 10 M-% Folienanteil ist in Abbildung 19 zu sehen.



Abbildung 19: Vergleich der Bandbelegung bei verschiedenen Durchsätzen (links: 1,5 t/h, rechts: 5,9 t/h)

#### 3.6.2 Mitnehmerversuche

Für die Auswertung der Daten der Mitnehmerversuche wurden die Daten des Volumenstromsensors auf dem Steigband mit Mitnehmern und Daten des Volumenstromsensors auf dem glatten Band vor dem Überbandmagneten miteinander verglichen.

Dafür wurden Zeiträume, in denen die Durchsätze 1,5 t/h, 2,4 t/h, 3,7 t/h und 5,9 t/h und die Folienanteilen 5 M-%, 10 M-% und 15 M-% vorlagen, ausgewählt. Der Zeitraum für die Datenauswertung des höchsten Durchsatzes begann mit der vollständig abgeschlossenen Verteilung des Materials im Kreislauf nach dem Start der Schnecke und der Aufgabe der Folie. Der Zeitraum endete mit dem Start der ersten Schwankungserzeugung, da durch diesen Vorgang der Durchsatz reduziert wurde. Der Start des Versuches zu dem nächstgeringeren Durchsatz erfolgte nach einem Zeitraum von 20 Minuten, welcher für die Vergleichmäßigung des Materials vorgesehen war. Die folgende Schwankungserzeugung markierte erneut das Ende des laufenden Zeitraums. Die Zeiträume bezogen sich stets auf den ersten Volumenstromsensor (Steigband mit Mitnehmern). Damit eine Vergleichbarkeit der Daten hergestellt werden konnte, wurde die Zeit ermittelt, die das Material von dem ersten bis zu dem zweiten Sensor benötigt. Dieser Versatz von sechs Sekunden wurde zu den Start- und Endzeitpunkten der Zeiträume des ersten Sensors addiert, womit die Start- und Endzeitpunkte der Zeiträume des zweiten Sensors definiert wurden. Das Prinzip der Zeitraumermittlung ist in Abbildung 20 veranschaulicht.



Abbildung 20: Veranschaulichung der Zeiträume für die Datenauswertung der Mitnehmerversuche

Für die ausgewählten Zeiträume wurde für jeden Sensor der Mittelwert gebildet, sodass diese miteinander verglichen werden konnten. Aus der Differenz der Mittelwerte der Durchsatzstufen resultiert die absolute Abweichung des Mitnehmerbandes zu dem glatten Band in m<sup>3</sup>/min. Eine relative Abweichung wurde durch die Division der absoluten Abweichung durch den gemessenen Volumenstrom des glatten Bandes berechnet.

## 3.6.3 Durchsatzschwankungen

Für die Quantifizierung der Durchsatzschwankungen wurde im Rahmen dieser Arbeit eine eigene Methode entwickelt, da bisher keine allgemein verwendete Methode existiert. Dafür wurde sich an dem Konzept von Curtis et al. (2021) orientiert, die in ihrer Veröffentlichung verschiedene gleitende Mittelwerte auf die Rohdaten des Volumenstromsensors angewendet haben und die Abweichung der Mittelwerte voneinander betrachten, um Aussagen über das Ausmaß der Schwankungen zu treffen.

Das Ziel dieser Arbeit ist es, die mittelfristigen Schwankungen, die während der Versuche manuell erzeugt wurden, und die Fortpflanzung dieser über mehrere Runden zu quantifizieren. Dabei sollen die kurzfristigen, sowie die langfristigen Schwankungen so wenig Beachtung wie möglich finden. In Abbildung 21 ist ein beliebiger Rohdatensatz der Volumenstromdaten in grau gezeigt. Die grüne Linie verläuft durch die Linie der Rohdaten und bildet die mittelfristigen Schwankungen von circa 45 Sekunden ab, während sie die kurzfristigen Schwankungen weitestgehend ausblendet. Die kurzfristigen Schwankungen können als Grundrauschen bezeichnet

#### Material und Methoden

werden, da sie durch die Inhomogenität des Abfalls auf Artikelebene verursacht werden. Die Linie sollte demnach die mittelfristigen Schwankungen ausgeprägt wellenförmig darstellen, während sie die kurzfristigen Schwankungen glättet. Um diese Anforderungen zu erfüllen, wurde ein Konzept entwickelt, welches verschiedene Mittelwerte kombiniert. Auf die Rohdaten wurde der Median angewendet, welcher 25 Daten einschließt. Auf die entstandene Datenreihe wurde das arithmetische Mittel angewendet, welches 15 Daten einschließt. Zuletzt wurde auf die so entstandene Datenreihe erneut das arithmetische Mittel angewendet, die in diesem Fall fünf Daten einschließt. Das Prinzip ist durch Abbildung 22 erläutert. Zu beachten ist, dass für die Erzeugung eines Wertes immer die Hälfte der Daten vor dem Wert und die Hälfte der Daten nach dem Wert und der Wert selbst mit einbezogen werden, wie es in der Abbildung dargestellt ist. Dadurch wird eine Zeitverschiebung der Daten vermieden. Im ersten Schritt wird der Median verwendet, da dieser unempfindlicher gegenüber Ausreißern ist als das arithmetische Mittel, wodurch diese im Grundrauschen der grauen Linie weniger Einfluss auf das Endergebnis haben. Der Median erzeugt bei Fortführung der Werte allerdings eine Stufen- und keine Wellenform, weshalb anschließend das arithmetische Mittel verwendet wird. Durch die anschließende erneute Anwendung des arithmetischen Mittels kann eine Glättung der Linie erzeugt werden. Die Veränderung der Graphen durch die einzelnen Schritte sind in Abbildung 23 dargestellt.



Abbildung 21: Abgeschlossene Datenaufbereitung am Beispiel eines beliebigen Datensatzes

Uhrzeit (MEZ Sommer)	korrigierter Volumenstrom	gleitender Median 25	gl. MW von gl. Median (15/25)	gl MW von gl. MW von gl. Median (5/15/25)
11:59:58	2,522523418	1,757567581	1,726459968	1,72468898
11:59:59	1,833692455	1,757567581	1,73153496	1,736964393
12:00:00	2,883595746	1,823273587	1,745574382	1,749118633
12:00:01	2,931012413	1,833692455	1,762532746	1,763250196
12:00:02	1,873668453	1,833692455	1,77949111	1,779892096
12:00:03	1,196774541	1,873668453	1,797117784	1,796978865
12:00:04	1,569014457	1,886564565	1,814744457	1,811265641
12:00:05	1,203746205	1,873668453	1,83100823	1,822752424
12:00:06	2,547521638	1,833692455	1,833966626	1,829233772
12:00:07	1,317972208	1,833692455	1,836925023	1,830570768
12:00:08	1,066555045	1,833692455	1,829524525	1,827074662
12:00:09	4,452397946	1,833692455	1,821429435	1,822030545
12:00:10	1,823273587	1,833692455	1,813527702	1,815266468
12:00:11	1,503460363	1,833692455	1,808746041	1,809026159
12:00:12	2,164320307	1,823273587	1,803104638	1,803981548
12:00:13	2,029872519	1,801943528	1,798322976	1,800093964
12:00:14	1,712266115	1,801943528	1,796206381	1,796739395
12:00:15	2,5745553	1,712266115	1,794089786	1,794189882
12:00:16	4,009346711	1,712266115	➡ 1,791973191	1,792273479
12:00:17	1,06136711	1,715166456	1,790357075	1,790357075
12:00:18	1,620061562	1,801943528	1,78874096	1,788679686
12:00:19	1,119587786	1,801943528	1,786624365	1,787525712
12:00:20	2,040903857	1,801943528	1,78570284	1,786795057
12:00:21	1,801943528	➡ 1,801943528	1,78620332	1,789504632
12:00:22	2,1082146	1,801943528	1,7867038	1,795754533
12:00:23	2,614865563	1,801943528	1,802288836	1,806531905
12:00:24	1,198440271	1,809450722	1,817873872	1,821292795
12:00:25	1,011954731	1,809450722	1,839589698	1,840331754
12:00:26	5 🔹 🕈 1,946041656	1,801943528	1,86000777	1,860631872

Abbildung 22: Prinzip der Datenaufbereitung der Versuche zu Durchsatzschwankungen



Abbildung 23: Grafischer Vergleich der Datenaufbereitungsschritte der Versuche zu Durchsatzschwankungen

### Quantifizierung des Einflusses der Steigbänder und Bandübergaben

Anzumerken ist in jedem Fall, dass die Schwankung durch die Reversion eines Bandes unter dem NIR-Sensor erzeugt wurde, worauf sechs Bandübergaben folgen, bis die Schwankung den Inputsensor des Ballistikseparators erreicht (vgl. Abbildung 7).

Für die Einordnung des Einflusses des Ballistikseparators auf die Vergleichmäßigung von Schwankungen muss auch der Einfluss der Steigbänder und der Bandübergaben dargestellt werden, die das Material passiert.

Durch den Vergleich der erzeugten Schwankung (Durchsatz auf 0 t/h für 45 Sekunden) und der Schwankung, die der Inputsensor aufgezeichnet hat, wird der Einfluss der Bandübergaben abgebildet. Ein Beispiel dieser Gegenüberstellung ist in Abbildung 24 gezeigt. Die Rohdaten des Inputsensors sind in grau dargestellt, die erzeugte Schwankung wird durch die blaue Linie repräsentiert. Der vom Inputsensor aufgezeichnete und mit der *Median/Mittelwert/Mittelwert*-Methode bearbeitete Volumenstrom ist in orange dargestellt. Die Abweichungen der blauen und orangenen Linie während des 45-sekündigen Zeitraums wird für die Quantifizierung der Vergleichmäßigung der Bandübergaben verwendet.

Je höher die Abweichungen dieser beiden Linien sind, desto besser hat sich das Material auf dem Band verteilt, wodurch die Schwankung geglättet wird. Die Summe der Abweichung wurde für jede Parameterkombination berechnet und für gleiche Folienanteile und Durchsätze zusammengefasst und gemittelt. Winkel- und Paddelbelageinflüsse können vernachlässigt werden, da diese erst durch den Ballistikseparator zum Tragen kommen, welcher in diesen Zeiträumen nicht passiert wurde.



Abbildung 24: Vergleich der erzeugten Schwankung zu den Rohdaten und den aufbereiteten Rohdaten

#### Anzahl der Runden bis zum Ausgleich der Schwankung

Um die dargestellten Schwankungen quantifizieren zu können, wird ein weiterer gleitender Mittelwert auf die Rohdaten angewendet, zu dem die Abweichungen der mittelfristigen Schwankungen berechnet werden können. Das Ziel ist es, einen gleitenden Mittelwert zu ermitteln, der dem Gesamtmittelwert eines Zeitraums gleichen Durchsatzes am nächsten kommt. Dafür wurde der Gesamtmittelwert von den repräsentativen Datensätzen *OP\_15\_10% Folie, OP\_17,5\_10% Folie, OP\_20\_10% Folie* je Durchsatzstufe (1,5 t/h, 2,4 t/h, 3,7 t/h) berechnet und der gleitende Mittelwert

gesucht, dessen Summe der absoluten Abweichungen zu dem Gesamtmittelwert am geringsten ist. Bei den neun repräsentativen Datensätzen war dies im Mittel für den gleitenden Mittelwert 137 der Fall, sodass dieser als Alternative für den starren Mittelwert verwendet wurde. Bei einem niedrigeren Wert war der Einfluss der mittelfristigen Schwankungen zu hoch, während bei einem höheren Wert *Gegenpendler* im Bereich der Schwankungen auftraten, wie es in Abbildung 25 bei der blauen Linie zu sehen ist. Durch eine Verschiebung der Kurven stimmen Maxima und Minima der beiden Datensätze nicht mehr überein. Der gleitende Mittelwert bietet gegenüber dem starren Mittelwert den Vorteil, dass er sich einem variablen Durchsatz selbst anpasst und nicht neu berechnet werden muss. Das kann besonders in der Anlagenpraxis von Vorteil sein.



Abbildung 25: Gegenpendler bei zu hohen gleitenden Mittelwerten

Da die Anlage eine Kreislaufführung besitzt, konnte die Rundenanzahl errechnet werden, die benötigt wird, um die Schwankungen in dem Stoffstrom auszugleichen. Durch diese Methode kann die Fähigkeit des Ballistikseparators Schwankungen zu glätten, bei verschiedenen Parametereinstellungen miteinander verglichen werden, da alle anderen Einstellungen in der Anlage identisch blieben.

Für die Berechnung wurde zunächst der Zeitpunkt festgelegt, an dem die erzeugte Schwankung den jeweiligen Sensor erreicht. Diese Zeiten sind in Tabelle 9 aufgeführt.

Tabelle 9: Zeiten, bis die Schwankung die Sensoren erreicht

Sensor	Zeit Schwankung bis Sensor (s)						
Input	62						
3D	68						
2D	90						

Ausgehend von diesem Zeitpunkt wurden die Daten der folgenden 20 Minuten in Runden mit der Länge der Rundenzeit von 2:03 Minuten eingeteilt. Der Betrag der Abweichung jedes Sekundenwertes zu dem entsprechenden Sekundenwert des gleitenden Mittelwertes 137 und des gesamten Mittelwertes wurden berechnet und für jede Runde addiert. So liegt für jede Runde ein Wert für die Summe der Abweichungen vor. Außerdem wurde das arithmetische Mittel der sekündlichen Abweichungen pro Runde gebildet, welches für nachfolgende Berechnungen verwendet wird. Für den Vergleich des Einflusses verschiedener Parameter wird die Runde verwendet, in der die erzeugte Schwankung ausgeglichen ist. Dafür muss festgelegt werden, wann eine Schwankung in diesem Kontext als ausgeglichen gilt. Die folgende Methode erlaubt eine Annäherung an einen allgemeinen Schwellenwert für diesen Punkt, der sich auf alle Datensätze anwenden lässt:

Jede Parameterkombination, wie sie in Tabelle 5 aufgeführt sind, wird einzeln betrachtet. Es wird angenommen, dass die Summe der Abweichungen pro Runde abnimmt, wenn die Schwankung im Vergleich zu der vorherigen Runde vergleichmäßigt wurde. Die Vergleichmäßigung endet, wenn die Summe der Abweichungen von einer Runde zu der folgenden ansteigt. Für alle Parameterkombinationen wurden die Runde, in der das der Fall war, sowie die dazugehörige Summe der Abweichungen notiert. Bei vereinzelten Datensätzen stimmte der optische Eindruck jedoch nicht mit dieser Vorgehensweise überein. Ein Beispiel dafür ist bereits in Abbildung 21 aufgeführt. Hier fällt auf, dass die Summe der Abweichungen in Runde 4 im Vergleich zu der vorherigen Runde ansteigt. Die Summe der Abweichungen der grünen Linie zu dem gesamten Mittelwert ist durch die blaue Fläche in der unteren Abbildung dargestellt, während die Summe der Abweichungen der grünen Linie zu dem gleitenden Mittelwert 137 durch die rosafarbene Linie im unteren Diagramm ausgedrückt wird. Die schwarzen Balken markieren die Rundenzeiten von 2:03 Minuten. Von Runde 3 zu Runde 4 erhöht sich die blaue Fläche bzw. die Fläche unter der rosafarbenen Linie im unteren Diagramm. Dies würde das Ende der Vergleichmäßigung laut vorangegangener Methode markieren. Bei Betrachtung des oberen Graphen ist allerdings auch nach Runde 4 eine starke Schwankung zu erkennen. Der optische Eindruck stimmt in diesem Fall nicht mit dem Ergebnis der vorgestellten Methode überein.

Um diese Differenz zu minimieren wird ein weiterer Schritt ergänzt, der es ebenfalls ermöglicht, einen durchsatzabhängigen Schwellenwert festzulegen, der auf alle Datensätze anwendbar ist. Dafür wurde der Mittelwert der vorher notierten zugehörigen Summen der Abweichungen je Durchsatzstufe gebildet. Bei den anderen Parametern konnte keine Korrelation mit dem Summen der Abweichungen festgestellt werden (Korrelationskoeffizient < 0,5).

Relative Abweichungen wurden berechnet, indem der berechnete sekündliche Wert der Abweichung durch den gesamten starren oder den zu dem entsprechenden Zeitstempel zugehörigen gleitenden Mittelwert (137) geteilt wurden. Um einen Wert der relativen Abweichungen pro Runde zu erhalten wurde der Mittelwert der relativen Abweichungen über den Rundenzeitraum von 2:03 Minuten gebildet. In Tabelle 10 ist ein Vergleich beider Varianten für einen beliebigen Datensatz dargestellt, um den Einfluss auf das Ergebnis aufzuzeigen. Die Abweichungen des Ergebnisses zwischen beiden Varianten, die in diesem Datensatz auftreten, sind in der Größenordnung mit den anderen Datensätzen vergleichbar. Für die weitere Auswertung werden in dieser Arbeit die relativen Abweichungen verwendet, die durch die Division mit dem starren Mittelwert berechnet wurden. Die geringen Abweichungen der beiden Methoden legen aber nahe, dass auch die andere Methode in der Praxis angewandt werden kann, um auf Ergebnisse mit gleicher Aussage zu kommen.

	Relative Abweichung (dividiert durch starren Mittelwert)	Relative Abweichung (dividiert durch gleitenden Mittelwert)
Runde 1	0,2826	0,2833
Runde 2	0,1722	0,1701
Runde 3	0,0810	0,0934
Runde 4	0,0717	0,0772
Runde 5	0,0350	0,0405
Runde 6	0,0783	0,0798
Runde 7	0,0596	0,0631
Runde 8	0,0537	0,0663
Runde 9	0,0461	0,0410

Tabelle 10: Vergleich Berechnung relative Abweichungen dividiert durch starren oder<br/>gleitenden Mittelwert

Für die Auswertung der Inputdaten des Ballistikseparators wurde auf die Volumenstromdaten zurückgegriffen. Der **3D-Materialstrom** verlässt den Ballistikseparator im freien Fall, sodass keine verlässliche Aufzeichnung durch den verwendeten Volumenstromsensor möglich ist. Aus diesem Grund wurden für die Auswertung des 3D-Outputstroms die Daten des NIR-Sensors verwendet. Auch für den 2D-Outputstrom wurden die NIR-Daten verwendet, da der Volumenstromsensor für diesen Strom kaum auswertbare Schwankungen aufzeichnete, während die Daten des NIR-Sensors deutlichere Schwankungen zeigten. Dies kann an der geringen Bandbelegung unter den 2D-Sensoren liegen. Curtis et al. (2021) vermuten, dass NIR-Sensoren bei einer geringen Bandbelegung belastbare Daten liefern, die besonders bei der materialspezifischen Umrechnung in Massendaten zu tragen kommen. Zudem könnte die flache Beschaffenheit der PE-LD-Materialien zu Schwierigkeiten bei der Erfassung durch einen Volumenstromsensor führen, da die Höhendimension fehlt und der Sensor kaum eine Unterscheidung zu dem Förderband vornehmen kann. NIR-Daten beruhen auf Flächendaten, weshalb auch flache Partikel gut erfasst werden können.

Die Auswertung erfolgte Anhand der Pixeldaten, ohne dass diese in Volumen- oder Massenströme umgerechnet wurden, um Fehlerquellen durch die Umrechnung zu minimieren. Die Unterscheidung der Materialklassen, die durch den NIR-Sensor ermöglicht wird, wurde genutzt, sodass 3D-Material und 2D-Material getrennt voneinander betrachtet wurden. Dafür werden die Pixel der Materialklassen *PP*, *PET* und *PS* als *3D-Material* zusammengefasst, während die Pixel der Materialklasse *PE-LD* das *2D-Material* abbilden. Die vorgestellte Methode für die Quantifizierung der Schwankungen konnte ohne Anpassungen auf die NIR-Daten angewendet werden. Somit ergeben sich für jeden Sensor eigene Schwellenwerte je Durchsatzstufe, die in Tabelle 11 aufgeführt sind. Bei Unterschreiten der Abweichungen vom Mittelwert dieser Schwellenwerte wird die Schwankung bei dieser Methode als ausgeglichen gewertet.

Sensor	Durchsatzstufe (t/h)	Grenzwert 3D Material Grenzwert 2D Material			
		(m <sup>3</sup> /min)			
Input	1,5	0,	11		
	2,4	0,16			
	3,7	0,25			
		(Pixel/s)			
3D	1,5	454	247		
	2,4	566	384		
	3,7	741	649		
2D	1,5	445	2279		
	2,4	672	2374		
	3,7	1462	2610		

Tabelle 11: Schwellenwerte für die Quantifizierung des Schwankungsausgleiches

#### Übertragung der Schwankung in die Outputströme 3D und 2D

Für die Betrachtung der Schwankungsübertragung in die beiden Outputfraktionen des Ballistikseparators (2D- und 3D-Strom) werden die Minima der Schwankungen je Sensor miteinander verglichen. Für jeden Sensor werden die Volumenstromdaten der bereits beschriebenen Median/Mittelwert/Mittelwert (25/15/5) Methode verwendet und das Minimum dieser Datenreihe pro Runde ermittelt. Für die Vergleichbarkeit wird dieser Mittelwert durch den gesamten Mittelwert (starr) des 20-minütigen Schwankungszeitraums geteilt. Der dadurch errechnete Prozentwert gibt an, wie weit das Minimum der NIR- oder Volumenstromdaten (tiefster Punkt der Schwankung) von dem Gesamtmittelwert entfernt ist. Je tiefer der Prozentwert, desto größer ist die Abweichung zum Minimum. Das bedeutet gleichzeitig, dass sich das Schwankungsminimum bei kleineren Prozentzahlen näher an einem Volumenstrom von 0 m<sup>3</sup>/min befindet. Steigt die Prozentzahl, wird die Schwankung geglättet, da sich das Minimum näher an dem konstanten Gesamtmittelwert befindet. Durch die Ergebnisse dieser Methode kann ermittelt werden, wie stark die Schwankung, die im Inputsensor verzeichnet wird, in die beiden Outputfraktionen übertragen wird.

Ein Beispiel der Daten während des Schwankungszeitraums aller drei Sensoren ist in Abbildung 26 gegeben. Die Kurven wurden dafür zeitlich versetzt, sodass die

Schwankungen zeitlich übereinander liegen und der Fokus auf der Schwankungsausprägung liegt. Auf der Y-Achse ist der zum Mittelwert relative Pixeloder Volumenstrom in Prozent aufgezeigt. Die X-Achse stellt die Zeit in Sekunden dar. In dem linken Teil der Abbildung sind Daten eines Versuches mit offenen Paddelbelägen dargestellt. Der Inputvolumenstrom während des Schwankungsminimums sinkt bis auf nahezu 0 m<sup>3</sup>/min, wie auch der 2D-Strom. In der ersten Runde ist bei dem gezeigten Versuch kein Ausgleich der Schwankung durch den Ballistikseparator in die 2D-Fraktion erfolgt. Das Minimum des 3D-Stromes liegt über denen der anderen Fraktionen. Das signalisiert, dass zu jedem Zeitpunkt der Schwankung Material von dem 3D-Sensor aufgezeichnet wurde. Da, wie durch die Daten des Inputsensors verdeutlicht, über einen Zeitraum von etwa 14 Sekunden kaum Material in den Input des Ballistikseparators gelangte, muss dieser das Material zurückgehalten und sukzessive freigesetzt haben.



Abbildung 26: Übertragung der Schwankungsausprägung vom Inputsensor in die Outputsensoren

In Abbildung 26 zeigt der auf der rechten Seite befindliche Graph einen Versuch mit den gleichen Parameterkombinationen für geschlossene Paddelbeläge. Das Minimum des Inputsensors erreicht hier nicht den Wert 0 m<sup>3</sup>/min, liegt dennoch deutlich unter denen des 3D- und in diesem Fall auch des 2D-Sensors. Die Daten lassen darauf schließen, dass der Ballistikseparator bei dem Versuch mit gleichen Parameterkombinationen aber geschlossenen Paddeln einen Schwankungsausgleich in beide Outputströme bewirkt.

Auffällig sind außerdem die beiden Maxima in den Graphen des 2D-Stroms. Bei offenen Paddeln tritt der Peak nach der erzeugten Schwankung auf, während er bei geschlossenen Paddeln davor auftritt. Als mögliche Erklärung wäre hier die bessere Effizienz des Ballistikseparators bei geringen Durchsätzen zu nennen. Da die Kurven zeitlich verschoben sind, tritt das Maximum in der rechten Abbildung in der Realität

erst später auf. Es ist möglich, dass ein großer Teil des PE-LD Materials bis zu dem Zeitpunkt der Schwankung in den 3D-Austrag gelangte, da der Durchsatz des Ballistikseparators mit 3,7 t/h über dem Auslegungswert lag. Bei der Erzeugung der Schwankung leeren sich die Paddel nicht sofort, sondern allmählich. Die verbleibende Folie kann ungehindert in die 2D-Fraktion ausgetragen werden, ohne dass sie beispielweise von 3D-Material mitgerissen wird. Ein ähnlicher Mechanismus könnte das Maximum in der linken Abbildung bedingen, da sich die Paddelfläche des Ballstikseparators erst langsam füllt und somit nicht sofort dem hohen Durchsatz ausgesetzt ist.

Anzumerken ist, dass es sich hierbei nicht um die Rohdaten handelt, sondern um die *Median/Mittelwert/Mittelwert*-Applikation. Es besteht die Möglichkeit, dass die nicht geglätteten Rohdaten auch für den 3D-Sensor vereinzelte Sekunden ohne Materialdurchgang aufzeigen, wie in Abbildung 27 dargestellt.



Abbildung 27: Vergleich der Rohdaten zu der Median/Mittelwert/Mittelwert Applikation

## 3.6.4 Materialspezifische Schwankungen

Für die Auswertung der materialspezifischen Schwankungen wurden ausschließlich die NIR-Daten verwendet, da diese eine Erkennung der Materialklasse ermöglichen. Wie bereits beschrieben, wurden die Spektren von Getränkekartons, lackiertem Aluminium und lackierten Metallen angelernt, welche sich nicht in dem Standardgemisch befanden. So konnte in den NIR-Daten ein Anstieg und eine Abnahme der Pixel dieser Materialien wahrgenommen werden, nachdem eine definierte Menge in den Kreislauf hinzugeführt wurde. Auch auf diese Daten wurde die zuvor beschriebene Methode des mehrfachen gleitenden Mittelwerts angewendet, um das Grundrauschen auszublenden. Da der Zeitraum der materialspezifischen Schwankungen deutlich geringer ist als der der Durchsatzschwankungen, wurde diese Methode allerdings angepasst. Auf die Rohdaten wurde zunächst das gleitende arithmetische Mittel von fünf Werten angewendet. Auf die entstandene Zahlenreihe wurde dann das gleitende arithmetische Mittel von drei Werten angewendet. Die

Methode ist in Abbildung 28 verdeutlicht, während die Auswirkung auf die Rohdaten in Abbildung 29 anhand von Graphen dargestellt ist.

Uhrzeit (MEZ Sommer)	TETRA	gl. MW 5	gl. MW 3 von gl. MW 5
10:08:25	3	68,8	88,33333333
10:08:26	61	170	140,7333333
10:08:27	215	183,4	202
10:08:28	509	252,6	225,4666667
10:08:29	129	240,4	231,4666667
10:08:30	349	201,4	182,4666667
10:08:31	0	105,6	130,3333333
10:08:32	20	84	89,73333333
10:08:33	30	79,6	♦ 81,2
10:08:34	21	₩ 80	122,3333333
10:08:35	➡ 327	207,4	202,4666667
10:08:36	2	320	298,3333333
10:08:37	657	367,6	335,7333333

Abbildung 28: Prinzip der Datenaufbereitung der Versuche zu materialspezifischen Schwankungen



Abbildung 29: Grafische Darstellung der Datenaufbereitung auf die Rohdaten der materialspezifischen Schwankungen

Für die Auswertung dieser Versuche war es notwendig, folgende Zeitpunkte zu identifizieren:

- Erster Partikel des Materials passiert den Sensor = T<sub>1. Partikel, x-Sensor</sub>
- 90% der Pixel haben den Sensor passiert = T<sub>90 Px-%, x-Sensor</sub>
- Letzter Partikel passiert den Sensor = T<sub>100Px-%, x-Sensor</sub>

Mittels dieser Werte kann eine materialspezifische Verweilzeit ermittelt werden und der Effekt des Ballistikseparators auf materialspezifische Schwankungen untersucht werden, indem die Zeiträume zwischen verschiedenen Sensoren verglichen werden. Da das Material am unteren Ende eines Steigbandes aufgegeben wurde, konnte während des Versuches ein starkes Zurückrollen des Materials, besonders im Fall der FE-Dosen, beobachtet werden. Dadurch kann es passieren, dass der Hauptanteil der Partikel schon den Bereich des Sensors passiert hat, während wenige Partikel den Zeitraum von dem ersten bis zu dem letzten Partikel deutlich verlängern. Um diese Ausreißer auszuschließen, wird der Zeitraum betrachtet, in dem 90 Px-% der Pixel den Aufnahmebereich durchquert haben.

Auch während Zeiträumen, in denen keine Getränkekartons oder Metalle zu dem Versuchsgemisch hinzugefügt wurden, lassen sich in den Sensordaten Pixel dieser Materialien aufgrund von Fehlerkennung feststellen. Ein definierter Schwellenwert der Pixelanzahl, ab dem die Pixel als tatsächliches Material identifiziert werden können, wurde definiert. Dieser wird für jede Parameterkombination und jeden Sensor individuell errechnet, indem das 99 Px-%-Quantil eines bestimmten Zeitraums des jeweiligen Datensatzes bestimmt wurde. Der Zeitraum umfasst den Start der Versuche bei dem entsprechenden Durchsatz, bei dem die Wannenaufgabe stattfand, bis zu dem Ende der Wannenaufgabe. Wurden mehrere Wannen bei verschiedenen Drehzahlen aufgegeben, wie es bei einem Folienanteil von 10 M-% der Fall war, endete der Zeitraum nach der Aufgabe der ersten Wannen der zu untersuchenden Materialien, sodass eine Vergleichbarkeit zu den Versuchen mit anderen Folienanteilen hergestellt wurde. In Abbildung 30 ist das Schwellenwertprinzip verdeutlicht. Es ist zu erkennen, wie das vorher definierte Volumen von 80 Litern des Materials Tetra kompakt den Inputsensor passiert. Die 99 Px-%-Quantile dieses Datensatzes für Tetra und Metalle sind oben rechts zu sehen.

	PP	PET	PS	LDPE	HDPE	Tetra	Metalle	Background	NC	Q99 Tetra	Q99 Metalle	į.
										1237,85333	3175,82667	
12:02:11	35795	29019	1753	37486	325	32,6	1137,93333	28339	118			
12:02:12	31037	29122	8	22428	3956	34,7333333	1061,53333	46081	137			
12:02:13	47174	27989	751	22219	496	63,6	1076,8	33525	242			
12:02:14	41329	19948	2086	18614	359	296,066667	1195,8	47865	296			
12:02:15	62944	12501	59	9874	137	1889,73333	1353,46667	46764	215			
12:02:16	59813	24210	456	17270	434	6333,46667	1374,6	29259	361			
12:02:17	70887	16910	67	22241	303	13030,7333	1297,46667	17864	394			
12:02:18	55439	19259	3199	3156	70	19985,3333	1146,46667	30028	998			
12:02:19	19673	13032	48	14345	986	25265,7333	977,533333	40020	1546			
12:02:20	36727	9293	1519	9698	1173	28329,9333	830,2	36551	1397			
12:02:21	43569	20090	1832	12572	815	27592,6667	932,866667	28097	645			
12:02:22	22920	26486	5940	22810	1485	23193,5333	1127,2	29135	873			
12:02:23	27496	20367	2829	18425	1236	17147,0667	1293,53333	36750	1237			
12:02:24	41718	15187	2670	12874	228	11894,0667	1263,06667	46362	588			
12:02:25	44647	18964	4763	20235	1652	7498	1235,73333	42560	145			
12:02:26	34787	12741	2	32144	814	4218,8	1193,13333	49436	201			
12:02:27	28604	26664	1273	10963	271	2329,06667	1187,73333	64329	348			
12:02:28	47917	28404	19	5327	423	2226,66667	1231,93333	49772	185			
12:02:29	38739	21656	69	19462	611	2425,26667	1401,13333	43095	496			
12:02:30	40817	27654	5666	10317	407	2816,93333	1476	47269	167			
12:02:31	52085	26198	1013	12263	331	3086,6	1383,93333	33295	501			
12:02:32	48336	22577	151	2969	119	3416,13333	1254	55650	1057			
12:02:33	37052	23329	829	27822	469	3280,06667	1147,2	39470	334			
12:02:34	51711	30917	1702	11149	534	3047,46667	1091,8	30715	551			
12:02:35	41183	24920	4411	3895	171	2562,53333	1108,93333	53952	362			
12:02:36	31886	18690	1865	27585	581	1873,33333	1136,73333	48934	336			
12:02:37	25582	21958	5881	15387	329	1145,53333	1208,13333	63515	259			
12:02:38	46886	27854	1221	13076	288	443,466667	1170	41285	357			
12:02:39	61683	9637	1925	26149	208	217,733333	1208,6	33588	296			
12:02:40	56918	32086	11	2566	3791	48,0666667	1143,13333	36534	149			

Abbildung 30: Schwellenwertprinzip bei der Aufbereitung der Daten zu den materialspezifischen Schwankungen

Aus den ermittelten Zeitpunkten (T) der einzelnen Sensoren, die auf Seite 50 erläutert sind, können Zeitenräume (t) berechnet werden, welche Aufschluss über die Verweilzeiten der Materialien bei verschiedenen Parameterkombinationen geben. Dafür wurden folgende Zeiträume errechnet:

- Zeitraum, in dem 90 Px-% der Pixel den Sensor passiert haben = t<sub>90 Px-%, x-Sensor</sub>
- Die Aufenthaltszeit des ersten Partikels auf dem Ballistikseparator = t <sub>1. Partikel,</sub> Ballistikseparator
- Die Streckung des Materials durch den Ballistikseparator = t Streckung 90 Px-%, Ballistikseparator
- Die Streckung des Materials in Relation zu der Zeit in der 90 Px-% des Materials den Inputsensor passiert = t Rel. Streckung 90 Px-% Streckung des Materials: Zeit in der 90 Px-% des Materials den Inputsensor passiert

$$t_{90 Px-\%,x-Sensor} = T_{90 Px-\%,x-Sensor} - T_{1.Partikel,x-Sensor}$$
(13)

$$t_{1.Partikel,Balli} = T_{1.Partikel,3D-Sensor} - T_{1.Partikel,Inputsensor}$$
(14)

$$t_{\text{Streckung 90 Px-\%,Balli}} = t_{90 Px-\%,3D-\text{Sensor}} - t_{90 Px-\%,\text{Inputsensor}}$$
(15)

$$t_{rel.Streckung 90 Px-\%} = \frac{t_{Streckung 90 Px-\%,Balli}}{t_{90 Px-\%,Inputsensor}}$$
(16)

Die errechneten Zeiträume der Sensoren können für verschiedene Parameterkombinationen miteinander verglichen werden. Um Korrelationen zwischen

den Parametern und den Zeiten zu ermitteln, werden die Korrelationskoeffizienten berechnet. Für die Berechnung der Korrelationskoeffizienten wurde die "KORREL()"-Funktion von Microsoft Excel verwendet.

Für die Berechnung der Korrelation der Zeiträume mit den verschiedenen Materialen wurden Materialnummern aufgrund der vermuteten Eigenschaften vergeben. Material, welches tendenziell Eigenschaften von 2D-Material aufweist, erhielt die niedrigste Nummer. Je näher das Material die typischen Eigenschaften des 3D-Materials aufweist, desto höher ist die zugeordnete Zahl. Die Materialien und ihre Materialnummern sind in Tabelle 12 aufgeführt.

Tabelle 12: Materialnummern für die Berechnung der Korrelationskoeffizienten

Material	Eigenschaft	Materialnummer
Tetra kompakt	weich, flach	1
Alu kompakt	hart, flach	2
Tetra ganz	weich, kubisch	3
FE ganz	hart, kubisch	4

Ein Überblick der Datenaufbereitungsschritte für die Datenauswertung je Sensortyp ist in Abbildung 31 und Abbildung 32 dargestellt.



Abbildung 31: Datenaufbereitung der Volumenstromdaten



Abbildung 32: Datenaufbereitung der NIR-Daten

# 4 Ergebnisse und Diskussion

In diesem Kapitel werden die Ergebnisse der Versuche dargestellt und unmittelbar diskutiert. Begonnen wird mit den Ergebnissen der Mitnehmerversuche. Es folgen die Ergebnisse der Versuche zu Durchsatzschwankungen. Abschließend werden die Ergebnisse der Materialschwankungsversuche präsentiert.

## 4.1 Mitnehmerversuche

In Abbildung 33 ist die relative Abweichung des Volumenstromes des Mitnehmerbandes bezogen auf das glatte Band dargestellt.



Abbildung 33: Relative Abweichung des Mitnehmerbandes

Bei einem Folienanteil von 5 M-% und einem berechneten Durchsatz von 1,5 t/h entspricht der Volumenstrom des Mitnehmerbandes im Durchschnitt dem Volumenstrom des glatten Bandes addiert mit ca. 26% des Volumenstroms des glatten Bandes. Die Formel für die Berechnung des Volumenstroms des Mitnehmerbandes  $\dot{V}_{Mitnehmerband}$  ausgehend von dem Volumenstrom des glatten Bands  $\dot{V}_{glattes Band}$ mithilfe der relativen Abweichung aus Abbildung 33 ist in Formel 17 dargestellt.

$$\dot{V}_{Mitnehmerband} = \dot{V}_{glattes Band} + (\dot{V}_{glattes Band} \times relative Abweichung)$$
 (17)

Die relative Abweichung des Mitnehmerbandes bezogen auf das glatte Band nimmt mit steigendem Durchsatz zu. Lediglich bei einem Folienanteil von 15 M-% und dem steigenden Durchsatz von 3,7 t/h zu 5,9 t/h nimmt die relative Abweichung leicht ab. Bei geringeren Durchsätzen ist die Wahrscheinlichkeit höher, dass sich das Material nicht auf den Mitnehmern schichtet, da noch ausreichend freie Bandfläche verfügbar ist. Mit steigendem Durchsatz steigt auch die Bandbelegung, wodurch es wahrscheinlicher wird, dass sich Partikel auf den Mitnehmern türmen und sich darunter

kleine Hohlräume bilden, wodurch eine höhere Abweichung zu den Messungen auf dem glatten Band bedingt wird. Die Kurven verlaufen allerdings nicht linear, sondern flachen mit steigendem Durchsatz ab. Eine Erklärung dafür ist, dass die Hohlräume, die sich durch das Türmen von Material bilden, einen geringeren Anteil an dem höheren Gesamtvolumen einnehmen. Außerdem ist es möglich, dass Hohlräume durch den höheren Druck, der durch mehr Material verursacht wird, gefüllt werden.

Die relative Abweichung steigt bei sinkendem Folienanteil in allen Fällen außer bei den Durchsätzen 1,5 t/h und 2,4 t/h, bei welchen die relative Abweichung bei einem Folienanteil von 15 M-% über der relativen Abweichung bei 10 M-% Folienanteil liegt. Folien besitzen eine höhere Schüttdichte als das 3D-Material, wodurch schon bei einem glatten Band ein höherer Volumenstrom verzeichnet wird. Möglicherweise bedingt die leichtere Verformbarkeit der Folien eine Anpassung an die Mitnehmer, wodurch der Effekt des *Türmens* von starrem Material vermindert wird.

Die untersuchten Kombinationen sind mit Datenpunkten gekennzeichnet. Um den Trend darzustellen, werden die Punkte mit einer Linie verbunden. Da die Möglichkeit der Interpolation zwischen den Datenpunkten nicht untersucht wurde, ist diese Linie lediglich als Trend zu verstehen. Die Möglichkeit der Interpolation kann an dieser Stelle weder bestätigt noch ausgeschlossen werden.

Das Diagramm zu den absoluten Abweichungen findet sich im Anhang.

Die Kernerkenntnisse des Kapitels 4.1 lauten wie folgt:

- Die relative Abweichung der Mitnehmerbandes bezogen auf das glatte Band nimmt bei steigendem Durchsatz in acht von neun getesteten Fällen zu
- Die relative Abweichung des Mitnehmerbandes bezogen auf das glatte Band nimmt bei steigendem Folienanteil in sechs von acht Fällen ab
- Mitnehmer auf den Förderbändern erzeugen einen **10 Vol-%-44 Vol-%** höheren Messwert des Volumenstromes bezogen auf glatte Förderbänder

## 4.2 Durchsatzschwankungen

## Quantifizierung des Einflusses der Steigbänder und Bandübergaben

Wie in Abbildung 34 zu sehen ist, weichen die Inputsensordaten bei einem Folienanteil von 5 M-% stärker von der erzeugten Schwankung ab, woraus geschlossen werden kann, dass die erzeugte Schwankung bereits deutlich ausgeglichen wird, bevor sie den Ballistikseparator erreicht. Dieser Effekt ist in abgeschwächter Form auch bei den Folienanteilen 10 M-% und 15 M-% sichtbar. Dieser Unterschied könnte durch die ausgeprägte Relativbewegung des 3D-Materials auf den Steigbändern bedingt sein. Durch Zurückrollen des Materials beginnt sich das Material zu verteilen, wodurch sich der absolute Abstand verringert. Auch eine Relativbewegung zum Band durch

Springen der schlecht verformbaren harten Partikel bei Bandübergaben, bei denen das Material von einem Fließband auf ein anderes fällt, ist denkbar. Die größere Schwankungsbreite bei einem Folienanteil von 5 M-%, die in Abbildung 34 zu erkennen ist, weist darauf hin, dass sich das 3D-Material unvorhersehbarer verhält als die Folie. Die dargestellten Diagramme für die absolute Abweichung während des 45-sekündigen Zeitraums finden sich im Anhang.



Abbildung 34: Einfluss der Bandübergaben dargestellt durch Abweichung der gemessenen Schwankung zu der erzeugten Schwankung (Schwankungsbreite)

### Anzahl der Runden bis zum Ausgleich der Schwankung

Die Auswertungen der Rundenanzahl, die es für den Ausgleich der Schwankung benötigt, sind in Abbildung 35, Abbildung 36 und Abbildung 37 zu sehen. Die im Diagramm dargestellten Ergebnisse basieren auf den ausgewerteten Daten des Inputsensors.

Die blauen Säulen stellen die Daten für offene Paddelbeläge dar, die grün eingefärbten Säulen repräsentieren die Daten der geschlossenen Paddelbeläge. Je dunkler die Säulen werden, desto höher ist der untersuchte Folienanteil mit den Schritten 5 M-%, 10 M-% und 15 M-%.







Abbildung 36: Runden bis Ausgleich 2,4 t/h



Abbildung 37: Runden bis Ausgleich 3,7 t/h

Die grauen Datenpunkte zeigen den Mittelwert der Rundenanzahl bis zum Ausgleich aller Folienanteile je Winkeleinstellung. Zu beachten ist, dass sich die Winkel aus in Kapitel 3.5 genannten Gründen zwischen beiden Paddelbelägen unterschieden. Die Runden, die für den Ausgleich der Schwankung benötigt werden, sind bei geschlossenen Paddeln bei gleichen Winkeleinstellungen immer geringer als bei offenen Paddelbelägen. Dies impliziert, dass die durchgeführten Versuche auf eine Veraleichmäßigung des **Ballistikseparators** bessere mit geschlossenen Paddelbelägen hindeuten. Eine mögliche Erklärung für diesen Unterschied könnte ein Ansaugeffekt sein, der auf geschlossenen Paddeln bei großen, flächigen Partikeln wie Folien entstehen könnte. Dabei entsteht ein Unterdruck zwischen den geschlossenen Paddeln und den flachen Partikeln. Die Verweilzeit dieser Partikel würde erhöht, da sie teilweise an den Paddeln anhaften und dadurch längere Zeit benötigen, um ausgetragen zu werden. Während einer Zeit, in der kein Material den Ballistikseparator durchquert, wie durch die Schwankungserzeugung generiert, leeren sich die Paddel langsamer, wodurch eine Pufferung entstehen könnte.

Bei Betrachtung des Winkeleinflusses kann eine Tendenz zu schlechterer Vergleichmäßigung bei steigendem Winkel festgestellt werden, wenn lediglich die Winkelextrema gegenübergestellt werden. Diese betragen für offene Paddel 15° und 20°, für geschlossene Paddel betragen sie 17,5° und 22,5° Dabei benötigt der Stoffstrom bei dem steilsten Winkel in fünf von sechs Fällen mehr Runden für den Ausgleich der Schwankung. Für die mittlere Winkeleinstellung kann eine solche Tendenz lediglich für den Fall *geschlossenen Paddelbeläge, Durchsatz 3,7 t/h* festgestellt werden.

Bei einem Folienanteil von 15 M-% werden in 13 von 15 Fällen mehr Runden für den Ausgleich der Schwankung benötigt als bei den Folienanteilen 5 M-% und 10 a-%. Das lässt vermuten, dass sich ein sehr hoher Folienanteil im Stoffstrom negativ auf die Vergleichmäßigung des Ballistikseparators auswirkt. Diese Vermutung ist konträr zu der These des Ansaugeffektes und der daraus resultierenden Pufferkapazität bezogen auf flächige Partikel.

Der bereits am Anfang des Kapitels dargestellte Ausgleichseffekt der Steigbänder und Bandübergaben könnte erklären, warum bei einem Folienanteil von 5 M-% weniger Runden für den Ausgleich der Schwankung benötigt werden als bei höheren Schwankungen, obwohl der Ansaugeffekt wirkt. Beide Effekte wirken während der Versuche auf das Material, allerdings hat der Ausgleichseffekt der Bandübergaben einen größeren Einfluss auf die Vergleichmäßigung des Materials als der Ansaugeffekt bei geschlossenen Paddelbelägen. Deshalb lässt sich aus der geringeren Anzahl der Runden bis zu dem Ausgleich der Schwankung nicht zwangsläufig auf eine Abwesenheit des Ansaugeffektes schließen. Ein systematischer Einfluss des Durchsatzes auf die Vergleichmäßigung kann im Zuge dieser Versuche nicht festgestellt werden.

Um die vorgestellte Methode auf beliebige Datensätze anwenden zu können, ohne für jede Auswertung separate Schwellenwerte berechnen zu müssen, wurden die bei diesen Versuchen ausgearbeiteten Schwellenwerte in prozentuale Anteile der Volumen- bzw. Pixelströme umgerechnet. Bei bekannten Volumen- bzw. Pixelströmen können durch die Prozentangaben in Tabelle 13 Schwellenwerte berechnet werden, die angeben, ab welchem Wert ein Stoffstrom nach der in dieser Diplomarbeit präsentierten Methode als gleichmäßig bezeichnet werden kann.

Während die Schwankungsbreite der prozentualen Schwellenwerte um den Mittelwert bei dem Input und dem 3D-Sensor maximal 2% beträgt, schwanken die Prozentwerte bei dem 2D-Sensor um bis zu 31%. Generell sind die Werte des 2D-Sensors teilweise um etwa das Zehnfache höher als die des 3D-Sensors. Die Unterschiede zwischen den Folienanteilen lassen sich erklären, da der 2D-Materialstrom durch Folie repräsentiert wird. Eine Änderung des Folienanteils hat daher einen größeren Einfluss auf den 2D-Strom, welches durch diese Änderung stärker schwankt als der Input- und der 3D-Strom. Bei einem Folienanteil von 5 M-% wird erwartet, dass der 2D-Strom gegenüber einem Folienanteil von 15 M-% abnimmt. Um einen Schwellenwert in ähnlicher Größenordnung zu erhalten, muss ein größerer Anteil des Stromes angenommen werden. Die Anteile bei Input- und 3D-Sensor bleiben je nach Durchsatz ähnlich: Dies bedeutet, dass die absoluten Schwellenwerte mit höherem Durchsatz ansteigen. Bei dem 2D-Strom sinken die Anteile tendenziell bei höheren Durchsätzen, wodurch die absoluten Schwellenwerte eher konstant bleiben. Allerdings erscheint es sinnvoller, dass der absolute Schwellenwert bei höheren Durchsätzen ansteigt. Der Schwellenwert wurde auf Basis der absoluten Abweichungen berechnet, welche mit höherem Durchsatz ansteigen. Bei dem 2D-Strom ist kein Anstieg des absoluten Schwellenwertes bei höheren Durchsätzen zu erkennen. Eine mögliche Erklärung hierfür wäre der generell geringe Folienanteil in dem Gemisch, der möglicherweise keine verlässlichen Aussagen über den 2D-Strom zulässt.

Tabelle 13: Prozentuale Schwellenwerte für die Quantifizierung der Gleichmäßigkeit von	1
Stoffströmen	

		Schwellenwerte		
Durchsatzstufe (t/h)	Folienanteil (M-%)	Anteil vom Inputstrom (m³/min)	Anteil vom 3D Material im 3D-Strom (Pixel)	Anteil vom 2D-Material im 2D-Strom (Pixel)
1,5	5	13%	5%	68%
	10	14%	7%	44%
	15	12%	8%	28%
2,4	5	12%	5%	50%
	10	13%	6%	36%
	15	11%	7%	20%
3,7	5	13%	5%	40%
	10	14%	6%	25%
	15	12%	7%	17%
Gesamtmittelwert		12%	6%	37%

#### Übertragung der Schwankung in die Outputströme 3D und 2D

Die Ergebnisse der Auswertung sind in Abbildung 38 dargestellt. Wie bereits herausgearbeitet, ist der Volumenstrom im Input des Ballistikseparators nur bei den Versuchen zu geschlossenen Paddelbelägen mit einem Winkel von 22,5° bei 0 m<sup>3</sup>/min, obwohl in allen Versuchskonstellationen eine Schwankung mit einem Volumenstrom von 0 m<sup>3</sup>/min erzeugt wurde, weil die Bandübergaben bereits einen Teil der Schwankung ausgeglichen haben.

Es fällt auf, dass die errechneten Prozentwerte des 3D-Sensors immer über den Werten des 2D-Sensors liegen. Die Werte des 2D-Sensors bewegen sich in fünf von sechs Fällen im Bereich derer des Inputsensors, während der gemessene Volumenstrom des 3D-Sensors etwa 20% des Gesamtmittelwertes beträgt. Dies deutet darauf hin, dass im 2D-Strom kaum eine Vergleichmäßigung der Schwankung stattgefunden hat, während im 3D-Strom eine deutliche Annäherung des Minimums an den Gesamtmittelwert erfolgte.

Eine Ausnahme stellt die 2D-Fraktion bei geschlossenen Paddeln und dem Winkel 17,5° dar. Dort fand ebenfalls eine Verringerung des Minimums im Vergleich zu dem Inputstrom statt. Bei dem nächststeileren Winkel (20°) liegt der Wert der 2D-Fraktion leicht über dem des Inputsensors. Bei einem Winkel von 22,5° sind beide Werte identisch. Im Gegensatz dazu gibt es bei offenen Paddelbelägen keine solchen Unterschiede zwischen den Winkeln. Bei allen drei getesteten Winkeln entspricht der Wert des 2D-Stroms entweder genau dem des Inputstroms oder liegt nur leicht darüber. Dieser Unterschied könnte ein Hinweis auf den Ansaugeffekt der geschlossenen Paddel auf 2D-förmige Partikel sein, wodurch die Verweilzeit und damit die Pufferwirkung erhöht wird. Das plötzliche Abfallen des Wertes bei einem steileren Winkel könnte durch Mitreißen von 2D-förmigen Partikeln in die 3D-Fraktion bedingt sein. Ein steilerer Winkel erschwert die Bedingungen für das 2D-Material, korrekt ausgetragen zu werden, da es gegen die Schwerkraft eine steilere Fläche passieren muss. Dadurch wird die 2D-Ausbeute negativ beeinflusst. Möglicherweise ist die Wirkung der Schwerkraft bei einem Winkel ab 20° höher als der Ansaugeffekt. Um diese These zu belegen, würde sich eine Wiederholung der Versuche mit dem Zusatz der Winkeleinstellung 15° bei geschlossenen Paddeln eignen.

Ein Einfluss des Folienanteils konnte nicht festgestellt werden. Durch die isolierte Betrachtung der Schwankungsübertragung auf die beiden Outputströme des Ballistikseparators, wie sie in Abbildung 38 dargestellt ist, kann geschlossen werden, dass die Änderung des Folienanteils im Gemisch keine relevante Auswirkung auf die Vergleichmäßigung eines Stoffstromes durch den Ballistikseparator hat. Allerdings bewirkt die Erhöhung des Folienanteils eine schlechtere Vergleichmäßigung eines Stoffstroms bedingt durch die Steigbänder und Bandübergaben in einer Anlage. Bezüglich des Ansaugeffektes kann vermutet werden, dass dieser nicht stärker wird,
je höher der Folienanteil (in dem untersuchten Bereich von 5% bis 15%) ist. Möglicherweise ist die Paddelfläche des Ballistikseparators bereits bei einem Folienanteil von 5% ausgelastet. Die Menge der Folien, die die Paddelfläche berührt, und auf die dadurch der Ansaugeffekt wirkt, ändert sich nicht mit steigendem Folienanteil, da sich die Folien überlagern.



Abbildung 38: Vergleich der Schwankungsminima zwischen den Sensoren

Für die vorangegangene Auswertung wird lediglich das Minimum der Schwankung verwendet und nicht die gesamten Abweichungen in einer Runde, die bei den Auswertungen der Runden bis zum Ausgleich der Schwankung im Inputsensor verwendet wurden. Um die Ergebnisse zu validieren oder Unterschiede herauszuarbeiten, wurde ebenfalls ein Vergleich der relativen Abweichungen pro Runde zwischen den drei Sensoren vorgenommen. Die Berechnung dieser relativen Abweichungen ist in Kapitel 3.6.3 beschrieben.

In Abbildung 39 und Abbildung 40 sind die relativen Abweichungen pro Runde von 3Dund 2D-Sensor in Abhängigkeit vom Winkel aufgetragen. In die Diagramme werden je Winkel alle getesteten Durchsätze und Folienanteile mit betrachtet, da diese bei allen Winkeln und Paddelbelägen identisch sind. Geringe relative Abweichungen bedeuten eine bessere Gleichmäßigkeit des Stoffstroms. Auch in diesen Grafiken lassen sich kaum Unterschiede bei der Gleichmäßigkeit des 3D-Stoffstromes (Abbildung 39) zwischen verschiedenen Winkeln und Paddelbelägen erkennen. Wie in Abbildung 38 fällt auch in Abbildung 40 auf, dass die Vergleichmäßigung des 2D-Stroms bei einem Winkel von 17,5° und geschlossenen Paddelbelägen am besten ist und sie sich mit steigendem Winkel deutlich verschlechtert. Bei offenen Paddelbelägen sind die Ausreißer anzumerken, die bei einem Winkel von 22,5° auftreten. Bei Betrachtung der Daten kann festgestellt werden, dass die Ausreißer aus dem Versuch GP 22,5 5 M-% Folie 1,5 t/h stammen, bei dem die relativen Abweichungen bis zu 40-mal so hoch sind wie bei den anderen Versuchen. Es konnten keine erkennbaren Gründe für diese Ausreißer bezüglich der Versuchsdurchführung ausgemacht werden. Es wurden ebenfalls keine anderen Störfaktoren beobachtet. Der berechnete und für die Auswertung der 2D-Daten verwendete starre Median des 2D-Stromes liegt bei etwa 10 Pixeln PE-LD pro Sekunde. Bedingt wird dieser geringe Wert durch den steilen Winkel, den geringen Durchsatz und den geringen Folienanteil. Diese Faktoren führen dazu, dass kaum 2D-Material im 2D-Output ausgetragen wird. Der Median ist wenig anfällig gegenüber Ausreißern. Eine mögliche Erklärung für die hohen Abweichungen in Relation zu dem geringen Mittelwert des Stoffstroms wäre eine außergewöhnlich große Folie oder eine Agglomeration von Folien, die in jeder Runde den 2D-Austrag passiert. In der Medianberechnung der Gesamtzeit (20 Minuten) hat dieser Ausreißer möglicherweise keinen so großen Einfluss wie bei der Anwendung der *Median/Mittelwert/Mittelwert* – Berechnung. Wird die Abweichung dieser Werte zu dem Gesamtmedian berechnet, fällt diese entsprechend hoch aus.



Abbildung 39: Winkeleinfluss auf die Schwankungsausprägung des 3D-Materials



Abbildung 40: Winkeleinfluss auf die Schwankungsausbreitung des 2D-Materials

In Abbildung 41 und Abbildung 42 sind die relativen Abweichungen in Abhängigkeit vom Durchsatz dargestellt. Um die Diagramme untereinander vergleichbar zu machen, fließen in die Darstellung nur die Winkel 17,5° und 20° ein, da diese für beide Paddelbeläge getestet wurden.

Der 3D-Strom zeigt eine Verringerung der relativen Abweichungen bei steigendem Durchsatz bei offenen Paddelbelägen, was für eine verbesserte Vergleichmäßigung des 3D-Materials bei offenen Paddeln mit steigendem Durchsatz spricht. Für geschlossene Paddelbeläge kann eine solche Aussage nicht getroffen werden.

Der 2D-Strom zeigt bei steigendem Durchsatz ebenfalls eine sinkende relative Abweichung und somit eine verbesserte Vergleichmäßigung. Im Gegensatz zu dem 3D-Strom ist der Effekt hier bei beiden Paddelbelägen zu erkennen und zeigt eine stärkere Ausprägung. Außerdem verringert sich die Breite der Streuung bei höheren Durchsätzen.



Abbildung 41: Paddel- und Durchsatzeinfluss auf die Schwankungsausprägung des 3D-Materials



Abbildung 42: Paddel- und Durchsatzeinfluss auf die Schwankungsausprägung des 2D-Materials

Für die Abbildungen 39, 40, 41 und 42 wurde die relative Abweichung pro Runde verwendet, allerdings fließen die Werte aller neun Runden in diese Darstellung ein. Für Abbildung 38 wurde nur Runde 1 betrachtet, damit eine direkte Übertragung der Ausgleichsfähigkeit des Inputs durch den Ballistikseparator zu den beiden Outputströmen möglich ist.

Durch die Verwendung der Werte aller Runden entsteht eine große Streuung der Werte, da die relative Abweichung durch den Ausgleich der Schwankung von Runde

zu Runde weniger wird. Bei der Betrachtung der Grafiken wird deutlich, dass sich die unteren *Whisker* der Boxplottdiagramme bis auf wenige Ausnahmen weniger voneinander unterscheiden als die oberen *Whisker*. Die Datensätze unterscheiden sich je Diagramm meist durch die Quartile oder die oberen *Whisker*. Daraus geht hervor, dass die späteren Runden, in denen eine geringe relative Abweichung vorliegt, kaum durch die Parameter beeinflusst werden. Die verschiedenen Parameter beeinflussen die früheren Runden deutlicher. Generell liegen die Werte der geschlossenen Paddelbeläge im 2D-Strom bei allen Durchsatzstufen etwas unter denen für offene Paddelbeläge. Im 3D-Strom ist dieser Effekt nicht so deutlich zu beobachten.

Die Kernerkenntnisse des Kapitels 4.2 lauten wie folgt:

- Der Ballistikseparator vergleichmäßigt Schwankungen des Modellstoffstromes tendenziell besser, wenn geschlossene Paddelbeläge verwendet werden
- Die Förderbänder und die Bandübergaben haben bei einem Folienanteil von 5 M-% den höchsten Einfluss auf die Vergleichmäßigung des Stoffstroms. Die im Inputvolumenstrom des Ballistikseparators gemessene Schwankung weicht dort um bis zu 21% von der erzeugten Schwankung ab
- Schwankungen werden eher in den 2D-Strom des Ballistikseparators übertragen und in dem 3D-Strom ausgeglichen. Allerdings muss hierbei auf die geringe Menge des 2D-Stromes hingewiesen werden, wodurch es teilweise zu Problemen bei der Quantifizierungsmethode kam

#### 4.3 Materialspezifische Schwankungen

Bei der Auswertung der materialspezifischen Schwankungen musste festgestellt werden, dass die Daten des 2D-Sensors nicht für diese verwendet werden konnten. Es konnten keine materialspezifischen Schwankungen festgestellt werden, wodurch keine Zeitpunkte oder Zeiträume für die Ermittlung der Verweilzeiten berechnet werden konnten. Mögliche Gründe könnten die ausgewählten Materialien sein, die eher dreidimensionale Eigenschaften aufwiesen, sowie die Auswahl des Winkels und der Drehzahl, welche gegebenenfalls keinen Austrag der Materialien in den 2D-Stoffstrom ermöglichten.

In Tabelle 14 sind die Korrelationskoeffizienten der in Kapitel 3.6.4 beschriebenen Zeiten und den Parametern dargestellt. Die Ergebnisse sind in offene und geschlossene Paddel unterteilt. Korrelationskoeffizienten zwischen 0,5 und 0,9 (bzw. -0,5 und -0,9) sind farblich blass markiert. Ihnen wird eine mäßige Korrelation zugeordnet. Korrelationskoeffizienten > 0,9 (bzw. < -0,9) sind farblich kräftiger markiert. Sie werden mit einer starken Korrelation bemessen. Korrelationskoeffizienten < 0,5 (bzw. > -0,5) sind nicht markiert, da ihnen keine Korrelation zugeschrieben wird.

Die Mehrheit der Korrelationskoeffizienten befindet sich im Bereich kleiner als 0,5 (bzw. größer als -0,5). Daraus resultiert, dass die ermittelten Zeiten mit den meisten Parametern keine Korrelation aufweisen. Mit einem Korrelationskoeffizienten von -0,6 kann der Aufenthaltszeit des ersten Partikels auf dem Ballistikseparator bei offenen Paddelbelägen eine negative Korrelation mit dem Material zugeschrieben werden. Die Aufenthaltszeit sinkt mit ansteigenden Materialnummen, welche in Kapitel 3.6.4 beschrieben wurden. Tetra kompakt hat die längste Aufenthaltszeit, während FE tendenziell eine kürzere Aufenthaltszeit aufweist. Da Tetra kompakt in den Materialeigenschaften 2D-Material ähnelt (flach, weich) kann die Vermutung aufgestellt werden, dass Tetra kompakt zuerst den Weg des 2D-Materials entgegen der Schwerkraft nimmt, aber letztendlich im 3D-Output ausgetragen wird. *FE ganz* hat klassische 3D-Materialeigenschaften (hart, kubisch) und gelangt somit eher sofort in den 3D-Austrag. Bei geschlossenen Paddelbelägen liegt der Faktor bei 0,41.

Bei offenen Paddelbelägen kann eine Korrelation der Aufenthaltszeit des ersten Partikels mit dem Winkel festgestellt werden. Hier liegt der Korrelationskoeffizient bei -0,65. Bei steigendem Winkel sinkt die Aufenthaltszeit. Dies kann mit der steileren Paddelfläche begründet werden, durch die Partikel schneller mit der Schwerkraft in die 3D-Fraktion ausgetragen werden und sich nicht gegen die Schwerkraft in die 2D-Fraktion bewegen, da sie eine größere Höhe überwinden müssen. Bei offenen Paddelbelägen beträgt der Korrelationskoeffizient bei gleicher Kombination -0,36. Der etwa doppelt so hohe Faktor bei geschlossenen Paddelbelägen zurückzuführen sein. Während bei offenen Paddelbelägen die Winkel 15°, 17,5° und 20° getestet wurden, wurde bei geschlossenen Paddelbelägen auf den flachsten Winkel von 15° verzichtet und dafür ein steilerer Winkeleinstellungen, wodurch der Korrelationskoeffizient bei geschlossenen Belägen größer ist.

Für die Streckung des Materials, also die Fähigkeit des Ballistikseparators, eine materialspezifische Schwankung zu puffern, indem sich der Abstand zwischen den einzelnen Artikeln einer Materialklasse vergrößert, konnte kein relevanter Korrelationskoeffizient mit den untersuchten Parametern über 0,5 festgestellt werden. Die stärkste Korrelation für die Streckung des Materials kann anhand der Koeffizienten mit der Art des Materials bei geschlossenen Paddelbelägen beobachtet werden. Der Korrelationskoeffizient liegt bei -0,4. Daraus lässt sich eine Tendenz für eine stärkere Streckung der Materialien auf dem Ballistikseparator ablesen, je eher die Materialien 2D-Eigenschaften entsprechen. Die Versuche lassen allerdings keinen eindeutigen Einfluss der untersuchten Parameter auf die Ausgleichsfähigkeit des Ballistikseparators in Bezug auf materialspezifische Schwankungen erkennen. Um diese Erkenntnis zu überprüfen, sollten diese Versuche erneut durchgeführt werden. Die Versuche sollten dafür mit einer größeren Versuchsmenge durchgeführt werden. Je nach Material befinden sich in einer Wanne mit einem Volumen von 80 Liter, die für die Schwankungserzeugung verwendet wurde, nur wenige Artikel der zu beprobenden Materialklasse. Besonders bei dem Material *Tetra ganz* sind dem Kreislauf durch die geringe Schüttdichte während einer erzeugten Schwankung nur wenige Getränkekartons zugeführt worden. Auch bei den anderen Materialien wird vermutet, dass die Menge der aufgegebenen Materialien zu gering war, um eine relevante Aussage über die Streckung zu treffen. Die Zeiten unterschieden sich zwischen den Versuchen oft nur um wenige Sekunden.

Außerdem wurden die Materialien aus sicherheitstechnischen Gründen nicht direkt vor dem Sensor in den Kreislauf zugeführt, sondern auf einem Steigband, welches vor dem Zulaufband des Ballistikseparators liegt (Abbildung 7 Band direkt nach Delabeler). Es ist davon auszugehen, dass das Material auf dem steilen Band zurückrollte und es dadurch zu einer Verteilung des Materials in Förderrichtung kommt. Es sind sowohl materialspezifische Muster zu erkennen, also auch solche, die auf den Folienanteil zurückzuführen sind. Jedoch ist ein zufälliges Verhalten an dieser Stelle nicht auszuschließen. Die Korrelationskoeffizienten zwischen der Durchgangszeit von 90 Px-% der Materialpixel durch den Inputsensor als Maß für diese Streckung und den anderen berechneten Zeiten sind in Tabelle 14 in Zeile 7 dargestellt. Je nach Paddelbelag beträgt der Faktor bis zu -0,92. Das entspricht einer sehr starken negativen Korrelation.

Je vereinzelter das Material im Inputsensor detektiert wird, desto geringer ist die Streckung des Materials auf dem Ballistikseparator. Bei geschlossenen Paddeln ist die Korrelation dieser Streckung im Input höher als die höchste Korrelation der getesteten Parameter mit den berechneten Zeiträumen. Bei offenen Paddelbelägen ist der Faktor geringer als die höchsten Korrelationskoeffizienten zwischen den Parametern und den berechneten Zeiträumen, aber liegt dennoch bei 0,53.

		Offene Paddelbeläge	;	Geschlossene Paddelbeläge			
	1. Aufenthaltszeit auf Ballistikseparator (1.Partikel) 2. t Streckung 90 Px-%, Ba		3. t rel. Streckung 90 Px-%	1. Aufenthaltszeit auf Ballistikseparator (1.Partikel)	2. t Streckung 90 Px-%, Balli	<b>3.</b> t rel. Streckung 90 Px-%	
Winkel	-0,36	0	0,15	-0,65	-0,22	-0,04	
Folienanteil	0,23	0,19	0,18	-0,01	0,01	-0,07	
Drehzahl	-0,2	-0,01	0,06	0	0,05	0,33	
Material	-0,60	-0,11	-0,10	0,41	-0,4	-0,34	
t Streckung	-0,09	-0,53	-0,19	0		-0,30	
90 Px-%,							
Input							

Tabelle 14: Korrelationsfaktoren berechneter Zeiten und verwendeter Parameter

Eine weitere Unsicherheit dieser Versuchsreihe besteht in der Fehlerkennung der Pixel. Besondern bei den Metallen wurden Pixel der falschen Materialklasse zugeordnet, wie bereits in Kapitel 3.6.1 bei der Berechnung der Pixelgewichte angemerkt. Zusätzlich zu der Fehlerkennung, die von Beginn an zu verzeichnen war, gab es während der Versuche eine Abnutzung der Lacke, mit denen die Metalldosen lackiert wurden, sodass die für den Sensor nicht zu identifizierende Metalloberfläche frei lag. Ein Beispiel der Abnutzung nach einmaligem Durchlaufen des Kreislaufes ist in Abbildung 43 gezeigt. Durch diese Abnutzung ist es möglich, dass ein Großteil der Metallpixel nicht erfasst werden konnte und so die Zeiten verfälschen könnte.



Abbildung 43: Materialabnutzung der Fraktion FE-Dose

Die Materialklassen Tetra kompakt und Tetra ganz unterscheiden sich ausschließlich in der Form der Materialien. Der Effekt der Partikelform in Bezug auf die Fähigkeit des Ballistikseparators, Materialansammlungen zu *puffern*, lässt sich aus diesem Grund an den genannten Materialklassen ohne den Einfluss anderer Materialeigenschaften beobachten. In Tabelle 15 ist die relative Streckung bei gewählten Parameterkombinationen der Fraktionen Tetra kompakt und Tetra ganz dargestellt. Je höher die relative Streckung ist, desto mehr wurde das Material auf dem Ballistikseparator vereinzelt. Eine relative Streckung von 100% bedeutet, dass das Material für die Durchquerung des 3D-Sensors doppelt so lange brauchte, wie für die Durchquerung des Inputsensors. Eine negative relative Streckung lässt auf eine Stauchung des Materials schließen.

In sieben von zehn Fällen ist die Streckung der Fraktion Tetra kompakt ausgeprägter als bei der Fraktion Tetra ganz, während sie in zwei von zehn Fällen identisch ist. In einem Fall wird das Material der Fraktion Tetra ganz stärker vereinzelt als das Material der Fraktion Tetra kompakt. Aus diesem Vergleich kann gefolgert werden, dass flache Getränkekartons eine längere Verweilzeit haben kompaktierte, als unbeschädigte Getränkekartons. Eine mögliche Erklärung stellen die zweidimensionalen Eigenschaften der kompaktierten Getränkekartons dar. Diese bedingen eine Bewegung des Materials in die Richtung des 2D-Austrags, bevor dieses durch die Schwerkraft in den 3D-Austrag gelangt. Unbeschädigte Getränkekartons werden unmittelbar in die 3D-Fraktion ausgetragen.

		O	P	GF	>	
Winkel (°)	Folienanteil (%)	Tetra kompakt	Tetra ganz	Tetra kompakt	Tetra ganz	
15	5	128%	-43%			
15	10	0%	0%			
15	15	50%	14%			
20	5	0%	0%	22%	-12%	
20	10	12%	0%	133%	-33%	
20	15			46%	-43%	
22,5	5			0%	15%	
22,5	10			100%	0%	

Tabelle 1	15:	Relative	Streckung	von	Tetra	ganz	und	Tetra	kompa	kt
						3				

Alle errechneten Zeiten, wie sie im Methodikteil beschrieben wurden, finden sich im Anhang dieser Arbeit. Für die Versuchsparameterkombination *GP\_17,5°\_15%\_1,5 t/h* Folienanteil wurde der Versuch drei Mal wiederholt. Die errechneten Zeiten sind ebenfalls im Anhang dargestellt und markiert. Diese zeigen, dass die Zeiten in dem dargestellten Fall bei gleichen Versuchsparametern in einer ähnlichen Größenordnung voneinander abweichen wie die Versuche mit veränderten Versuchsparametern. Um die Abweichungen innerhalb einer Parameterkombination zu reduzieren und Ausreißer auszuschließen, sollten die Versuche jeder Parameterkombination für weitergehende Forschung in diesem Bereich mehrfach durchgeführt werden.

Die Kernerkenntnisse des Kapitels 4.3 lauten wie folgt:

- Bei offenen Paddelbelägen konnte eine Korrelation des Materials mit der Aufenthaltszeit des ersten Partikels auf dem Ballistikseparator festgestellt werden. Je ähnlicher die Materialeigenschaften denen eines 2D-Materials sind, desto länger ist die Verweilzeit des ersten Partikels auf dem Ballistikseparator.
- Bei geschlossenen Paddelbelägen konnte eine Korrelation zwischen der Aufenthaltszeit des ersten Partikels auf dem Ballistikseparator und dem Winkel festgestellt werden. Je steiler der Winkel ist, desto geringer ist die Aufenthaltszeit des ersten Partikels auf dem Ballistikseparator.
- Bei beiden Paddelbelägen konnte eine Korrelation zwischen der Durchgangszeit unter dem Inputsensor und der Streckung des Materials auf dem Ballistikseparator festgestellt werden. Je schneller die Partikel aufgegeben werden, also je weniger gestreckt sie bei dem Eintritt in den sie Ballistikseparator vorliegen, desto mehr werden durch den Ballistikseparator gestreckt.
- Bei der Aufgabe gleichen Materials bei gleichen Parametern unterschieden sich die gemessenen Zeiten ebenso deutlich wie bei der Variation der Parameter.

### 5 Fazit

In der vorliegenden Diplomarbeit wurde eine Methode entwickelt, die es ermöglicht, Durchsatz- und materialspezifische Schwankungen zu quantifizieren. Anschließend wurde diese Methode angewandt, um die Fähigkeit des Ballistikseparators auf die Vergleichmäßigung von schwankenden Stoffströmen bei verschiedenen Parameterkombinationen zu erfassen und zu vergleichen. Außerdem wurde der Einfluss von Bandmitnehmern auf Förderbändern auf die Volumenstrommessung untersucht.

Im Folgenden sollen die in der Einleitung formulierten Forschungsfragen aufgegriffen und beantwortet werden.

# 1. Inwiefern beeinflussen Mitnehmer die Messungen von Volumenstromsensoren bei unterschiedlichen Durchsätzen?

Die zu Beginn aufgestellte These konnte durch die Versuche bestätigt werden. Mit steigendem Durchsatz steigt der Einfluss der Mitnehmer auf die Volumenstrommessung. Der gemessene Durchsatz auf dem Förderband mit Mitnehmern liegt je nach Folienanteil des Stoffstromes und Durchsatz 10-44 Vol-% höher als der gemessene Volumenstrom des glatten Bandes. Tendenziell steigt der Einfluss mit abnehmendem Folienanteil des Stoffstromes. Bei einem Folienanteil von 5 M-% wurden je nach Durchsatz 26-44 Vol-% höhere Volumenströme gemessen, als auf dem glatten Band. Der Effekt flacht mit höherem Durchsatz ab.

#### 2. Welchen Einfluss hat der Ballistikseparator auf mittelfristige Durchsatzschwankungen eines LVP-Stoffstroms mit unterschiedlichen Folienanteilen?

Aus den Versuchen geht hervor, dass der Ballistikseparator einen Stoffstrom grundsätzlich vergleichmäßigen kann. Je Parametereinstellung nach des Balistikseparators variiert die Ausprägung der Vergleichmäßigung. Es wurde bei Kreislaufführung der Versuchsanlage untersucht, wie viele Umlaufrunden der Stoffstrom benötigte, um vergleichmäßigt zu werden. Die geringste Rundenanzahl waren drei Runden, während auch Versuche durchgeführt wurden, bei denen es nach der maximal zur Verfügung stehenden Anzahl von 9 Runden zu keinem vollständigen Ausgleich kam. Generell lässt sich bei geschlossenen Paddelbelägen eine bessere Vergleichmäßigung erkennen als bei offenen Paddelbelägen. Eine Tendenz zu schlechterer Vergleichmäßigung bei steilerem Winkel sowie höherem Folienanteil konnte ebenfalls beobachtet werden. Ein Einfluss des Durchsatzes konnte nur auf die Schwankungsausprägung des 2D-Materials erkannt werden. Ein geringerer Durchsatz führt im 2D-Strom zu einer geringeren Schwankungsausprägung.

Es konnte ebenfalls ein Einfluss der Bandübergaben festgestellt werden, welche einen Schwankungsausgleich bewirken. Dieser Effekt sinkt mit höherem Folienanteil. Um den Effekt in die beiden Outputströme getrennt voneinander und abgegrenzt von den Bandübergaben zu untersuchen, wurden die Schwankungsminima der drei Ströme Input, 3D und 2D verglichen. Dabei konnte ein stärkerer Ausgleich in die 3D-Fraktion beobachtete werden. Diese Beobachtung ist konträr zu der in der Einleitung vorgestellten These. Lediglich bei der Einstellung geschlossene Paddelbeläge 17,5° Winkel konnte unabhängig von Folienanteil und Durchsatz eine Schwankungsminimierung in den 2D-Strom festgestellt werden.

Es konnten prozentuale Schwellenwerte definiert werden, die bei bekanntem Durchsatz eines Stoffstromes angewandt werden können und als Vorschlag für eine neue Gleichmäßigkeitsdefinition vorgestellt werden. Diese Werte wurden für jeden Stoffstrom separat ermittelt. Die Werte des 2D-Stoffstromes weisen hohe Schwankungsbreiten auf, weshalb diese in weiteren Versuchen untersucht werden sollten.

Aus den Versuchen für materialspezifische Schwankungen und Verweilzeiten konnten keine aussagekräftigen Ergebnisse ermittelt werden, da kaum Korrelationen mit den getesteten Parametern identifiziert wurden, während die Zeit der Materialaufgabe starke Korrelationen mit der Aufenthaltszeit auf dem Ballistikseparator aufweist. Es konnte nicht garantiert werden, dass die Materialaufgabe stets in der gleichen Zeitdauer erfolgte.

#### 6 Ausblick

Mit den Versuchen und der Ausarbeitung in dieser Diplomarbeit konnten neue Erkenntnisse über das Verhalten von Materialien auf dem Ballistikseparator bei schwankenden Stoffströmen und verschiedenen Parameterkombinationen gewonnen werden. Einige Effekte müssen weiter untersucht werden, um die Erkenntnisse validieren zu können. Ein möglicher *Ansaugeffekt*, der auf Folien bei geschlossenen Paddelbelägen wirken könnte und dadurch die Aufenthaltszeit dieser Partikel erhöht, wurde bereits thematisiert. Einige Ergebnisse bestätigen diese Vermutung, wie die bessere Vergleichmäßigung des Stoffstromes bei geschlossenen Paddelbelägen, andere sprechen dagegen, wie die schlechtere Vergleichmäßigung bei höherem Folienanteil. Allerdings könnte die schlechtere Vergleichmäßigung durch die Bandübergaben bei höheren Folienanteilen dem Ansaugeffekt entgegenwirken. Weitere Versuche bei verschiedenen Winkeln, Paddeldrehzahlen und Paddelbelägen mit einer reinen Folienfraktion könnten gezielt zu der Untersuchung des möglichen Ansaugeffektes auf Folien bei geschlossenen Paddelbelägen beitragen.

Auffällig ist außerdem der angesprochene Ausgleich in die 2D-Fraktion bei der Parameterkombination *geschlossene Paddelbeläge\_17,5° Winkel*, welcher bei steigenden Winkeln nicht zu beobachten ist. Weitere Versuche mit geschlossenen Paddelbelägen und einem Winkel von 15° könnten Aufschluss darüber geben, ob dieser Effekt lediglich bei einem Winkel von 17,5° auftritt oder bei flacheren Winkeln ebenfalls zu beobachten ist und so eine bessere Vergleichmäßigung in die 2D-Fraktion bei Winkeln bis 17,5° impliziert.

Die durchgeführten Versuche legen eine Korrelation der Parameter *Winkel* und *Materialklasse* mit der Aufenthaltszeit und der Streckung des Materials auf dem Ballistikseparator nahe. Allerdings wird für die Untersuchung von materialspezifischen Schwankungen und Aufenthaltszeiten auf dem Ballistikseparator die Wiederholung der Versuche mit einer größeren Menge als 80 Liter der zu untersuchenden Materialien vorgeschlagen, sodass für diesen Teilbereich aussagekräftige Daten erhoben werden können. Um die Streckung des Materials vor dem Erreichen des Balistikseparators zu vermieden, sollte das Material unmittelbar vor dem Inputsensor in den Kreislauf gegeben werden.

### 7 Literaturverzeichnis

Augustin Entsorgung Holding GmbH (2023): Ballistikseparator - Wie funktioniert ein Ballistikseparator? Online verfügbar unter https://augustin-

entsorgung.de/ballistikseparator-wie-funktioniert-ein-ballistikseparator/, zuletzt geprüft am 08.10.2023.

Beyerer, J.; Puente León, F.; Frese, C. (2012): Automatische Sichtprüfung. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg.

Bilitewski, B.; Härdtle, G. (2013): Abfallwirtschaft. Handbuch für Praxis und Lehre. 4., aktual. u. erw. Aufl. 2013. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg.

Bundesministerium für Klimaschutz, Umwelt, Energie, Mobilität, Innovation und Technologie Österreich (2023): Bundes-Abfallwirtschaftsplan 2023. Teil 1. Wien. Online verfügbar unter

https://www.bmk.gv.at/themen/klima\_umwelt/abfall/aws/bundes\_awp/bawp2023.html.

Bundesministerium für Land- und Forstwirtschaft, Umwelt und Wasserwirtschaft Österreich (2014): Verordnung des Bundesministers für Land- und Forstwirtschaft, Umwelt und Wasserwirtschaft über die Vermeidung und Verwertung von Verpackungsabfällen und bestimmten Warenresten. Verpackungsverordnung 2014, vom 07.06.2023. Online verfügbar unter

https://www.ris.bka.gv.at/GeltendeFassung.wxe?Abfrage=Bundesnormen&Gesetzes nummer=20008902.

Bundesverband Sekundärrohstoffe und Entsorgung (Hg.): Sortierung der Kunststoffabfälle. Online verfügbar unter https://www.bvse.de/themen-kunststoffrecycling/kunststoffaufkommen/sortierung-der-kunststoffabfaelle.html, zuletzt geprüft am 12.07.2023.

Cimpan, C.; Maul, A.; Wenzel, H.; Pretz, T. (2016): Techno-economic assessment of central sorting at material recovery facilities – the case of lightweight packaging waste. In: *Journal of Cleaner Production* 112, S. 4387–4397. DOI: 10.1016/j.jclepro.2015.09.011.

Curtis, A.; Küppers, B.; Möllnitz, S.; Khodier, K.; Sarc, R. (2021): Real time material flow monitoring in mechanical waste processing and the relevance of fluctuations. In: *Waste management (New York, N.Y.)* 120, S. 687–697. DOI: 10.1016/j.wasman.2020.10.037.

Deutscher Bundestag (05.07.2017): Gesetz über das Inverkehrbringen, die Rücknahme und die hochwertige Verwertung von Verpackungen. Verpackungsgesetz, vom 11.05.2023.

Europäische Kommission (Hg.) (2020): Ein neuer Aktionsplan für die Kreislaufwirtschaft für ein saubereres und wettbewerbsfähigeres Europa. Brüssel. Online verfügbar unter https://eur-lex.europa.eu/legalcontent/DE/TXT/?uri=COM%3A2020%3A98%3AFIN.

Europäisches Parlament (20.12.1994): Richtlinie 94/62/EG des Europäischen Parlaments und des Rates vom 20. Dezember 1994 über Verpackungen und Verpackungsabfälle, vom 04.07.2018.

Europäisches Parlament (19.11.2008): Richtlinie 2008/98/EG des europäischen Parlamentes und Rates vom 19. November 2008 über Abfälle und zur Aufhebung bestimmter Richtlinien. Online verfügbar unter https://eur-lex.europa.eu/legal-content/DE/TXT/PDF/?uri=CELEX:32008L0098.

Eurostat (Hg.) (2023): Recycling rates for packaging waste. Online verfügbar unter https://ec.europa.eu/eurostat/databrowser/view/TEN00063/default/table?lang=en&cat egory=env.env\_was.env\_wasst, zuletzt aktualisiert am 21.03.2023, zuletzt geprüft am 15.07.2023.

Feil, A.; Coskun, E.; Bosling, M.; Kaufeld, S.; Pretz, T. (2019): Improvement of the recycling of plastics in lightweight packaging treatment plants by a process control concept. In: *Waste management & research : the journal of the International Solid Wastes and Public Cleansing Association, ISWA* 37 (2), S. 120–126. DOI: 10.1177/0734242X19826372.

Feil, A.; Pretz, T. (2018): Ungenutzte Potentiale in der Abfallaufbereitung. In: R. Pomberger (Hg.): Recy & DepoTech 2018. Recycling & Abfallverwertung, Abfallwirtschaft & Ressourcenmanagement, Deponietechnik & Altlasten, internationale Abfallwirtschaft & spezielle Recyclingthemen : Montanuniversität Leoben, Österreich, 7.-9. November 2018. Leoben: aVW Abfallverwertungstechnik & Abfallwirtschaft Eigenverlag, S. 153–160. Online verfügbar unter https://www.recydepotech.at/media/Konferenzband\_Vortraege.pdf.

Feil, A.; Pretz, T. (2020): Mechanical recycling of packaging waste. In: Plastic Waste and Recycling: Elsevier, S. 283–319.

Feil, A.; van Thoden Velzen, E. U.; Jansen, M.; Vitz, P.; Go, N.; Pretz, T. (2016):
Technical assessment of processing plants as exemplified by the sorting of beverage cartons from lightweight packaging wastes. In: *Waste management (New York, N.Y.)* 48, S. 95–105. DOI: 10.1016/j.wasman.2015.10.023.

Heinrichs, S.; Stein, R.; Yearwood, A. R.; Schmalbein, N. (2022): Increase throghput and sorting quality with flow control. In: K. Greiff, H. Wotruba, A. Feil, N. Kroell, X. Chen, D. Gürsel und V. Merz (Hg.): 9th Sensor-Based Sorting & Control. 9th Sensor-Based Sorting & Control. Aachen, 13.-14. 04.2022. RWTH Aachen: Shaker Verlag. Jansen, M.; van Thoden Velzen, E.U; Pretz, Th (2015): Handbook for sorting of plastic packaging waste concentrates. Separation efficiencies of common plastic packaging objects in widely used separaion machines at existing sorting facilities with mixed postconsumer plastic packaging waste as input. Wageningen: Wageningen UR Food & Biobased Research.

Jetzke, T.; Richter, S. (2020): Hochwertiges Recycling für eine Kunststoffkreislaufwirtschaft. Online verfügbar unter https://publikationen.bibliothek.kit.edu/1000133939.

Kleinhans, K.; Küppers, B.; Parrodi, J. C. H.; Ragaert, K.; Dewulf, J.; Meester, S. de (2022): Challenges faced during near-infrared-based material flow characterization study of commercial and industrial waste. In: K. Greiff, H. Wotruba, A. Feil, N. Kroell, X. Chen, D. Gürsel und V. Merz (Hg.): 9th Sensor-Based Sorting & Control. 9th Sensor-Based Sorting & Control. Aachen, 13.-14. 04.2022. RWTH Aachen: Shaker Verlag.

Knappe, F.; Reinhardt, J.; Kauertz, B.; Oetjen-Dehne; R.; Buschow, N. et al. (2021): Technische Potenzialanalyse zur Steigerung des Kunststoffrecyclings und des Rezyklateinsatzes. Hg. v. Umweltbundesamt Deutschland.

Kranert, M.; Baron, M.; Behnsen, A.; Bidlingmaier, W.; Cimatoribus, C.; Clauß, D. et al. (Hg.) (2017): Einführung in die Kreislaufwirtschaft. Planung -- Recht -- Verfahren. Fifth edition. Wiesbaden: Springer Vieweg.

Kroell, N.; Dietl, T.; Maghmoumi, A.; Chen, X.; Küppers, B.; Feil, A.; Greiff, K. (2022):
Assessment of sensor-based sorting performance for lightweight packaging waste through sensor-based material flow monitoring: Concept and preliminary results. In:
K. Greiff, H. Wotruba, A. Feil, N. Kroell, X. Chen, D. Gürsel und V. Merz (Hg.): 9th Sensor-Based Sorting & Control. 9th Sensor-Based Sorting & Control. Aachen, 13.14. 04.2022. RWTH Aachen: Shaker Verlag, S. 35–53.

Küppers, B.; Hernández Parrodi, J. C.; Garcia Lopez, C.; Pomberger, R.; Vollprecht, D. (2019): Potential of sensor-based sorting in enhanced landfill mining. In: *Detritus* Volume 08 - December 2019 (0), S. 1. DOI: 10.31025/2611-4135/2019.13875.

Küppers, B.; Ludes, A. (2023): Interne Informationen über LVP-Anlagen in Deutschland. Krsko, Slowenien, April 2023 an Johanna Beaupoil.

Küppers, B.; Schlögl, S.; Kroell, N.; R., Verena (2022): Relevance and challenges of plant control in the pre-processing stage for enhanced sorting performance. In: K. Greiff, H. Wotruba, A. Feil, N. Kroell, X. Chen, D. Gürsel und V. Merz (Hg.): 9th Sensor-Based Sorting & Control. 9th Sensor-Based Sorting & Control. Aachen, 13.-14. 04.2022. RWTH Aachen: Shaker Verlag, S. 17–34.

Küppers, B.; Seidler, I.; Koinig, G. R.; Pomberger, R.; Vollprecht, D. (2020): Influence of throughput rate and input composition on sensor-based sorting efficiency. In: *Detritus* (9), S. 59–67. DOI: 10.31025/2611-4135/2020.13906.

Lorber, K. E. (2010): DepoTech 2010. 3. - 5. November 2010, Montanuniversität Leoben ; Tagungsband zur 10. DepoTech Konferenz, Montanuniversität Leoben/Österreich, 3. - 5. November 2010. Leoben: Inst. f. Nachhaltige Abfallwirtschaft und Entsorgungstechnik.

Martens, H.; Goldmann, D. (2016): Recyclingtechnik. Wiesbaden: Springer Fachmedien Wiesbaden. Online verfügbar unter https://link.springer.com/book/10.1007/978-3-658-02786-5.

Möllnitz, S.; Küppers, B.; Curtis, A.; Khodier, K.; Sarc, R. (2021): Influence of prescreening on down-stream processing for the production of plastic enriched fractions for recycling from mixed commercial and municipal waste. In: *Waste management (New York, N.Y.)* 119, S. 365–373. DOI: 10.1016/j.wasman.2020.10.007.

Neubauer, C.; Stoifl, B.; Tesar, M.; Thaler, P. (2021): Sortierung und Recycling von Kunststoffabfällen in Österreich: Status 2019. Hg. v. Umweltbundesamt Österreich. Wien. Online verfügbar unter

https://www.umweltbundesamt.at/fileadmin/site/publikationen/rep0744\_hauptteil.pdf.

Parlament Österreich (2002): Bundesgesetz über eine nachhaltige Abfallwirtschaft. Abfallwirtschaftsgesetz 2002 – AWG, vom 08.12.2023.

Fundstelle: Rechtsinformationssystem des Bundes. Online verfügbar unter https://www.ris.bka.gv.at/GeltendeFassung.wxe?Abfrage=Bundesnormen&Gesetzes nummer=20002086.

Parlament Österreich (2014): Verpackungsverordnung, vom 08.12.2023. Fundstelle: Rechtsinformationssystem des Bundes. Online verfügbar unter https://www.ris.bka.gv.at/NormDokument.wxe?Abfrage=Bundesnormen&Gesetzesnu mmer=20008902&Paragraf=10.

Parrodi, J. C. H.; Kroell, N.; Chen, X.; Dietl, T.; Nordmann, C. (2021): Nahinfrarotbasierte Stoffstromüberwachung von Bau- und Abbruchabfällen. In: 8. Berliner Konferenz Mineralische Nebenprodukte und Abfälle. 8. Berliner Konferenz Mineralische Nebenprodukte und Abfälle. Online verfügbar unter https://www.researchgate.net/publication/354622100\_Nahinfrarotbasierte\_Stoffstromuberwachung\_von\_Bau-\_und\_Abbruchabfallen.

Romen, R. (2020): Mechanisch-biologische Restabfallbehandlung in Österreich. Vergleich von MBA und MBTS. Masterarbeit. Universität für Bodenkultur. Institut für Abfallwirtschaft. Online verfügbar unter

https://forschung.boku.ac.at/fis/suchen.hochschulschriften\_info?sprache\_in=de&men ue\_id\_in=107&id\_in=&hochschulschrift\_id\_in=18453. Schlögl, S. (2021): Stand der Technik von Kunststoffsortieranlagen und Potentiale durch sensorische Stoffstromüberwachung. Masterarbeit. Montan Universität Leoben, Leoben. Online verfügbar unter

https://pure.unileoben.ac.at/de/publications/stand-der-technik-von-kunststoffsortieranlagen-und-potentiale-dur.

Schlögl, S.; Küppers, B. (2022): Quantifying the Delabelling Performance using Sensor-based Material Flow Monitoring. In: K. Greiff, H. Wotruba, A. Feil, N. Kroell, X. Chen, D. Gürsel und V. Merz (Hg.): 9th Sensor-Based Sorting & Control. 9th Sensor-Based Sorting & Control. Aachen, 13.-14. 04.2022. RWTH Aachen: Shaker Verlag, S. 55–70.

Schwarzenbacher, M. (2022): Quantitative Beurteilung der LIDAR-Technologie zur volumetrischen Stoffstromcharakterisierung von LVP-Material. Masterarbeit. Montan Universität Leoben, Leoben. Lehrstuhl für Abfallverwertungstechnik und Abfallwirtschaft. Online verfügbar unter

https://pureadmin.unileoben.ac.at/ws/portalfiles/portal/8829840/AC16509071.pdf.

Sigmund, U. (2018): Sorting with ballistic seperators. In: KU Leuven (Hg.): Proceedings of the 4th international symposium on enhanced landfill mining. Unter Mitarbeit von Peter Tom Jones und Lieven Machiels. 4th international symposium on enhanced landfill mining. Belgien.

Stadler Anlagenbau GmbH (14.12.2020): STADLER eröffnet neues Test- und Innovationszentrum mit Schwerpunkt Kunststoffsortierung und Recycling in Slowenien. Online verfügbar unter https://w-stadler.de/unternehmen/defaulttitle/detail/stadler-eroeffnet-neues-test-und-innovationszentrum-mit-schwerpunktkunststoffsortierung-und-recycling-in-slowenien.

Stadler Anlagenbau GmbH (2023a): PPK2000. Online verfügbar unter https://w-stadler.de/komponenten/ballistikseparatoren/ppk2000, zuletzt geprüft am 08.10.2023.

Stadler Anlagenbau GmbH (Hg.) (2023b): STT2000. Online verfügbar unter https://w-stadler.de/komponenten/ballistikseparatoren/stt2000, zuletzt aktualisiert am 2023, zuletzt geprüft am 30.07.2023.

Umweltbundesamt Deutschland (Hg.) (2021): Verpackungen. Online verfügbar unter https://www.umweltbundesamt.de/themen/abfall-ressourcen/produktverantwortung-in-der-abfallwirtschaft/verpackungen, zuletzt geprüft am 13.07.2023.

Umweltbundesamt Deutschland (2022): Abfallrecht. Hg. v. Umweltbundesamt. Online verfügbar unter https://www.umweltbundesamt.de/themen/abfall-ressourcen/abfallwirtschaft/abfallrecht.

United Nations (Hg.) (o. D.): Sustainable Development Goals. Goal 12: Ensure sustainable consumption and production patterns. Online verfügbar unter

https://www.un.org/sustainabledevelopment/sustainable-consumption-production/, zuletzt geprüft am 12.07.2023.

Verband Österreichischer Entsorgungsbetriebe (17.06.2021): Vereinheitlichung der Müll-Sammelsysteme in Österreich gefordert. Wien. Online verfügbar unter https://www.voeb.at/service/voeb-blog/detail/show-article/vereinheitlichung-der-muellsammelsysteme-in-oesterreich-gefordert/, zuletzt geprüft am 08.10.2023.

Wagner, J.; Günther, M.; Rhein, H.-B.; Meyer, P. (2017): Analyse der Effizienz und Vorschläge zur Optimierung von Sammelsystemen der haushaltsnahen Erfassung von Leichtverpackungen und stoffgleichen Nichtverpackungen auf der Grundlage vorhandener Daten. Hg. v. Umweltbundesamt Deutschland.

Wellacher, M.; Kunter, A. (2017): Störstoffmanagement in biogenen Abfällen. Montan Universität Leoben. Online verfügbar unter https://www.ibwellacher.at/wp-content/uploads/2021/01/Vortrag-Hannover-2017.pdf.

### 8 Anhang

	PP	PET	PS	LDPE	HDPE	TETRA	METALLE	NOT CLASSIFIED
PP	95%	0%	1%	2%	0%	1%	0%	1%
PET	3%	92%	0%	2%	1%	0%	1%	1%
Flasche								
PET Tray	4%	88%	0%	3%	0%	2%	2%	2%
PS	8%	0%	85%	2%	0%	1%	3%	1%
LDPE	4%	2%	0%	74%	19%	0%	0%	2%
Tetra ganz	5%	0%	0%	1%	1%	89%	0%	3%
Tetra kompakt	3%	0%	0%	1%	1%	89%	0%	5%
Alu	10%	13%	1%	7%	0%	0%	55%	14%
FE	15%	0%	1%	4%	0%	0%	76%	4%

## Tabelle A- 1: Verteilungsmatrize der fehlerkannten Pixel in den Reinfraktionen (Input,<br/>Prozentangaben in Px-%)

Tabelle A- 2: Verteilungsmatrize der fehlerkannten Pixel in den Reinfraktionen (2D,<br/>Prozentangaben in Px-%)

	PP	PET	PS	LDPE	HDPE	TETRA	METALLE	NOT CLASSIFIED
PP	99%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	1%
PET Flasche	4%	91%	0%	0%	1%	0%	2%	2%
PET Tray	6%	88%	0%	0%	0%	0%	1%	4%
PS	7%	0%	86%	0%	0%	0%	5%	1%
LDPE	23%	1%	0%	69%	2%	0%	3%	2%
Tetra ganz	5%	0%	0%	5%	0%	87%	2%	2%
Tetra kompakt	6%	1%	0%	5%	1%	81%	2%	3%
Alu	26%	0%	1%	0%	0%	0%	52%	22%
FE	1%	0%	4%	0%	0%	0%	93%	2%

Tabelle A- 3: Verteilungsmatrize der fehlerkannten Pixel in den Reinfraktionen (3D,<br/>Prozentangaben in Px-%)

	PP	PET	PS	LDPE	HDPE	TETRA	METALLE	NOT CLASSIFIED
PP	99%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%
PET Flasche	2%	96%	0%	0%	1%	0%	0%	0%
PET Tray	7%	92%	0%	0%	0%	0%	0%	0%
PS	6%	0%	91%	0%	0%	1%	2%	0%
LDPE	30%	1%	0%	67%	1%	0%	0%	0%
Tetra ganz	22%	0%	0%	0%	0%	77%	0%	0%
Tetra kompakt	14%	1%	0%	2%	2%	80%	0%	0%
Alu	44%	0%	1%	0%	0%	0%	49%	5%
FE	9%	0%	9%	0%	0%	0%	82%	0%

Paddelart	Material	Winkel	Folien- anteil	Durchsatz	Dreh- zahl	Aufenthaltszeit auf Ballistikseparator (1. Partikel)	t90%, Inputsensor	<b>t</b> 90%,3D- Sensor	tStreckung 90%, Balli	trel.Streckung 90%
GP	Tetra	17,5	15	1,5	75	00:00:05	00:00:10	00:00:16	00:00:06	60%
GP	Tetra	17,5	15	1,5	75	00:00:05	00:00:09	00:00:26	00:00:17	189%
GP	Tetra kompakt	17,5	15	1,5	75	00:00:06	00:00:07	00:00:15	00:00:08	114%
OP	Tetra	15	5	3,7	75	00:00:05	00:00:07	00:00:16	00:00:09	128%
OP	Tetra	15	10	3,7	60	00:00:07	00:00:14	00:00:17	00:00:03	21%
OP	Tetra	15	10	3,7	80	00:00:06	00:00:11	00:00:15	00:00:04	36%
OP	Tetra	15	10	3,7	100	00:00:06	00:00:11	00:00:11	00:00:00	0%
OP	Tetra	15	10	3,7	75	00:00:06	00:00:12	00:00:12	00:00:00	0%
OP	Tetra	15	15	3,7	75	00:00:08	00:00:10	00:00:15	00:00:05	50%
OP	Tetra	20	5	3,7	85	00:00:06	00:00:14	00:00:14	00:00:00	0%
OP	Tetra	20	10	3,7	70	00:00:06	00:00:10	00:00:10	00:00:00	2%
OP	Tetra	20	10	3,7	100	00:00:05	00:00:16	00:00:10	-00:00:06	-38%
OP	Tetra	20	10	3,7	85	00:00:06	00:00:08	00:00:09	00:00:01	12%
OP	Tetra	20	15	3,7	85	00:00:07	00:00:17	00:00:12	-00:00:05	-29%
OP	Tetra	15	5	3,7	75	00:00:05	00:00:14	00:00:08	-00:00:06	-43%
OP	Tetra	15	10	3,7	60	00:00:06	00:00:13	00:00:11	-00:00:02	-15%
OP	Tetra	15	10	3,7	80	00:00:05	00:00:08	00:00:18	00:00:10	125%
OP	ganz Tetra	15	10	3,7	100	00:00:05	00:00:09	00:00:19	00:00:10	111%
OP	Tetra	15	10	3,7	75	00:00:05	00:00:13	00:00:13	00:00:00	0%
OP	ganz Tetra	15	15	3,7	75	00:00:06	00:00:07	00:00:08	00:00:01	14%
OP	Tetra	20	5	3,7	85	00:00:04	00:00:06	00:00:06	00:00:00	0%
OP	Tetra	20	10	3,7	70	00:00:04	00:00:07	00:00:07	00:00:00	0%
OP	Tetra	20	10	3,7	100	00:00:04	00:00:06	00:00:06	00:00:00	0%
OP	ganz Tetra	20	10	3,7	85	00:00:04	00:00:08	00:00:08	00:00:00	0%
OP	Tetra	20	15	3,7	85	00:00:04	00:00:07	00:00:07	00:00:00	0%
OP	Alu	15	5	3,7	75	00:00:05	00:00:11	00:00:11	00:00:00	0%
OP	Alu	15	10	3,7	60	00:00:07	00:00:14	00:00:18	00:00:04	29%
OP	Alu	15	10	3,7	80	00:00:09	00:00:07	00:00:03	-00:00:04	-57%
OP	Alu	15	10	3,7	100	00:00:05	00:00:06	00:00:08	00:00:02	33%
OP	Alu	15	10	3,7	75	00:00:07	00:00:07	00:00:08	00:00:01	14%
OP	Alu	15	15	3,7	75	00:00:08	00:00:07	00:00:04	-00:00:03	-43%
OP	Alu	20	5	3,7	85	00:00:04	00:00:08	00:00:18	00:00:10	125%
OP	Alu	20	10	3,7	70	00:00:05	00:00:06	00:00:15	00:00:09	150%
OP	Alu	20	10	3,7	100	00:00:04	00:00:05	00:00:08	00:00:03	60%
OP	Alu	20	10	3,7	85	00:00:04	00:00:05	00:00:10	00:00:05	100%
OP	Alu	20	15	3,7	85	00:00:06	00:00:06	00:01:32	00:01:26	1437%
OP	FE ganz	15	5	3,7	75	00:00:05	00:00:37	00:00:36	-00:00:01	-3%
OP	FE ganz	15	10	3,7	60	00:00:04	00:00:38	00:01:07	00:00:29	76%
OP	FE ganz	15	10	3,7	80	00:00:03	00:00:08	00:00:08	00:00:00	0%
OP	FE ganz	15	10	3,7	100	00:00:05	00:00:07	00:00:07	00:00:00	0%
OP	FE ganz	15	10	3,7	75	00:00:04	00:00:11	00:00:12	00:00:01	9%
OP	FE ganz	15	15	3,7	75	00:00:05	00:00:27	00:00:15	-00:00:12	-44%
OP	FE ganz	20	5	3,7	85	00:00:03	00:00:56	00:00:07	-00:00:49	-88%
OP	FE ganz	20	10	3,7	70	00:00:05	00:00:23	00:00:17	-00:00:06	-26%
OP	FE ganz	20	10	3,7	100	00:00:03	00:00:26	00:00:26	00:00:00	0%
OP	FE ganz	20	10	3,7	85	00:00:02	00:00:08	00:00:11	00:00:03	37%
OP	FE ganz	20	15	3,7	85	00:00:04	00:00:16	00:00:13	-00:00:03	-19%
GP	Tetra	20	5	3,7	85	00:00:05	00:00:09	00:00:11	00:00:02	22%
GP	Tetra	20	10	3,7	70	00:00:07	00:00:12	00:00:13	00:00:01	8%
GP	Tetra	20	10	3,7	100	00:00:06	00:00:07	00:00:07	00:00:00	0%
GP	Tetra	20	10	3,7	85	00:00:07	00:00:06	00:00:14	00:00:08	133%

#### Tabelle A- 4: Errechnete Verweilzeiten der Versuche zu materialspezifischen Schwankungen

GP	Tetra kompakt	20	15	3,7	85	00:00:07	00:00:13	00:00:19	00:00:06	46%
GP	Tetra kompakt	22,5	5	3,7	85	00:00:04	00:00:10	00:00:10	00:00:00	0%
GP	Tetra kompakt	22,5	10	3,7	70	00:00:05	00:00:12	00:00:14	00:00:02	17%
GP	Tetra kompakt	22,5	10	3,7	100	00:00:04	00:00:12	00:00:16	00:00:04	33%
GP	Tetra kompakt	22,5	10	3,7	85	00:00:03	00:00:06	00:00:12	00:00:06	100%
GP	Tetra ganz	20	5	3,7	85	00:00:05	00:00:08	00:00:07	-00:00:01	-12%
GP	Tetra ganz	20	10	3,7	70	00:00:06	00:00:05	00:00:04	-00:00:01	-20%
GP	Tetra ganz	20	10	3,7	100	00:00:05	00:00:05	00:00:04	-00:00:01	-20%
GP	Tetra ganz	20	10	3,7	85	00:00:06	00:00:06	00:00:04	-00:00:02	-33%
GP	Tetra ganz	20	15	3,7	85	00:00:06	00:00:07	00:00:04	-00:00:03	-43%
GP	Tetra ganz	22,5	5	3,7	85	00:00:02	00:00:07	00:00:08	00:00:01	15%
GP	Tetra ganz	22,5	10	3,7	70	00:00:05	00:00:10	00:00:07	-00:00:03	-30%
GP	Tetra ganz	22,5	10	3,7	100	00:00:03	00:00:06	00:00:21	00:00:15	250%
GP	Tetra ganz	22,5	10	3,7	85	00:00:03	00:00:06	00:00:06	00:00:00	0%
GP	Alu kompakt	20	5	3,7	85	00:00:06	00:00:05	00:00:11	00:00:06	120%
GP	Alu kompakt	20	10	3,7	70	00:00:05	00:00:29	80:00:00	-00:00.21	-72%
GP	Alu kompakt	20	10	3,7	100	00:00:06	00:00:04	00:00:05	00:00:01	25%
GP	Alu kompakt	20	10	3,7	85	00:00:07	00:00:11	00:00:06	-00:00:05	-45%
GP	Alu kompakt	20	15	3,7	85	00:00:06	00:00:05	00:00:11	00:00:06	120%
GP	Alu kompakt	22,5	5	3,7	85	00:00:03	00:00:18	00:00:11	-00:00:07	-39%
GP	Alu kompakt	22,5	10	3,7	70	00:00:04	00:01:05	00:00:12	-00:00:53	-82%
GP	Alu kompakt	22,5	10	3,7	100	00:00:05	00:01:50	00:00:11	-00:01:39	-90%
GP	Alu kompakt	22,5	10	3,7	85	00:00:04	00:00:05	00:00:08	00:00:03	60%
GP	FE ganz	20	5	3,7	85	00:00:05	00:00:06	00:00:52	00:00:46	767%
GP	FE ganz	20	10	3,7	70	00:00:03	00:00:05	00:00:10	00:00:05	100%
GP	FE ganz	20	10	3,7	100	00:00:03	00:00:11	00:00:12	00:00:01	9%
GP	FE ganz	20	10	3,7	85	00:00:04	00:00:04	00:00:07	00:00:03	74%
GP	FE ganz	20	15	3,7	85	00:00:05	00:00:29	00:00:07	-00:00:22	-76%
GP	FE ganz	22,5	5	3,7	85	00:00:02	00:00:07	00:00:10	00:00:03	43%
GP	FE ganz	22,5	10	3,7	70	00:00:02	00:00:17	00:00:10	-00:00:07	-41%
GP	FE ganz	22,5	10	3,7	100	00:00:02	00:00:06	00:00:08	00:00:02	33%
GP	FE ganz	22,5	10	3,7	85	00:00:02	00:00:06	00:00:17	00:00:11	183%



Abbildung A- 1: Absolute Abweichungen des Mitnehmerbandes in Bezug auf das glatte Band



Abbildung A- 2: Absolute Abweichungen des Inputvolumenstroms zu erzeugter Schwankung