



Lehrstuhl für Abfallverwertungstechnik und Abfallwirtschaft

Masterarbeit



Quantitative Beurteilung der LIDAR-  
Technologie zur volumetrischen  
Stoffstromcharakterisierung von LVP-  
Material

Martina Michaela Schwarzenbacher, BSc

März 2022

## DANKSAGUNG

Mein Dank gilt Herrn assoz.Prof. Dipl.-Min. Dr.rer.nat. Daniel Vollprecht für die Freiheiten bei der Gestaltung vorliegender Arbeit und die stete Bereitschaft zur Diskussion und Beantwortung sämtlicher Fragen. Der Firma STADLER Anlagenbau GmbH möchte ich einerseits für die Finanzierung und Realisierung der Masterarbeit sowie das umfassende zur Verfügung gestellte technische Equipment danken und andererseits für den besonderen STADLER-Spirit, den ich als ein gemeinsames Schaffen, Tüfteln und Unterstützen erfahren durfte. Ich möchte mich auch bei Herrn Torsten Fleischer bedanken, dessen Erfindergeist und tatkräftige Unterstützung im Technikum sehr zum Gelingen der Versuche beigetragen haben. Und ein besonderer Dank gilt Elias Pfund (MS) für die durchgehende Betreuung der Arbeit und seinen kritischen Blick auf Details. Bei Frau Dipl.-Ing. Sabine Schlögl und der Forschungsgruppe des Projekts EsKorte („Entwicklung und Erprobung eines sensorgestützten Stoffstromüberwachungssystems“ im Rahmen des Programms „Produktion der Zukunft“ der Österreichischen Forschungsförderungsgesellschaft (FFG) unter der Projektnummer 877341) bedanke ich mich für die gute Kooperation und wissenschaftliche Betreuung. Zu guter Letzt bedanke ich mich bei Dr.mont. Bastian Küppers, der mich für das Thema der Masterarbeit begeistert hat und mir durchgehend mit Rat und Tat sowie spannenden Ideen zur Seite gestanden ist.





## EIDESSTATTLICHE ERKLÄRUNG

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

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

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

Datum 07.03.2022

A handwritten signature in blue ink, appearing to read 'Martina Schwarzenbacher', written over a horizontal line.

Unterschrift Verfasserin  
Martina, Schwarzenbacher  
Matrikelnummer: m01035309

## Kurzfassung

### Quantitative Beurteilung der LIDAR-Technologie zur volumetrischen Stoffstromcharakterisierung von LVP-Material

Einen wichtigen Schritt in Richtung Kreislaufwirtschaft stellt das Recycling von Verpackungsabfällen dar. Schwankende anfallende Mengen sowie heterogene Schüttdichten stellen Abfallbehandlungsanlagen beim Sortieren nach Materialart vor Herausforderungen. Der Neubau moderner Sortieranlagen sowie die Aufrüstung bestehender Anlagen mit umfassender Sensortechnik sollen dazu beitragen Ausbringung und Reinheit zu steigern und Recyclingpotentiale bei Verpackungsabfällen auszuschöpfen. Eine wesentliche Kennzahl zur Auslegung von Sortieranlagen sowie den darin enthaltenen Aggregaten ist der zu erwartende Materialdurchsatz, welcher die Qualität der Sortierung beeinflusst. Die vorliegende Arbeit setzt sich mit den unterschiedlichen Schüttdichten von Leichtverpackungsabfällen (LVP-Material) zu verschiedenen Zeitpunkten des Abfallbehandlungsprozesses auseinander.

Eine Möglichkeit zur Erfassung des Materialdurchsatzes stellt die Volumenstrommessung mittels LIDAR-Sensortechnologie dar. Ziel der vorliegenden Arbeit ist es, Potentiale und Grenzen drei verschiedener Sensor-Modelle zu untersuchen und entscheidungsorientiert aufzubereiten. Dafür wird im Rahmen von Technikumsversuchen, bei denen die drei Sensoren über einem Fördergurt das Volumen von LVP-Abfällen und Kunststoff-Flakes messen, der Einfluss von Schütthöhe, Bandbelegung, Licht und Feuchtigkeit auf Richtigkeit und Wiederholgenauigkeit des detektierten Volumens untersucht.

Es zeigte sich, dass bei geringer Schütthöhe von 150 mm der Unterschied der Mess-Richtigkeit für die meisten Fraktionen zwischen den verschiedenen Fraktionen größer war als zwischen den verschiedenen Sensoren. Zum Beispiel bestimmten alle drei Sensoren das Volumen für Fraktion PPK um etwa 30% über und für Fraktion PP unter. Bei 550 mm Schütthöhe zeigte sich das Gegenteil, die Ergebnisse eines Sensors wichen für die meisten Fraktionen um 10 – 20 % vom gemessenen Volumen der beiden anderen Sensoren ab, während ansonsten für alle Fraktionen etwa gleich viel Volumen detektiert wurde. Bei 300 mm Schütthöhe detektierten alle drei Sensoren für etwa die Hälfte der Probenfraktionen weniger als +/- 10 % Abweichung zum *Wahren Volumen*. Die Abweichung der restlichen Fraktionen variierte zum Großteil zwischen +/- 20 %. Auch ein Einfluss der Probenfeuchtigkeit auf die Messergebnisse konnte gezeigt werden, alle drei Sensoren detektierten 2 – 10 % weniger Volumen bei Materialfeuchtigkeit.

In Zukunft sollen die gewonnen Erkenntnisse genutzt werden, um geeignete Korrelationsfaktoren zwischen detektiertem und *Wahrem Volumen* zu finden und die Volumenstromdaten aus großtechnischen Versuchen, welche mit zwei der drei Sensor-Modell akquiriert wurden mit bekannten Produktmengen abzugleichen.

## Abstract

### Quantitative Assessment of the LIDAR technology for volumetric material flow characterization of LWP material

The recycling of packaging waste represents an important step towards a circular economy. Fluctuating quantities as well as heterogeneous bulk densities pose challenges for waste treatment plants when sorting by material type. New construction of modern sorting plants as well as upgrading of existing plants with comprehensive sensor technology should help to increase yield and purity and to exploit recycling potentials in packaging waste. An important key figure for the design of sorting plants as well as the aggregates contained therein is the expected material throughput which influences the quality of the sorting. This paper addresses different bulk densities of lightweight packaging waste (LWP) at different points in the waste treatment process.

Volume flow measurement using LIDAR sensor technology represents one possibility for recording material throughput. The aim of the present work is to investigate the potentials and limitations of three different sensor models and to process them in a decision-oriented manner. For this purpose, the influence of bulk height, belt occupancy, light and humidity on the accuracy and repeatability of the detected volume measurements is investigated within the scope of pilot plant tests in which three sensors above a conveyor belt measure the volume of LWP and plastic flakes.

It was found that at low bulk heights of 150 mm, the difference in measurement accuracy was for most fractions larger between the different fractions than between the different sensors. For example, all three sensors detected about 30 % too much volume for the fraction paper-pulp-cardboard and too little for fraction polypropylene. At 550 mm bulk height, the opposite was seen, with the results from one sensor differing from the measured volume of the other two sensors by 10 - 20 % for most fractions, while otherwise detecting about the same volume for all fractions. At 300 mm bulk height, all three sensors detected less than +/- 10 % deviation from the *True Volume* for about half of the sample fractions. The deviation of the remaining fractions varied for the most part between +/- 20 %. An influence of the sample moisture on the measurement results could also be shown, all three sensors detected 2 – 10 % less volume with material moisture.

In the future, the knowledge gained will be used to find suitable correlation factors between detected and true volume and to compare the volume flow data from large-scale tests, which were acquired with two of the three sensor models, with known product quantities.

## Inhaltsverzeichnis

	Seite
<b>1 EINLEITUNG .....</b>	<b>3</b>
1.1 Problemstellung .....	4
1.2 Zielsetzung .....	5
<b>2 GRUNDLAGENTEIL.....</b>	<b>6</b>
2.1 Leichtverpackungsmaterial .....	6
2.2 LVP-Sortieranlagen.....	13
2.2.1 Bunker und Zwischenlager.....	14
2.2.2 Ballenauflöser bzw. Sackaufreißer .....	14
2.2.3 Siebvorrichtung.....	15
2.2.4 Windsichter .....	17
2.2.5 Magnetscheider .....	17
2.2.6 Wirbelstromscheider .....	18
2.2.7 Ballistische Separatoren .....	19
2.2.8 Sensorgestützte, optische Sortierer .....	19
2.2.9 Handsortierung .....	21
2.2.10 Pressen .....	21
2.3 Technologien zur Volumenstrommessung .....	24
2.3.1 Möglichkeiten zur Volumenstrommessung von Feststoffen.....	24
2.3.2 Funktionsweise LIDAR Sensor.....	27
2.3.3 Grenzen und Potentiale, Vor- und Nachteile des LIDAR Sensors .....	29
2.3.4 Einsatzgebiete .....	31
2.4 Großtechnische Anwendungspotentiale für den LIDAR Sensor .....	32
<b>3 MATERIAL UND METHODEN .....</b>	<b>35</b>
3.1 Probenahme in einer LVP-Sortieranlage .....	37
3.2 Probenmaterial.....	41
3.2.1 Eingesetzte Sensoren.....	45
3.3 Versuchsaufbau .....	49
3.4 Versuchsdurchführung.....	52
3.4.1 Bestimmung des „wahren“ Volumens.....	52
3.4.2 Flakes-Referenzversuch .....	55
3.4.3 Schütthöhenversuche .....	57
3.4.4 Bandbelegungsversuche.....	67

3.4.5	Untersuchung des Lichteinflusses.....	69
3.4.6	Wasserversuche .....	72
3.5	Datenauswertung.....	74
3.5.1	Validierung der Volumenstromdaten .....	74
3.5.2	Grundrauschen .....	75
3.5.3	<i>Wahres Volumen und Wahres Wannenvolumen</i> .....	76
3.5.4	Sensorisch gemessenes Volumen .....	77
<b>4</b>	<b>ERGEBNISSE UND DISKUSSION.....</b>	<b>81</b>
4.1.1	Grundrauschen .....	81
4.1.2	Referenzvolumen.....	83
4.1.3	Flakes-Referenzversuche .....	84
4.1.4	Schütthöhenversuche .....	85
4.1.5	Bandbelegungsversuche.....	98
4.1.6	Untersuchung des Lichteinflusses.....	99
4.1.7	Wasserversuche .....	101
<b>5</b>	<b>ZUSAMMENFASSUNG UND AUSBLICK.....</b>	<b>102</b>
<b>6</b>	<b>VERZEICHNISSE .....</b>	<b>104</b>
6.1	Literaturverzeichnis.....	104
6.2	Abkürzungsverzeichnis .....	108
6.3	Tabellen .....	109
6.4	Abbildungen .....	110
<b>ANHANG</b>	<b>.....</b>	<b>I</b>

# 1 Einleitung

Die im Rahmen des Kreislaufwirtschaftspakets der Europäischen Union (EU) bis spätestens 2025 zu erreichenden Recyclingquoten von mindestens 65 Gewichtsprozent (Gew. -%) für im Inland anfallende Verpackungsabfälle, erreichte Österreich bereits im Jahr 2018 (BMK 2021). Neue Berechnungsmethoden und eine genaue Betrachtung der geforderten Quoten je Materialart zeigen jedoch, dass Zielraten von 50 Gew. -% für Verpackungen aus Kunststoffen (KS) realen Recyclingraten von 25 Gew. -% gegenüberstehen. Auch die Recyclingziele für Verpackungen aus Holz wurden mit geschafften 19,9 % im Jahr 2020 und geforderten 25 % im Jahr 2025 bislang noch nicht erreicht (Allesch et al. 2020, S. 4; EK 2019; BMLRT 2014). Pomberger (2021) fasst die derzeitige Sammel- und Recyclingsituation in drei sogenannten Grundsätzen der Recyclingfähigkeit zusammen:

- Was nicht gesammelt wird, kann nicht aussortiert werden,
- Was nicht enthalten ist, kann nicht aussortiert werden und
- Was nicht erkennbar ist, kann nicht aussortiert werden. (Pomberger 2021)

Passend dazu werden drei mögliche Strategien zur Erhöhung der Recyclingquoten vorgeschlagen:

- Allgemeine Steigerung der Abfallsammelquote,
- Steigerung des recyclingfähigen Anteiles in Produkten und
- Verbesserung der Abfallsortierung. (Pomberger 2021)

Neben einer Intensivierung der Bemühungen zur Erfassung sämtlicher Abfälle und einer Förderung der Marktpräsenz Eco-designter Produkte, stellt der Fokus auf Weiterentwicklung und Effizienz von Abfallsortieranlagen einen wesentlichen Schritt in Richtung Kreislaufwirtschaft dar.

Forschung und Industrie sehen großes Potential in sogenannten *Smart Waste Factories*. Durch kontinuierliche Aufrüstung bestehender Anlagen und zeitnahe Bau neuer High-Tech-Sortieranlagen soll die Abfallsortierung verbessert und auf diese Weise ambitionierte Recyclingziele erreicht werden (Altstoff Recycling Austria AG 2019). Dabei sollen durch Digitalisierung von mechanischen Abfallbehandlungsanlagen die Stoffstromerfassung und -steuerung sowie Maschine-zu-Maschine-Kommunikation in Echtzeit ermöglicht und eine dynamische Anlagenüberwachung und -regulierung realisiert werden (Curtis et al. 2021a).

Derzeit wird die Materialflussüberwachung zur Steuerung der Anlagenperformance noch selten genutzt (Curtis et al. 2021b). Materialflussanalysen erfolgen meist entweder nachträglich auf Basis gemessener Input- und Output-Mengen, Änderungen auf das analysierte System sind dann nicht mehr möglich, oder als Vorhersage-Modelle von Stoffströmen zur Planung und Auslegung von Anlagen und Aggregaten. Dafür werden Annahmen über die Materialschüttdichten getroffen und anhand dieser auf Massen- und Volumenströme in einzelnen Sortierschritten rückgerechnet (Kranert 2017; Sarc et al. 2019).

Die möglichst genaue Kenntnis über Massen und Volumina beziehungsweise (bzw.) die sich aus dem Verhältnis der beiden Größen resultierenden Schüttdichten der Stoffströme ist jedoch essenziell für die Funktionsweise einer Anlage (Pomberger 2018). Die Auslegung von Sortieranlagen, wie jene für Leichtverpackungen (LVP), und einige der darin enthaltenen Aggregate erfolgt nach dem zu sortierenden Volumendurchsatz. Die Herausforderung dabei ist, dass aufgrund von Trenn- und Auflockerungsprozessen entlang der gesamten Aufbereitungskette sowie der heterogenen Inputzusammensetzung keine konstanten Schüttdichten für das zu sortierende Material herangezogen werden können. In der Praxis erfolgen die Auslegung von Aggregaten und Anlagen sowie der Anlagenbetrieb selbst Großteils basierend auf individuellen Erfahrungswerten von Anlagenbetreibern und -planern. (Kranert 2017)

Schwankende Materialdurchsätze belasten jedoch zum einen die Anlageninfrastruktur, wie etwa Fördereinrichtungen, zum anderen stellen sie ein großes Hemmnis in der Leistung von Sortieraggregaten dar und führen schließlich zu limitierter Materialausbringung und -qualität. Das wiederum bedeutet ein wirtschaftliches Risiko in einer Branche, in der ohnedies lediglich geringe Gewinnmargen für wenige Zielfractionen erzielt werden können, während der Rest sogar Negativ-Erträge mit sich bringt. (Feil et al. 2017)

Der nachteilige Einfluss von zu hohem Materialdurchsatz und damit einhergehender Überlastung von Aggregaten ist in der Branche grundsätzlich bekannt (Schlögl 2021), einfache Lösungen dieser Herausforderung noch nicht.

## 1.1 Problemstellung

In der Praxis setzen sich die gesammelten Informationen meist aus Wiege-Ergebnissen bei Materialaufgabe und Ballenverbringung sowie Daten kostenintensiver Sortieranalysen zusammen. Das Verwiegen mittels integrierter Band-, Radlader- oder Waagebrücke geht mit einer hohen Ungenauigkeit einher und stellt, ähnlich zu Sortieranalysen, lediglich eine nachträgliche off-line-Analyse dar, sodass kein lenkendes Eingreifen in den Prozess mehr möglich ist. Dadurch können auch Auswirkungen durch Verändern der Betriebseinstellungen an einer Stelle in der Prozesskette nicht direkt in Zusammenhang mit einem vorliegenden Stoffstrom an anderer Stelle gebracht werden, also Änderungen in der Betriebsführung nicht exakt evaluiert werden. Die Performance einzelner Aggregate sowie Reinheit und Ausbringung der Wertstoffe, die wesentlich von einem angepassten Durchsatz abhängen, können nicht in Echtzeit, im Prozess (on-line in-time) beeinflusst oder kontrolliert werden. (Curtis et al. 2021b)

Dabei ist mit *Reinheit* der Quotient von Wertstoff im Output und Gesamtmasse des Outputs gemeint. Die *Ausbringung* kann einerseits Wertstoffausbringung und andererseits Masseausbringung umfassen. *Wertstoffausbringung* beschreibt, wie viel des Wertstoffs, der im Gesamtinput vorhanden ist, in den Output der Wertstofffraktion übergeht. Sie ist der Quotient von Wertstoff im Output und Wertstoff im Input. *Masseausbringung* gibt an, welche Menge an Input-Material in den Wertstoff-Output gelangt, wobei dieser auch andere Stoffe als Wertstoffe enthält. Sie ist das Verhältnis zwischen Gesamtmasse im spezifischen Output-Strom und Gesamtmasse im gesamten Input. (Schlögl 2021)

Im Vergleich zur produzierenden Industrie, die es im Regelfall mit den immer gleichen Stoffen, Quantitäten und konstanten Prozessbedingungen zu tun hat, führen in Abfallbehandlungsanlagen große Heterogenität der anfallenden Abfallströme und ungleichmäßige Durchsätze zu größeren Herausforderungen beim Fahren von Sortieranlagen unter idealen Betriebsbedingungen. Mehrere Möglichkeiten zur Echtzeitmessung von Abfallströmen entlang der Prozesskette stehen in der Praxis zur Verfügung. Bandwaagen, Prallplatten, radiometrische Messungen und Lasertriangulation werden hier beispielgebend aufgezählt. Unterschiedliche Einschränkungen wie Platzbedarf oder Kosten-Nutzen-Faktor limitieren die Perspektiven betreffend Um- und Aufrüsten von Sortieranlagen mit intelligenter Sensortechnologie. Zur effektiven Prozess- und Anlagensteuerung wären Sensoren an unterschiedlichen Stellen entlang des Prozesses notwendig, insbesondere da sich durch verschiedene Trenn- und Auflockerungsverfahren die Schüttdichten der Stoffströme stetig ändern und daher kein direkter Rückschluss von Massenströmen an einer Stelle auf Volumenströme an anderer Stelle oder umgekehrt gezogen werden kann. Der Herausforderung der sich stetig ändernden Schüttdichte und damit verbunden des Volumens wird bisher mit empirischer Expertise begegnet und ist mitunter auch ein Grund, weshalb in der Abfallwirtschaft Mengen vor allem in Tonnen angegeben werden. (Sarc et al. 2019)

Eine Alternative stellt die Volumenstrommessung dar, wobei aufgrund der prozessdynamischen Schüttdichtenänderung des Abfallstromes mehrere Messpunkte innerhalb einer Anlage strategisch günstig gewählt werden müssen.

## 1.2 Zielsetzung

Eine Möglichkeit zur Messung von Volumendurchsätzen in Echtzeit stellt der LIDAR-Sensor (**L**ight **d**etection **a**nd **r**anging oder **L**ight **i**maging, **d**etection **a**nd **r**anging) dar, der mit Laserstrahlentechnologie arbeitet. Vergleichsweise niedrige Investitionskosten, sowie ein geringer Platzbedarf und die Möglichkeit zur nachträglichen Anlagenausrüstung sprechen für den Einsatz des LIDAR-Sensors.

Ziel der vorliegenden Masterarbeit ist, Grenzen und Potenziale des LIDAR-Sensors im Rahmen von Technikumsversuchen zu untersuchen. Mögliche Zusammenhänge zwischen Stoffart, Materialaufgabe, detektiertem Volumen und „wahrem“ Volumen (Referenzvolumen) der Probe sollen erkannt und dargelegt werden. Auf die Problematik prozessdynamischer Schüttdichten soll hinreichend eingegangen und Anwendungspotentiale der LIDAR-Sensor-Technologie in LVP-Sortieranlagen aufgezeigt werden.

## 2 Grundlagenteil

In den folgenden Abschnitten werden erst Jahresaufkommen und Zusammensetzung von Verpackungsabfällen sowie der grundsätzliche Aufbau von LVP-Sortieranlagen erläutert. Anschließend werden in den Kapiteln 2.3 *Technologien zur Volumenstrommessung* und 2.4 *Großtechnische Anwendungspotentiale für den LIDAR Sensor* Ergebnisse themenspezifischer Literaturrecherche präsentiert.

### 2.1 Leichtverpackungsmaterial

*Leichtverpackungen* ist ein Sammelbegriff für Verpackungen aus Kunststoffen, Materialverbunden, Holz, Textilien, Keramiken oder biogenen Packstoffen. Österreichweit fallen jährlich rund 1,4 Mio. t Verpackungsabfälle (getrennt erfasst und in gemischten Fraktionen, wie Restmüll oder Gewerbeabfall) an. Davon entfallen etwa 166.000 t auf LVP, welche im Gelben Sack oder der Gelben Tonne gesammelt werden. (BMK 2021; Bundesministerium für Nachhaltigkeit und Tourismus 2017) Deutschlandweit fallen jährlich rund 18,9 Mio. t Verpackungsabfälle an (Gesellschaft für Verpackungsmarktforschung mbH 2020). Das jährliche Pro-Kopf-Aufkommen beläuft sich damit für Österreicher auf etwa 163 kg und für Deutsche auf etwa 227 kg LVP (Statista 2022). In Tabelle 1 sind die anfallenden Mengen in Österreich und Deutschland für das Jahr 2018 nach Materialart unterteilt dargestellt.

Tabelle 1 - Zusammensetzung des 2018 in Österreich und in Deutschland angefallenen Verpackungsabfalls (BMK 2021; Gesellschaft für Verpackungsmarktforschung mbH 2020)

Packstoff	Menge [t]	
	Österreich	Deutschland
Papier-Pappe-Kartonage (PPK)	590.000	8.339.200
Glas	291.338	2.902.900
Metall	63.758	-
Weißblech	-	510.200
Aluminium	-	133.400
Feinblech, Stahl	-	346.500
Kunststoff	302.000	3.235.800
Holz	109.525	3.365.700
Sonstige	57.000	26.900
<b>Gesamt</b>	<b>1.413.621</b>	<b>18.860.600</b>

Importe von 6.900 t und Exporte von 7.700 t Leichtfraktion aus der Verpackungssammlung (Abfall-Schlüsselnummer (SN) 91207) halten sich in etwa die Waage (Bundesministerium für Nachhaltigkeit und Tourismus 2017).

Wie Tabelle 2 zeigt, gibt es landesweit regionale Unterschiede in der Sammlung von Abfällen, insbesondere von Verpackungsabfällen. Sowohl in Österreich als auch in Deutschland existieren

landesweit unterschiedliche Abfall-Sammelsysteme. Die Abfälle werden dabei im Zuge eines Bring-/Holsystems oder in Altstoffsammelzentren (ASZ) bzw. Wertstoffhöfen gesammelt.

Das Holsystem („Hol“) zeichnet sich dadurch aus, dass die Abfallsammlung durch ein lizenziertes Sammel- und Verwertungsunternehmen direkt am Grundstück oder an der Grundstücksgrenze erfolgt. Beim Bringsystem („Bring“) werden die Abfälle an zentralen Behälterstandplätzen außerhalb des Grundstücks gesammelt, zu denen die haushalteigenen Abfälle individuell hingebacht werden. (Wagner et al. 2018) Eine weitere Möglichkeit zur Entsorgung und Sammlung von Abfällen stellen Altstoffsammelzentren dar.

Tabelle 2 – Unterschiedliche Sammelsysteme in Österreich und Deutschland (Bundesministerium für Nachhaltigkeit und Tourismus 2019; Gesellschaft für Verpackungsmarktforschung mbH 2020; Wagner et al. 2018).

Sammelsystem							
		Österreich			Deutschland		
Fraktion		Bring	Hol	ASZ	Bring	Hol	ASZ
PPK inklusive Verpackungen	(inkl.)	X	X	X	X	X	X
Verpackungsglas		X		X	X		X
Metallverpackungen		X	X	X	X	X	X
Restmüll			X			X	
Alttextilien und Schuhe		X		X	X		X
Sperrmüll				X		X	X
LVP		X	X	X	X	X	X

Für beide Länder gilt, dass die Sammlung von Metallverpackungen prinzipiell meist getrennt erfolgt, mancherorts aber auch gemeinsam mit Altmetall-Kleinteilen oder Kunststoffverpackungen. PPK-Verpackungen und PPK-Nicht-Verpackungen werden gemeinsam gesammelt, je nach regionalen Unterschieden entweder getrennt oder gemeinsam mit LVP. Im Restmüll werden all jene nicht verwertbaren, nicht gefährlichen Haushaltsabfälle gesammelt, die nicht getrennt gesammelt werden. Sperrmüll umfasst Restmüll, der zu sperrig oder schwer ist, um ihn im Restmüllbehälter zu sammeln. Seit 2016 werden auch Getränkeverbundkartons (GVK) im Gelben Sack oder der Gelben Tonne gesammelt. (Bundesministerium für Nachhaltigkeit und Tourismus 2019; Gesellschaft für Verpackungsmarktforschung mbH 2020; Wagner et al. 2018) Darüber hinaus werden noch diverse andere Fraktionen wie Problemstoffe, Biogenes oder Elektroaltgeräte gesammelt, auf deren Sammlung im Zuge dieser Arbeit nicht näher eingegangen wird.

Sammelsysteme, die speziell in Deutschland betrieben werden sind z.B. die getrennte Erfassung von "Flach" (PPK, Folien und expandiertes Polystyrol (EPS)) und "Rund" (Glas und LVP ohne Folien und expandiertes Polystyrol (EPS)), die gemeinsame Erfassung von Kunststoffen und Verbunden ohne Metalle sowie die gemeinsame Sammlung von Verpackungen und stoffgleichen Nicht-Verpackungen (NV bzw. NVP) in der sogenannten „Wertstofftonne“. (Wagner et al. 2018)

Anders als in Österreich gilt in Deutschland außerdem seit 2003 eine umfassende Befandung für Einweggetränkeverpackungen (Deutsche Pfandsystem GmbH 2022), was zu unterschiedlichen Ausgangssituationen bei Planung und Ausgestaltung von LVP-Sortieranlagen, aber auch Sammelstrukturen führt. Beispiele hierfür sind die Materialsammlung mittels Pfandautomaten, sowie die unterschiedliche Anzahl der erforderlichen Aggregate, welche Polyethylenterephthalat-Flaschen (PET-Flaschen) in LVP-Sortieranlagen aussortieren.

Folgende Abbildung 1 zeigt die Zusammensetzung von Verpackungsabfällen in Österreich und Deutschland, dabei sind die Zahlenwerte aus Tabelle 1 zur besseren Vergleichbarkeit graphisch aufbereitet und prozentuell dargestellt. Es ist zu sehen, dass die Zusammensetzung von Verpackungsabfällen trotz der unterschiedlichen Sammelmengen in Österreich und Deutschland sehr ähnlich ist. Die Herausforderungen für LVP-Sortieranlagen sind daher für beide Länder vergleichbar.

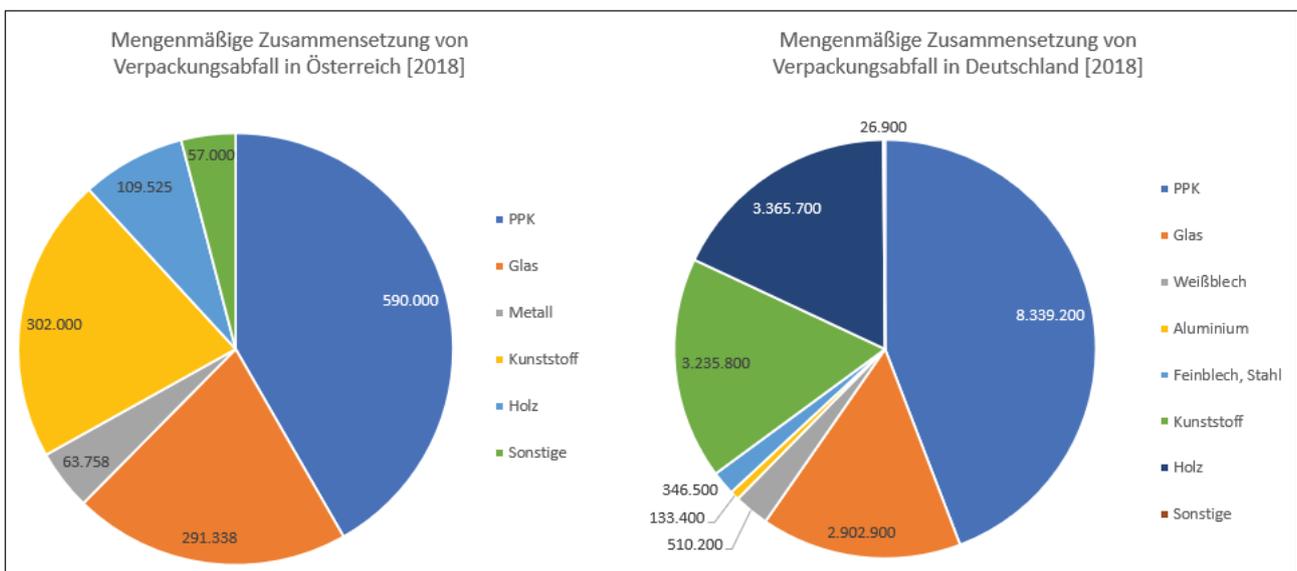


Abbildung 1 - Gegenüberstellung der Zusammensetzung von Verpackungsabfällen in Österreich und Deutschland; erstellt auf Basis von (BMK 2021; Gesellschaft für Verpackungsmarktforschung mbH 2020).

Neben den unterschiedlichen Sammelsystemen wird die Zusammensetzung der zu sortierenden Abfälle auch vom Einzugsgebiet beeinflusst. Dabei gibt es insbesondere Unterschiede zwischen dem urbanen und dem ländlichen Raum. In folgender Abbildung 2 werden Materialzusammensetzungen für unterschiedliche Erfassungssysteme und Einzugsgebiete innerhalb Deutschlands einander gegenübergestellt.

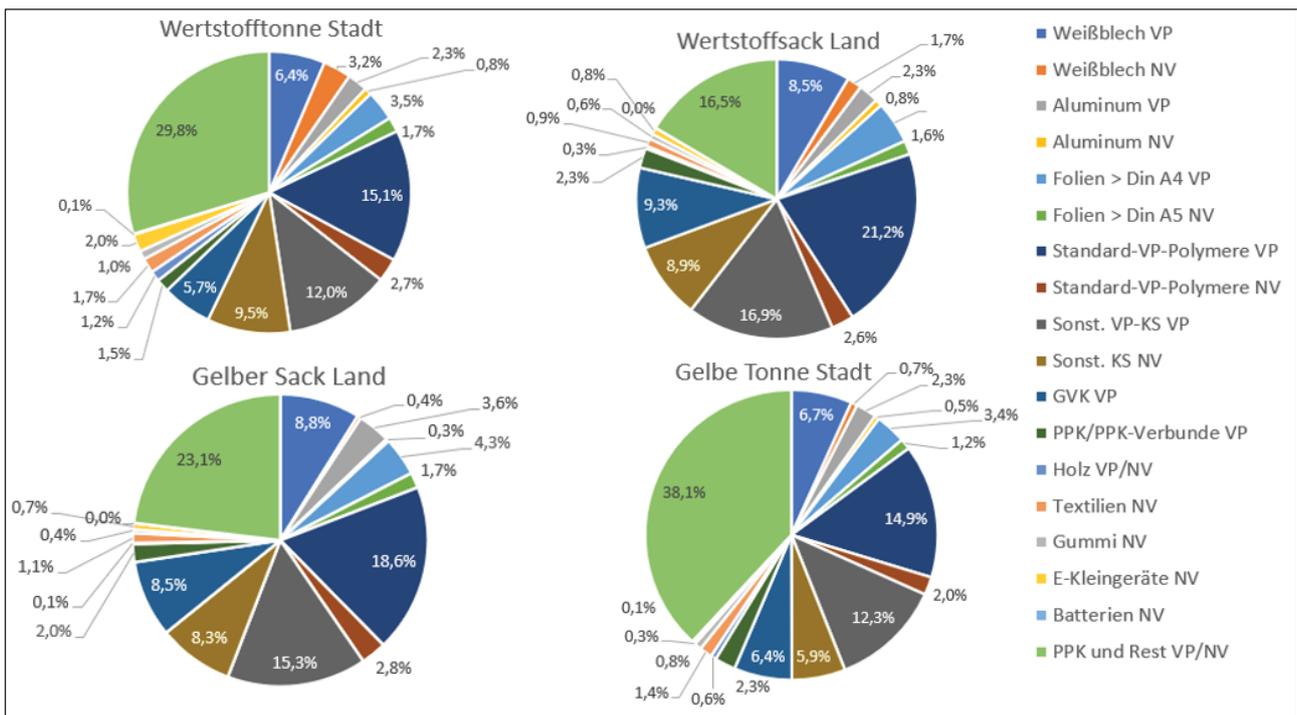


Abbildung 2 - Materialzusammensetzung von Leichtverpackungsabfällen aus unterschiedlichen Sammelsystemen und Einzugsgebieten in Deutschland; erstellt auf Basis von (Wagner et al. 2018).

Der Vergleich der Daten zeigt, dass der Einfluss des jeweiligen Einzugsgebietes auf die Materialzusammensetzung größer ist als das angewandte Sammelsystem. Bei Vergleich von *Wertstoffsack Land* und *Wertstofftonne Stadt* in Abbildung 2 wird ersichtlich, dass im städtischen Bereich etwa doppelt so viel *Weißblech NV* gesammelt wird als im ländlichen Bereich. Am Land fallen insgesamt mehr VP-Kunststoffe an, während der Anteil von NV-Kunststoffen dem städtischen gleicht. Auch der Anteil an *FKN* (GVK) und *PPK bzw. PPK-Verbunden VP* ist im Wertstoffsack am Land höher als in der Wertstofftonne in der Stadt. Bei Vergleich von *Gelber Sack Land* und *Gelbe Tonne Stadt* fällt auf, dass die Anteile beinahe sämtlicher getrennt gesammelter Fraktionen im ländlichen Bereich höher als jene in der Stadt sind und dies hauptsächlich durch Fraktion *PPK und Rest VP/NV* ausgeglichen wird.

Sortieranlagenbetreiber beziehen aus diversen Gründen (Prinzip der Nähe, Praktikabilität, Auslastung, Wirtschaftlichkeit, etc.) Verpackungsabfälle aus Einzugsgebieten mit unterschiedlichen Sammelsystemen und Materialzusammensetzung und kommen daher nicht umhin in gewissen Maßen den Anlagenbetrieb laufend an das Inputmaterial anzupassen (z.B. weniger Durchsatz bei feuchtem Material). Wie sehr eine heterogene Materialzusammensetzung die handzuhabenden Inputmassen und -volumina beeinflussen, soll nachfolgend hinlänglich dargestellt werden.

In Tabelle 3 werden unterschiedliche Material- und Schüttdichten der Abfallfraktionen und deren Rohfraktionen angeführt. Zusätzlich wird der Platzbedarf pro Tonne angegeben. Dabei zu sehen ist, dass der Pressvorgang Schüttdichten und Platzbedarf stark verändern (z.B. 0,03 t/m<sup>3</sup> Schüttdichte und 33,3 m<sup>3</sup> Platzbedarf für nicht gepresste Verpackungs-KS gegenüber 0,35 t/m<sup>3</sup> Schüttdichte und 2,86 m<sup>3</sup> Platzbedarf für gepresste Verpackungs-KS).

Die Schüttdichte beschreibt dabei die Masse pro Volumen eines Feststoffgemenges inklusive dem Fluid – meist Luft - in den Hohlräumen zwischen den Feststoffpartikeln, sie ist abhängig von der Partikelrohichte, Partikelform, Stoffzusammensetzung und Lagerform. (MOLLET Füllstandtechnik GmbH 2019) Im Gegensatz dazu beschreibt die Materialdichte die Masse pro Volumen eines Materialpartikels (Ignatowitz 2011). Hochgestellte Zahlen in Klammern nach der Materialfraktion und vor den Quellenangaben zeigen an, welche Daten welchen Literaturquellen entstammen (vgl. letzte Zeile in Tabelle 3).

Tabelle 3 - Material- und Schüttdichten unterschiedlicher Fraktionen in Tonne pro Kubikmeter ( $t/m^3$ ), sowie deren Platzbedarf in  $m^3/t$  Material (Statistisches Landesamt Baden-Württemberg 2018; VÖEB 2022; Rauch 2020; Wellacher et al.; MOLLET Füllstandtechnik GmbH 2019; HUG 2022)

<b>Abfall</b>	<b>Schüttdichte [<math>t/m^3</math>]</b>	<b>Platzbedarf [<math>m^3/t</math>]</b>
PPK <sup>(1)</sup>	0,200	5,00
PPK <sup>(2)</sup>	0,050	20,0
Glas <sup>(1)</sup>	0,400	2,50
Glas <sup>(2)</sup>	0,300	3,33
Altmittel lose Schüttung <sup>(1)</sup>	0,100	10,0
Altmittel gepresst <sup>(1)</sup>	0,250	4,00
Aluminium lose Schüttung <sup>(1)</sup>	0,040	25,0
Verpackungsmetalle <sup>(2)</sup>	0,054	18,5
Kunststoffe (ohne Styropor) <sup>(1)</sup>	0,030	33,3
Kunststoffe (ohne Styropor) gepresst <sup>(1)</sup>	0,350	2,86
KS aus Verpackungssammlung <sup>(4)</sup>	0,050-0,150	6,67-20,0
LVP <sup>(2)</sup>	0,030	33,3
LVP <sup>(3)</sup>	0,100	10
Styropor <sup>(1)</sup>	0,005	200
Styropor <sup>(2)</sup>	0,005	200
Kork <sup>(1)</sup>	0,120-0,200	5,00-8,33
Holz <sup>(1)</sup>	0,200-0,480	2,08-5,00
Textilien, Bekleidung <sup>(1)</sup>	0,400	2,50
<b>Rohmaterial</b>	<b>Schüttdichte [<math>t/m^3</math>]</b>	<b>Platzbedarf [<math>m^3/t</math>]</b>
PET-Flakes <sup>(5)</sup>	0,30-0,50	2,00-3,33
PET-Granulat <sup>(5)</sup>	0,85	1,18
Polyethylen- (PE) Granulat <sup>(5)</sup>	0,50	2,00
Polypropylen- (PP) Granulat <sup>(5)</sup>	0,50	2,00
Polystyrol- (PS) Granulat <sup>(5)</sup>	0,60	1,67
Polyvinylchlorid- (PVC) Granulat <sup>(5)</sup>	0,50-0,60	1,67-2,00
<b>Rohmaterial</b>	<b>Rohdichte [<math>t/m^3</math>]</b>	<b>Platzbedarf [<math>m^3/t</math>]</b>
PE <sup>(6)</sup>	0,95	1,05
PP <sup>(6)</sup>	0,91	1,10
PVC <sup>(6)</sup>	1,36	0,74

Quellen: <sup>(1)</sup>Statistisches Landesamt Baden-Württemberg 2018, <sup>(2)</sup>VÖEB (2022), <sup>(3)</sup>Rauch (2020), <sup>(4)</sup>Wellacher et al., <sup>(5)</sup>MOLLET Füllstandtechnik GmbH (2019), <sup>(6)</sup>HUG (2022)

Die Angaben in Tabelle 3 verdeutlichen, dass sich weder Material- noch Schüttdichte materialspezifischer Granulate oder Flakes eignen, um reale Schüttdichten von Abfällen zu beschreiben. Sie weichen deutlich von den Umrechnungsfaktoren für Abfälle, empfohlen vom Statistischen Landesamt Baden-Württemberg<sup>(1)</sup> und vom Verband Österreichischer Entsorgungsbetriebe<sup>(2)</sup> sowie einschlägigen Abfallwirtschaftsexperten (Rauch<sup>(3)</sup> und Wellacher et al.

(4) ab. Dass auch hier teils deutliche Unterschiede bestehen, ist der Inhomogenität des Abfalls geschuldet. Folgende Abbildung 3 veranschaulicht die „Volumenproblematik“ als Herausforderung, der alle Akteure in der Abfallwirtschaft gegenüberstehen, wenn es darum geht Gewicht und Platzbedarf bestimmter Abfallmengen zu kalkulieren oder unbestimmter Abfallmengen abzuschätzen.

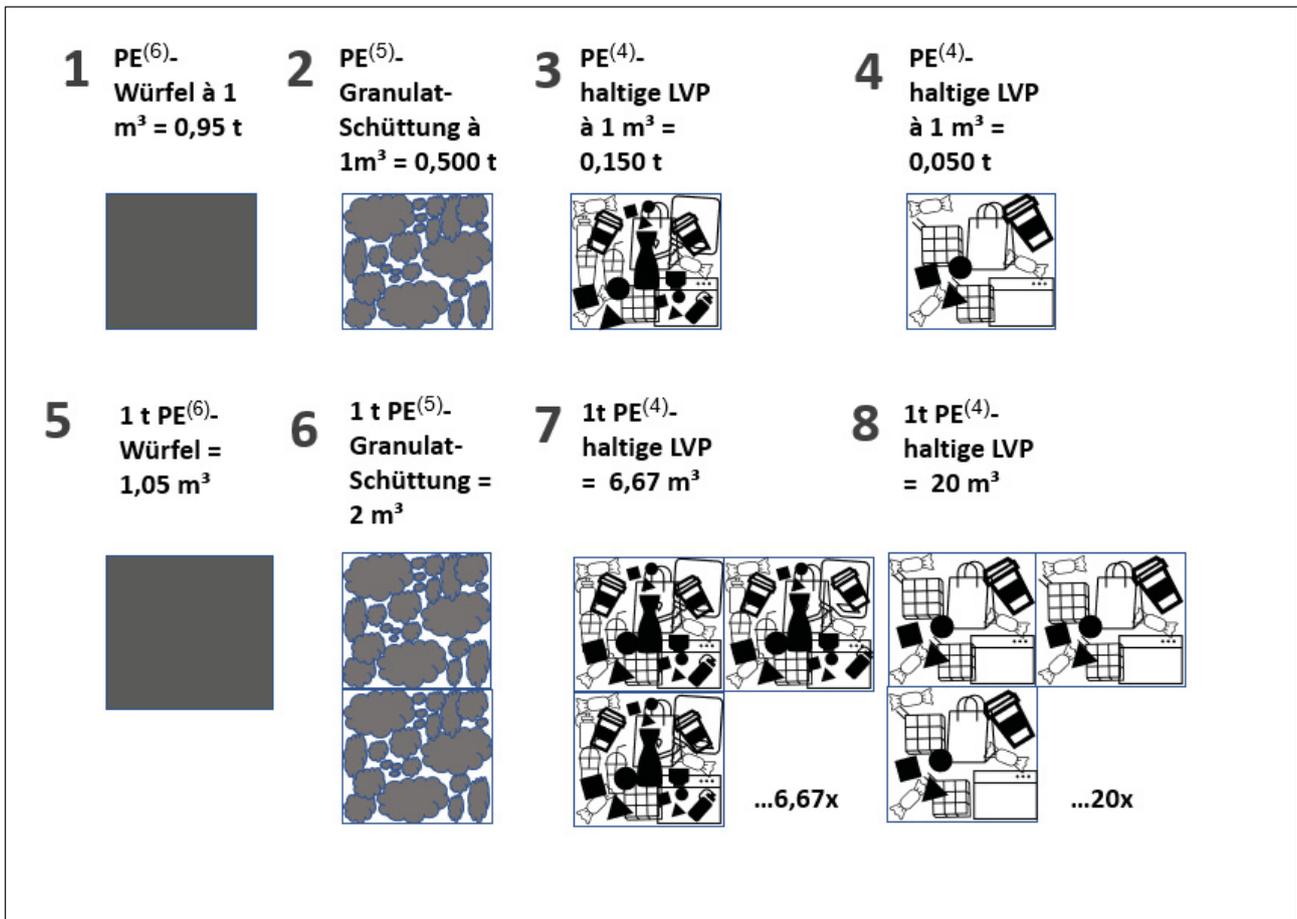


Abbildung 3 - Gegenüberstellung unterschiedlicher PE-Mengen und Volumina zur Verdeutlichung der "Volumenproblematik"; erstellt auf Basis von (Statistisches Landesamt Baden-Württemberg 2018; VÖEB 2022; Rauch 2020; Wellacher et al.; MOLLET Füllstandtechnik GmbH 2019; HUG 2022).

Die Abbildung zeigt, dass das Gewicht eines Kubikmeters PE von einem Kubikmeter PE-haltigen LVP-Materials um beinahe das Zweifache variieren kann (Vgl. Abbildung 3: 1 & 4). Auch wird dargestellt, dass eine Tonne PE nur wenig mehr als einen Kubikmeter Raum einnimmt, während eine Tonne PE-haltigen LVP-Materials 20-mal mehr Platzbedarf haben kann (Vgl. Abbildung 3: 5, 7 & 8).

## 2.2 LVP-Sortieranlagen

2019 waren in Österreich 15 Anlagen zur Sortierung und Aufbereitung von Kunststoffabfällen bzw. kunststoffreichen Abfällen mit einer Gesamtkapazität von insgesamt etwa 273.000 Jahrestonnen

(t/a) und einer Auslastung von rund 197.550 t/a in Betrieb. Wie aus folgender Tabelle 4 hervorgeht, stellte *getrennt erfasste Leichtfraktion aus der Verpackungssammlung* (Schlüsselnummer (SN) 92107) den Hauptinputstrom dar, wobei Differenzen zwischen In- und Output-Mengen auf Lageraufbau bzw. -abbau zurückzuführen sind (BMK 2021).

Tabelle 4 - *Wesentliche Input- und Outputströme bei Kunststoffsortieranlagen 2019* (BMK 2021).

SN	Abfallbezeichnung	Input 2019 [t]	Output 2019 [t]
91207	Leichtfraktion aus der Verpackungssammlung	129.898	78.797
57118	Kunststoffemballagen und -behältnisse	18.095	25.823
91201	Verpackungsmaterial und Kartonagen	17.301	18.189
91107	Heizwertreiche Fraktion aus aufbereiteten Siedlungs- und Gewerbeabfällen und aufbereiteten Baustellenabfällen	9.426	503
57119	Kunststofffolien	8.112	16.956
57116	PVC-Abfälle und Schäume auf PVC-Basis	4.555	2.938
57129	Sonstige ausgehärtete Kunststoffabfälle, Videokassetten, Magnetbänder, Tonbänder, Farbbänder (Varbonbänder), Toner cartridges ohne gefährliche Inhaltsstoffe	2.747	1.824
	Weitere SN	7.416	32.700
	<b>Gesamt</b>	<b>197.550</b>	<b>177.730</b>

Allgemein kann der Output-Strom von Sortieranlagen in Zielfractionen und Restfractionen unterschieden werden, wobei Zielfractionen einer stofflichen Verwertung (= Recycling) zugeführt werden und hier etwa ein Drittel des Gesamtoutputs ausmachen. Typische Zielfractionen sind *PET Bunt, PET Natur, PET Blau, PET Grün, PE, High Density Polyethylen (HDPE), Low Density Polyethylen (LDPE), PVC, GVK, PS, PP, Nicht-Eisen Metalle (NE) und Eisenmetalle (FE)*. Typische Restfractionen sind Mischkunststoffe mit einem geringen Anteil an Störstoffen, die meist nach einem weiteren Aufbereitungsschritt einer thermischen Verwertung zugeführt werden. (BMK 2021)

Typische Elemente einer Sortieranlage für LVP-Material sind neben einer meist umfangreichen Fördertechnik:

- Bunker und Zwischenlager,
- Ballenauflöser bzw. Sackaufreißer zur Vereinzelung des Materials,

- Siebvorrichtungen zur Klassierung,
- Windsichter zur Abtrennung von Leichtgut,
- Magnetscheider zur FE-Abtrennung,
- Wirbelstromscheider zur NE-Abtrennung,
- Ballistische Separatoren zur Trennung von rollendem und nicht rollendem Material bzw. zweidimensional (2D)- und dreidimensionalem (3D) Material,
- Sensorgestützte, optische Sortierer zur Trennung nach Stoffart und Farbe,
- Handsortierplätze zur Erhöhung von Output-Qualitäten und
- Pressen zum Kompaktieren von Output-Fraktionen. (BMK 2021; Schlögl 2021)

Im Folgenden wird auf die Elemente einer Sortieranlage überblicksmäßig eingegangen und Ausführung sowie Funktionsweise häufig eingesetzter Aggregate beschrieben:

### **2.2.1 Bunker und Zwischenlager**

Die Anlieferung von Input-Material erfolgt in der Regel per Lastkraftwagen (LKW). In Sortieranlagen werden die Abfälle, die entweder lose, zu Ballen verpresst oder in Säcken (z.B. Gelber Sack) vorliegen, auf Brückenwaagen gewogen, entladen und in Bunkern, Big-Bags oder Containern bis zum eigentlichen Sortierprozess zwischengelagert (Neubauer et al. 2020).

### **2.2.2 Ballenauflöser bzw. Sackaufreißer**

Ballenauflöser, auch Sackaufreißer oder Sacköffner genannt, dienen zu Beginn der Prozesskette der Vereinzelung des angelieferten Materials und übernehmen gleichzeitig die Funktion der Vergleichmäßigung und Dosierung, um schwall-artige Materialzuführung in nachgeschalteten Prozessen zu vermeiden (Neubauer et al. 2021).

Eingesetzt werden können z.B. langsam laufende Rotorscheren. Sie öffnen Säcke bzw. Ballen und führen ohne wesentliche Zerkleinerung des Aufgabeguts zu Materialaufschluss. Sackaufreißer zeichnen sich durch hohe Durchsätze (10 - 60 t/h) und Robustheit gegenüber Störstoffen wie Steinen und Metallen aus. (Vecoplan AG 2018)

Abbildung 4 dient der Veranschaulichung der Materialaufgabe und Funktionsweise eines Sackaufreißers.



Abbildung 4 - Beispielbild eines Sackaufreißers (Vecoplan AG 2018).

### 2.2.3 Siebvorrichtung

Ziele der Siebklassierung in LVP-Sortieranlagen sind:

- Eine Ausschleusung von Kornklassen, in denen bestimmte Stoffgruppen angereichert vorliegen, wie z.B. Kunststofffolien > 220 Millimeter (mm),
- Eine Ausschleusung von groben Störstoffen, die zu Schäden an den Werkzeugen der Aggregate oder Fördereinrichtungen führen,
- Eine Ausschleusung von sehr feinen Partikeln, die sich negativ auf Sicht- und Sortierprozesse oder Werkzeuge auswirken können und
- Eine Aufteilung des Materialstroms nach Korngrößen (KG), um größere Trennerfolge bei nachfolgenden Sortierverfahren zu erreichen. (Kranert 2017)

Verschiedene Siebaggregate wie Trommelsiebe, Linear- und Kreisschwingsiebe, Spannwellensiebe oder Bewegte Roste kommen hierfür in Frage (Kranert 2017). Nachfolgend werden Aufbau und Funktionsweise des Trommelsiebes beschrieben, da es ein gängiges Siebaggregat in LVP-Sortieranlagen ist (Möllnitz et al. 2021):

Trommelsiebe eignen sich zur Klassierung von Abfallgemischen, welche großflächige Bestandteile enthalten und zur Abtrennung feiner Korngrößen, die eine starke Auflockerung des Aufgabematerials benötigen. Trommelsiebe setzen sich aus einem zylindrischen Siebmantel, der auf Laufrädern gelagert und über diese angetrieben wird, zusammen. Der Materialtransport durch die Trommel erfolgt aufgrund der geneigten Ausführung der Siebtrommel ( $4^\circ$  bis  $6^\circ$ ). Zu sortierendes Material wird durch Reib- und Zentrifugalkräfte an der Wandung bis in eine gewisse Höhe nach oben mitgenommen, bevor es hinabgleitet und Partikel kleiner der Sieblochung ausgeschleust werden (Siebdurchgang), während Material größer der maximalen Siebmaschenweite am Ende der

Siebtrommel als Siebüberlauf anfällt. Bei Anwendung von Siebbelägen mit progressiver Lochung können mehr als zwei Kornklassen generiert werden (siehe Abbildung 6) (Kranert 2017).

In Abbildung 5 wird der Aufbau von Trommelsieben veranschaulicht.

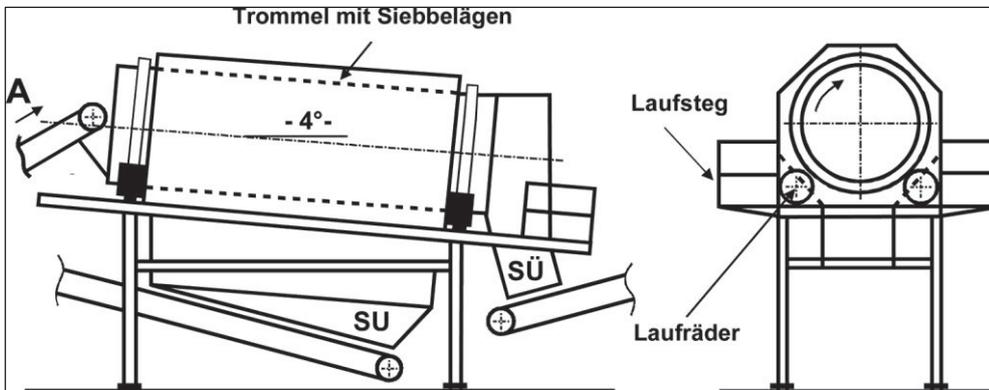


Abbildung 5 – Seitenansicht: Nach Materialaufgabe (A) erfolgt die Sortierung von Materialien nach KG in Siebunterlauf (SU) und Siebüberlauf (SÜ). Vorderansicht: Auf Laufstegen gelagerter Trommelkörper und Laufstege für Umrüstungs- und Wartungsarbeiten.

Abbildung 6 verdeutlicht die Ausführung und Funktionsweise von Trommelsieben mit progressiver Lochung zur Sortierung in drei KG.

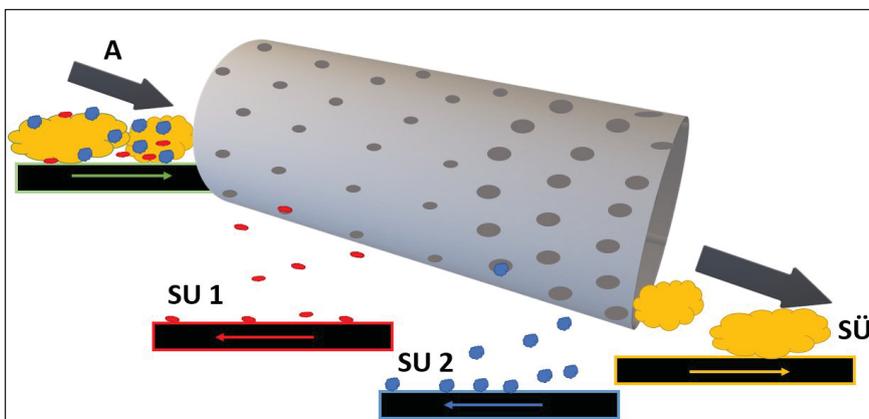


Abbildung 6 - Veranschaulichung der Funktionsweise eines Trommelsiebes mit progressiver Lochung: zu klassierendes Material wird aufgegeben (A) und in die unterschiedlichen Kornklassen Siebunterlauf 1 (SU 1), Siebunterlauf 2 (SU 2) und Siebüberlauf (SÜ) getrennt; erstellt auf Basis von (Kranert 2017).

## 2.2.4 Windsichter

Die Anwendung von Windsichtern eignet sich speziell zur Trennung trockener Abfälle mit einem deutlichen Anteil an flächigen Objekten, die sich insbesondere durch ihre geringe Dichte und Kornform vom restlichen Material unterscheiden. Das Verhältnis von oberer zu unterer KG sollte dabei nicht größer drei betragen, um gute Trennerfolge zu erzielen, was durch vorhergehende Siebung erreicht werden kann. (Kranert 2017)

Das Funktionsprinzip von Windsichtern ist in Abbildung 7 dargestellt.

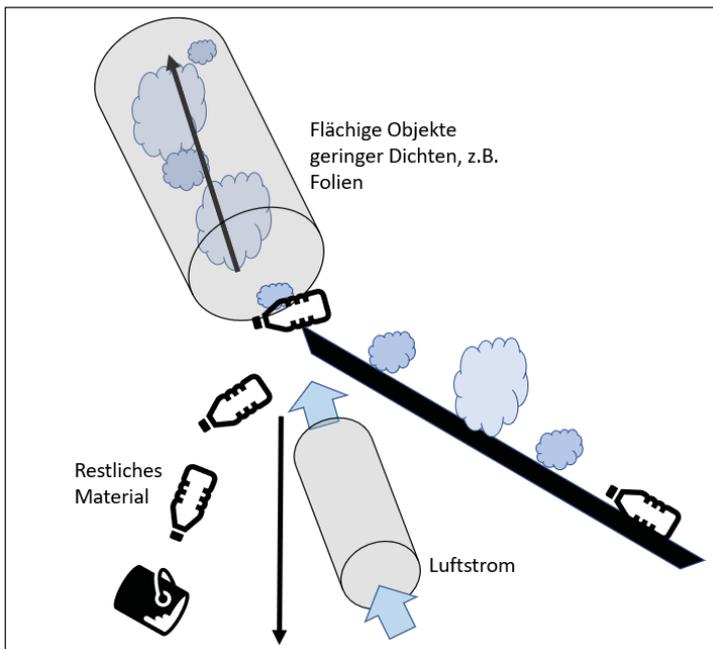


Abbildung 7 - Funktionsprinzip eines Windsichters; erstellt auf Basis von (Kranert 2017).

Über einen schnelllaufenden Gurtförderer wird das zu sichtende Material vereinzelt. Am Ende der Gurtförderstrecke lenkt ein Luftstrom die Flugbahn von flächigem Material mit geringer Schüttdichte ab, während die restlichen Materialien nach unten fallen. Gängige Windsichter in LVP-Sortieranlagen sind Querstromsichter. (Kranert 2017)

## 2.2.5 Magnetscheider

Mit sogenannten Magnetscheidern können Eisenbestandteile vom restlichen Materialstrom abgetrennt werden. Mögliche Ausführungen sind Walzen, Trommel- und Überbandmagnete, wobei letztere in Abfallsortieranlagen die gängigsten sind und daher im Folgenden anhand Abbildung 8 detaillierter erläutert werden. (Bilitewski und Härdtle 2013)

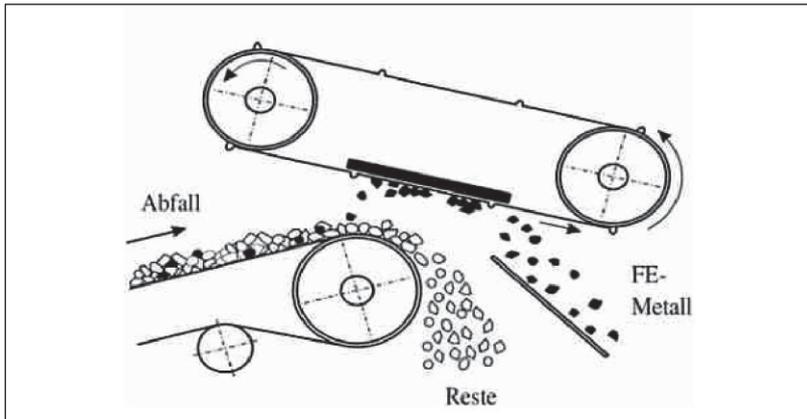


Abbildung 8 – Überbandmagnet zur Abtrennung von FE-Metallen aus Materialströmen (Bilitewski und Härdtle 2013).

Oberhalb des Fördergürtes, der das zu trennende Material transportiert, ist ein starker Permanent- bzw. Elektromagnet angebracht, der eisenhaltige Bestandteile aus dem Abfallstrom hebt und an eine separate Materialübergabestelle transportiert. Voraussetzung für einen guten Trennerfolg ist eine entsprechende Materialvereinzelnung, die durch ein Beschleunigungsband erzielt werden kann. Magnetabscheider werden in der Regel relativ am Anfang von Sortierprozessen eingesetzt, um Schäden und Verschleiß an Fördermitteln, Werkzeug und Aggregaten durch spröde oder spitzkantige Metallteile zu vermeiden. (Bilitewski und Härdtle 2013)

## 2.2.6 Wirbelstromscheider

Wirbelstromscheider dienen einer Abtrennung von Nichteisen-Metallen, Aufbau und Funktionsweise werden anhand Abbildung 9 erläutert.

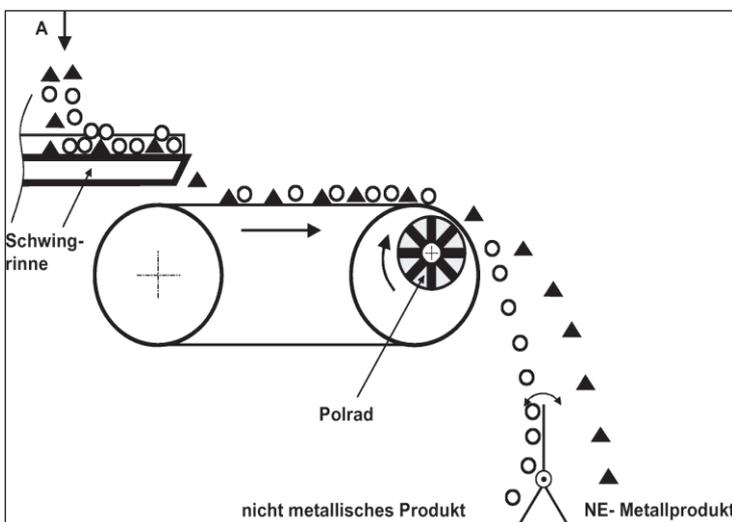


Abbildung 9 - Wirbelstromscheider zur Abtrennung von NE-Metallen (Kranert 2017).

Über eine Schwingrinne wird das zu trennende Material vereinzelt dem Wirbelstromscheider, dessen wesentlichster Bestandteil ein umlaufendes Magnetpolrad ist, zugeführt. Das Magnetfeld des

Polrades führt zur Wirbelstrombildung in elektrisch leitenden Objekten des Materialstroms, den Nichteisen-Metallen. Deren Magnetfeld ist jenem des Polrades entgegengerichtet, was zur Abstoßung der metallischen Objekte und einer Auslenkung ihrer ursprünglichen Wurfparabel führt, während nicht metallische Materialien der ursprünglichen Wurfparabel folgen. (Thome-Kozmiensky, Karl, J 1992)

### 2.2.7 Ballistische Separatoren

Ballistikseparatorn können eingesetzt werden, um einen Materialstrom in zwei, optional drei Fraktionen zu trennen. Anhand verschiedener Materialeigenschaften wie Gewicht, Korngröße, Kornform und Materialdichte wird in rollende Materialien wie Dosen, Becher, Flaschen, Steine und ähnliches (u.ä.) und nicht rollende Materialien wie Folien, PPK, GVK, Textilien u.ä. separiert. Die rollenden Materialien werden auch als Schwer- oder 3D-Fraktion, die nicht rollenden Materialien als Leicht- oder 2D-Fraktion bezeichnet (Abbildung 10). Je nach eingesetzten Paddeln, kann zusätzlich eine Abtrennung des Feinkornanteils vorgenommen werden. (Möllnitz et al. 2021)

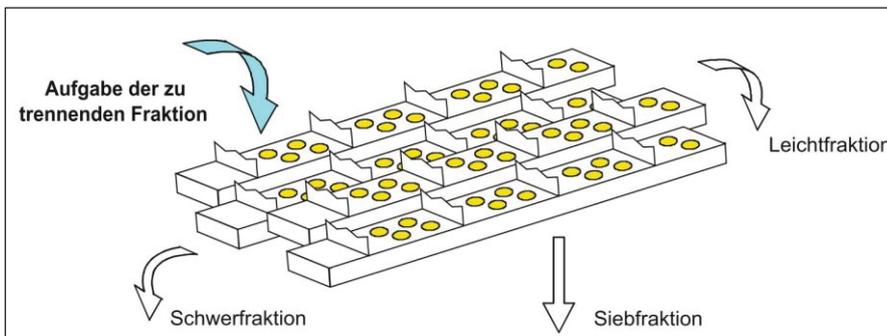


Abbildung 10 - Veranschaulichung des Trennprinzips eines Ballistikseparators (Bilitewski und Härdtle 2013, 501).

Die Materialaufgabe erfolgt von oben auf die sich oszillierend und zueinander versetzt bewegenden Paddeln. Aufgrund des Neigungswinkels von üblicherweise 15 - 20° werden schwere, steife und rollende Materialien nach unten befördert und bilden die Schwerfraktion, während leichte, flache und weiche Materialien in entgegengesetzte Richtung bewegen und die Leichtfraktion bilden. Im Falle einer perforierten Paddelausführung wird zusätzlich eine Feinkornfraktion gewonnen. (Bilitewski und Härdtle 2013)

### 2.2.8 Sensorgestützte, optische Sortierer

Die sensorgestützte Sortierung zählt zu den Einzelkorn-Sortiermethoden. Material wird anhand berührungslos sensorisch messbarer Trennmerkmale wie Form, Farbe, Materialzusammensetzung o. ä. sortiert. In Abfallsortieranlagen gängige Sensoren sind Nahinfrarot- (NIR) Sensoren zur selektiven Ausschleusung organischer Stoffe und Sensoren im sichtbaren Lichtspektrum insbesondere zur Sortierung nach Farbe. (Kranert 2017)

Anhand folgender Abbildung 11 werden Aufbau und Funktionsweise sensorgestützter Sortierer erläutert.

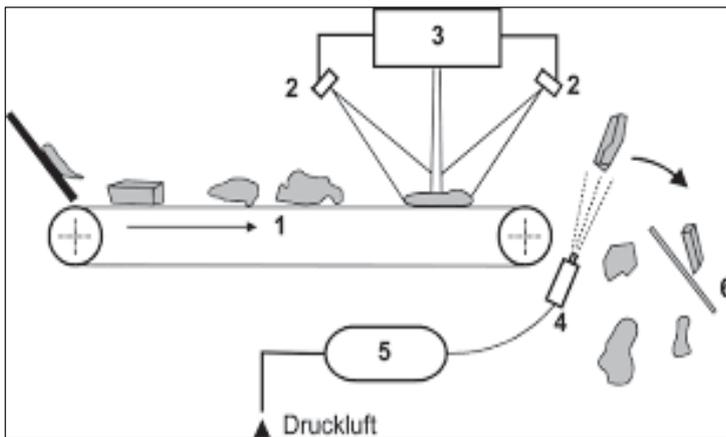


Abbildung 11 - Veranschaulichung von Aufbau und Funktionsweise eines Bandsortierers (Kranert 2017).

Die Materialzuführung erfolgt über einen schnelllaufenden Gleitgurt, sodass die zu sortierenden Partikel vereinzelt in den Detektionsbereich transportiert werden (1). Abbildung 11 zeigt ein Sensorsystem mit Detektion von oben als Reflexionsmessung (3) in Verbindung mit einer Ausleuchtung des Detektionsbereiches (2). Die Sensoreinheit besteht aus einem Emitter und einem Detektor. Der Emitter sendet elektromagnetische Strahlung in den Detektionsbereich, wo sie von den zu untersuchenden Einzelobjekten selektiv beeinflusst wird und anschließend auf den Detektor trifft. Nach augenblicklicher Auswertung materialspezifischer Eigenschaften der Einzelobjekte kann eine Ausschleusung von Störstoffen (Negativsortierung) oder Wertstoffen (Positivsortierung) erfolgen, indem mit Druckluftstößen (5) aus einer Düsenleiste am Ende des Fördergurtes (4) die entsprechenden Partikel aus ihrer ursprünglichen Flugbahn umgelenkt werden (6). (Kranert 2017, S. 240–244; Pretz und Julius 2008)

Sensoren im sichtbaren Lichtspektrum (400 bis 700 Nanometer (nm) Wellenlänge) dienen vor allem der Sortierung nach Farbe, z.B. PET klar, PET grün, PET blau. NIR-Sensoren, die das nicht sichtbare Nahinfrarot-Licht (770 bis 2000 nm Wellenlänge) nutzen, werden vor allem zur Materialerkennung eingesetzt, z.B. PPK, Holz, Textilien, GVK, Kunststoffe, et cetera (etc.). (Kranert 2017; Pretz und Julius 2008)

## 2.2.9 Handsortierung

Eine andere Methode der Einzelkornsortierung ist die Handsortierung, bei der Sortierpersonal von einem langsam laufenden Gurtförderer (circa (ca.) 0,1 - 0,2 m/s Bandgeschwindigkeit) gezielt Einzelobjekte aus dem Materialstrom entnimmt und in Abwurfschächte befördert. Ziele der Nachreinigung durch Handsortierung sind unter anderem (u.a.):

- Erhöhung der Sortierquote,
- Erhöhung der Reinheiten von Produktfraktionen,
- Qualitätssicherung und
- Materialanalysen (z.B. Inputanalyse). (Schlögl 2021)

Der Trennerfolg hängt vom Grad der Unterscheidungsmöglichkeiten zwischen Störstoff und Zielfraktion, der Überschaubarkeit und Vereinzelnung des Materialstroms sowie der Kompetenz des Sortierpersonals ab. Mit etwa 1500-1800 Handgriffen pro Stunde und Person können durch manuelle Klaubung je nach Stoffgewicht 7,5 - 300 kg/h Material-Ausbringung erreicht werden (Schlögl 2021; Thome-Kozmiensky, Karl, J 1992).

## 2.2.10 Pressen

Ballenpressen werden zur Verdichtung des Materials eingesetzt, um einerseits eine bessere Handhabung des Schüttguts zu erzielen und andererseits, um Materialtransporte möglichst wirtschaftlich zu gestalten, indem das maximale Ladegewicht ausgenutzt wird. Mithilfe von Ballenpressen können für Abfälle aus der Verpackungssammlung Materialdichten von ursprünglich 50-150 kg/m<sup>3</sup> auf 300-600 kg/m<sup>3</sup> erhöht werden. (Wellacher et al.)

Die Beschickung der Ballenpresse erfolgt pneumatisch, über einen Abwurfschacht oder ein Förderband. Anschließend wird das Material hydraulisch mit hohem Druck wiederholt gepresst, bis eine bestimmte Ballenlänge erreicht ist. Die Ballen werden vollautomatisch verschnürt und ausgestoßen. (Thome-Kozmiensky, Karl, J 1992)

Die folgende Abbildung 12 zeigt ein mögliches Verfahrensfliessbild einer LVP-Sortieranlage, in der die oben beschriebenen Aggregate miteinander kombiniert eingesetzt werden.

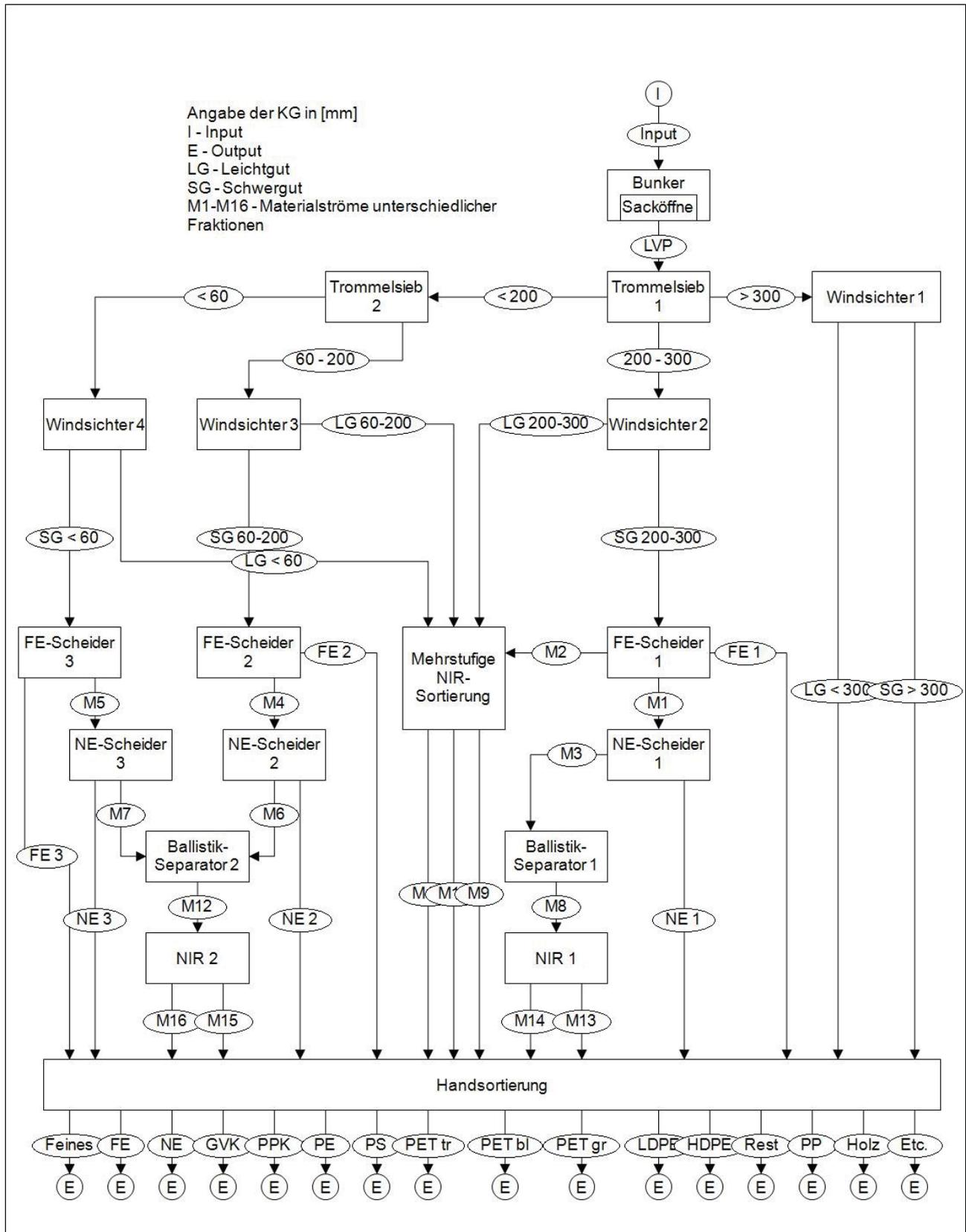


Abbildung 12 - Schema eines möglichen Verfahrensbildes zur Sortierung von LVP-Material; erstellt auf Basis von (Bilitewski und Härdtle 2013; Thome-Kozmiensky, Karl, J 1992; Wagner et al. 2018).

KG-Angaben, Auswahl sowie Anordnung der Aggregate und die verschiedenen Materialströme in Abbildung 12 sind beispielgebend angeführt und in der Praxis an vorliegenden Input, gewünschte Zielfraktionen, geforderte Output-Qualitäten, etc. anzupassen. Im Fließbild in Abbildung 12 sind neben NIR-Sensoren keine weiteren sensorbasierten Sortierer (SBS) oder Messtechnologien, z.B. zur Volumenstrommessung dargestellt. In modernen Sortieranlagen ist der Einsatz von 15 - 20 NIR-Sortierern State-of-the-Art, da in Österreich viele Sortieranlagen einen sehr geringen Automatisierungsgrad aufweisen, liegt hierin großes Potential für Modernisierung. (Schlögl 2021)

Neben der Etablierung mehrstufig gestalteter Sortierprozesse verbessern Entwicklungen im Bereich sensorgestützter Abfalltrennung das Wertstoffausbringen und die Reinheit des Outputs erheblich. Wichtig für den Wirkungsgrad von Sortierprozessen ist außerdem eine stabile Materialzuführung. Hier kommt der Siebstufe eine tragende Rolle zu. Wie in Kapitel 2.2.3 angeführt, hat sie unterschiedliche Funktionen und dient der „Vorkonditionierung“ des Inputmaterials, insbesondere der größeren Siebrückstände. Das setzt eine geeignete Beschickung der Siebmaschine voraus. Für Trommelsiebe beispielsweise sollte der Füllgrad 15 Volumenprozent (Vol.- %) nicht übersteigen, um einerseits nicht durch Überfüllung die Partikelmobilität und damit einhergehend KG-Abtrennung und -Vereinzelung einzuschränken und andererseits, um steigende spezifische Betriebskosten pro Tonne Abfall bei „Unterfüllung“ zu vermeiden. In praktischen Versuchen, welche in einer mechanisch-biologischen Abfallbehandlungsanlage stattfanden, wurden anhand sensorgestützten Volumenstrommessungen (mittels Lasertriangulation) vor und nach einem Trommelsieb bei gewohnter Materialaufgabe („business-as-usual“) die Trommelbeladung untersucht. Ergebnisse sind, dass in nur etwa 60 % der Betriebszeit eine Anlagenbeladung stattfand, was für Abfallsortier- und Recyclinganlagen nicht unüblich ist, häufig kommt es zu unterbrochener Materialzufuhr und Stillstandzeiten. Weitere Ergebnisse sind, dass die Befüllung der Trommel mehrere Male die kapazitive Obergrenze des Trommelsiebes überschritt und der Austragsvolumenstrom meist zeitverzögert und um den Siebdurchlauf reduziert dem Eintragsvolumenstrom vorlag, was auf ein „Durchschieben“ des Materials und ausbleibende Homogenisierung des Volumenstroms hindeutet. Auch ein größerer Volumenstromaustrag als -eintrag konnte beobachtet, jedoch nicht im Detail untersucht werden. Ein möglicher Grund dafür könnten Auflockerungsprozesse insbesondere von Materialien mit geringer Schüttdichte sein. Um dennoch einen gleichmäßigen Volumenstrom eintrag ins Trommelsieb zu erzielen, könnte die Bandgeschwindigkeit des Fördergurtes vor dem Siebaggregat an den sensorisch erfassten Volumenstrom angepasst werden. (Feil et al. 2019)

Auf Methoden zur Volumenstromerfassung sowie deren Vor- und Nachteile wird in den nachfolgenden Abschnitten eingegangen.

## 2.3 Technologien zur Volumenstrommessung

Nachfolgend wird erst in Kapitel 2.3.1 ein Überblick über verschiedene Technologien zur Volumenstrommessung gegeben. Dann werden in den darauffolgenden Abschnitten die Funktionsweise, Vor- und Nachteile sowie aktuelle Einsatzgebiete der LIDAR-Technologie beschrieben.

### 2.3.1 Möglichkeiten zur Volumenstrommessung von Feststoffen

Unter der Voraussetzung, dass die Materialschüttdichte und Förderbandgeschwindigkeit bekannt sind, stellen Wägeverfahren prinzipiell eine Möglichkeit zur Volumenstrommessung von Schüttgut dar, für LVP-Abfälle, die geringe Schüttdichten und in der Regel weder fließfähig noch stapelbar sind, ist diese Messmethode jedoch weniger geeignet. (Feil et al. 2019) Zwei Wägeverfahren werden an dieser Stelle dennoch kurz erwähnt. Bei Bandwaagen z.B. erfolgt die Gewichtsmessung durch Kraftaufnehmer unter den Wiegerollen eines Förderbandes. Das Verfahren eignet sich bei möglichst langsamem Materialtransport, mit steigender Bandgeschwindigkeit erhöht sich jedoch die Messungenauigkeit. (Ratzinger 2011) Ein anderes Verfahren zur Messung des Massenstroms stellen Prallplatten dar, bei denen das Material auf eine schräge Ebene fallen gelassen und die Aufprallkraft gemessen wird. Parameter wie heterogene Materialeigenschaften beeinflussen die Messergebnisse teils erheblich. (Ratzinger 2011)

Wie in Kapitel 2.1 und 2.2 ausgiebig dargestellt, sind die Materialschüttdichten von LVP-Abfällen meist weder bekannt noch konstant, auch deshalb werden in dieser Arbeit keine weiteren Massenstrom-Messverfahren angeführt. Andere mögliche Technologien zur Volumenstrommessung, bei denen Materialhöhen- und Bandbreiteninformationen mit der Bandgeschwindigkeit kombiniert werden, sind:

- Lasertriangulation,
- Lichtschnittverfahren,
- Strukturierte Beleuchtung,
- Interferometrie und
- Ultraschallsensoren.

Eine Möglichkeit zur Abstandsmessung ist das Triangulationsverfahren, das auf der Geometrie von ebenen Dreiecken basiert, die durch zwei Winkel und eine Seitenlänge eindeutig bestimmt sind. Sind diese bekannt, können auch andere Größen des Dreiecks (Abstand zum Objekt) bestimmt werden. Die Triangulation eignet sich für opake Materialien besonders gut, bei transparenten oder teiltransparenten Materialien wird der Lichtpunkt auf der Objektoberfläche durch innere Streuung aufgeweitet, was zu steigender Messunsicherheit führt. (Beyerer et al. 2012)

Bei der Lasertriangulation sind ein Winkel und eine Seitenlänge aus der Konstruktion des Aufbaus bekannt, der zweite Winkel ( $\alpha$  in Abbildung 13) wird durch punktweise Abtastung mit einem Laserlicht gemessen. (Beyerer et al. 2012)

Folgende Abbildung 13 veranschaulicht das Prinzip der Lasertriangulation.

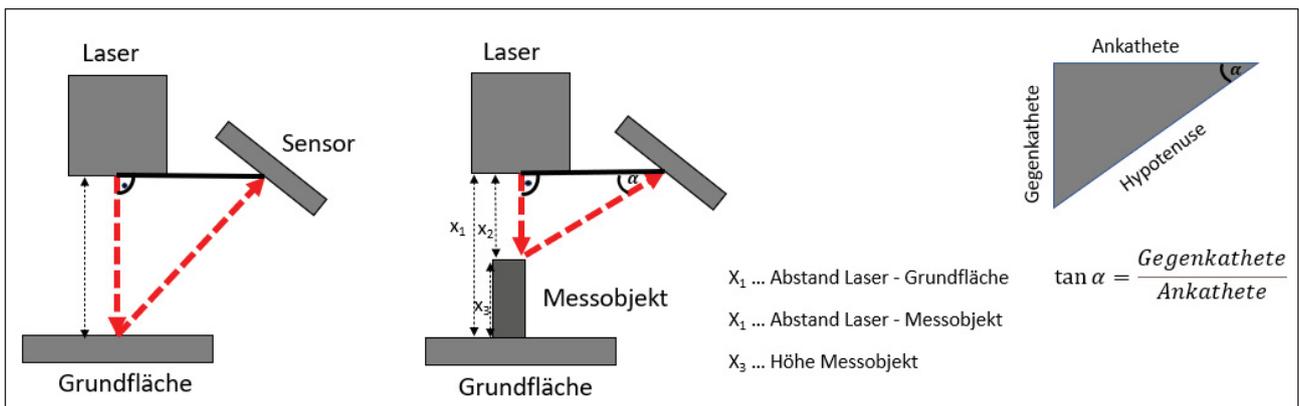


Abbildung 13 - Funktionsweise Lasertriangulation; erstellt auf Basis von (Beyerer et al. 2012).

Auch das Lichtschnittverfahren nutzt das Triangulationsprinzip. Eine Art „Lichtfächer“ wird auf das Messobjekt gestrahlt und das gestreute Licht von einer Kamera aufgenommen. Über die gesamte Breite des Messobjekts erfolgt eine Linienabtastung und Tiefenwerte werden erhalten. (Beyerer et al. 2012)

Abbildung 14 veranschaulicht die Funktionsweise des Lichtschnittverfahrens.

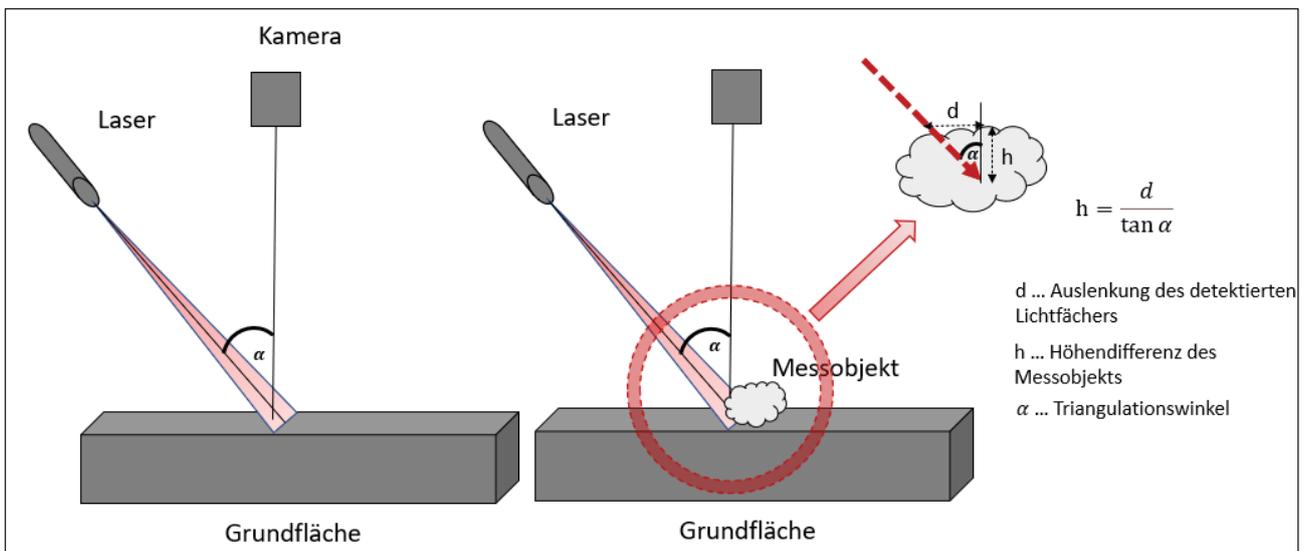


Abbildung 14 - Funktionsweise Lichtschnittverfahren; erstellt auf Basis von (Beyerer et al. 2012).

Die Strukturierte Beleuchtung stellt eine Erweiterung des Lichtschnittverfahrens dar. Dabei erfolgt eine Flächenabtastung, indem gleichzeitig mehrere Lichtfächer auf das Messobjekt gerichtet werden. Für die Lichtfächer werden verschiedene inhomogene Muster verwendet, damit aus den Bildern der Messobjekt-Oberfläche die individuellen Strahlen der Beleuchtung richtig zugeordnet und die für die triangulatorische Abstandmessung auszuwertenden Dreiecke wohlbestimmt sind. (Beyerer et al. 2012)

Lichtlaufzeitsensoren nutzen ein anderes Prinzip, sie beruhen auf der Messung der Laufzeit des Lichts vom Sensor zum Messobjekt und zurück. Die Höhe des Messobjekts ergibt sich aus der Differenz des bekannten Abstands „Laser – Grundfläche“ und dem gemessenen Abstand „Laser – Messobjekt“. (Beyerer et al. 2012)

Folgende Abbildung 15 veranschaulicht die Funktionsweise der Lichtlaufzeitmessung.

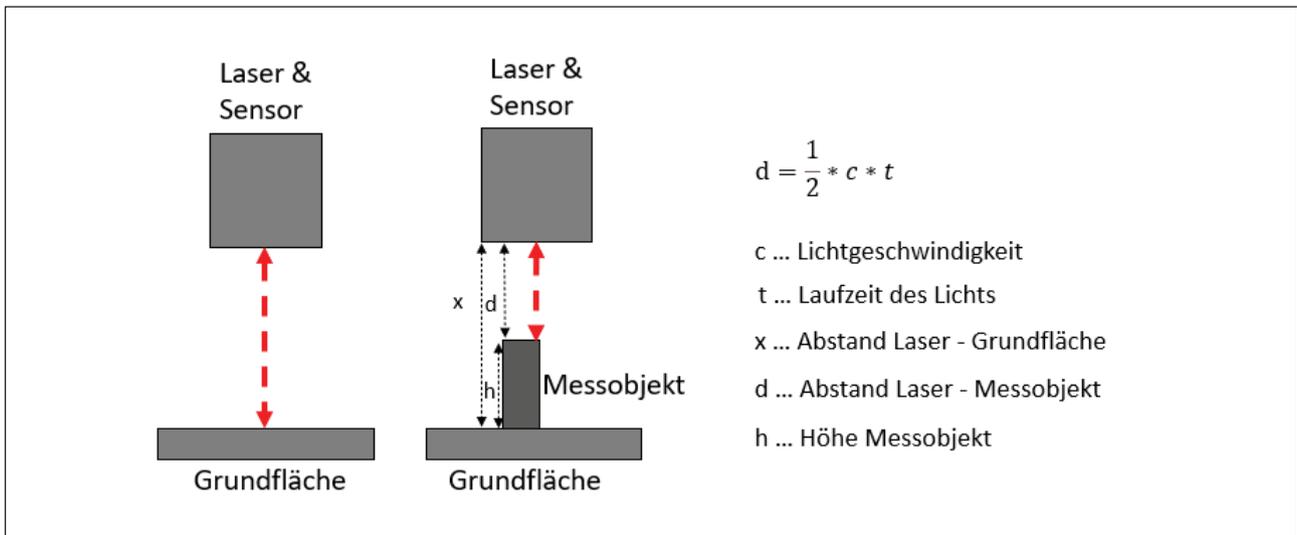


Abbildung 15 - Funktionsweise Lichtlaufzeitmessung; erstellt auf Basis von (Beyerer et al. 2012).

Die hohe Lichtgeschwindigkeit macht eine hoch aufgelöste Zeitmessung erforderlich, um möglichst genaue Ergebnisse zu erhalten. Bei Verwendung eines gepulsten Lasers als Lichtquelle muss die Zeitmessung mit dem Impulsgeber des Lasers synchronisiert werden. Bei Verwendung eines Dauerlichts werden der Lichtquelle Codesequenzen aufmoduliert, sodass die Lichtlaufzeit bestimmt werden kann. (Beyerer et al. 2012)

Der LIDAR-Sensor nutzt das Prinzip der Lichtlaufzeitmessung. Durch Scannen des 2D-Schnitts eines Messobjekts (meist anhand eines Drehspiegels) wird die Entfernung der Objektpunkte vom Sensor als Winkelfunktion in der Scanebene erhalten. Um 3D-Daten zu erhalten können entweder eine zusätzliche Scan- bzw. Drehbewegung oder mehrere übereinander angeordnete Laserscanner genutzt werden. (Beyerer et al. 2012).

Eine indirekte Laufzeitmessung nutzen phasenbasierte Verfahren, wie die Interferometrie, bei der das Messprinzip auf optischer Interferenz eines Beobachtungsstrahls mit einem Referenzstrahl beruht. Ein Laserstrahl wird ausgesendet und in eine *Referenzwelle* und eine *Messwelle* unterteilt. Der Gangunterschied zwischen den optischen Weglängen der Referenzwelle, die den Weg bekannter Referenzlänge zurücklegt und der Messwelle, die den Weg über das Messobjekt zurücklegt, bewirkt eine Phasenverschiebung zwischen den beiden Wellen. Bei Zusammenführung der beiden Wellen entsteht ein Interferenzmuster, welches vom Gangunterschied abhängt und von dem rechnerisch auf das Oberflächenrelief des Messobjekts zurückgeschlossen werden kann.

(Beyerer et al. 2012) Photomischdetektoren (PMD-Sensoren) nutzen beispielsweise dieses Messprinzip (Heckenkamp 2008).

Ähnlich dem Messprinzip der Lichtlaufzeitmessung ist die Schalllaufzeitmessung, welche bei der Abstandsmessung mit Ultraschallsensoren verwendet wird. Es werden Ultraschallimpulse ausgesendet und die Zeit bis zum Eintreffen der vom Messobjekt reflektierten Echoimpulse detektiert. (Reif 2012)

Nachfolgende Tabelle gibt einen Überblick über die angeführten Verfahren und das ihnen zugrundeliegende Messprinzip.

Tabelle 5 – Mögliche zugrundeliegende Messprinzipien zur Volumenstrommessung.

Messprinzip	Messverfahren	Informationsgewinn	Messresultat
Wiegen	Bandwaage	-	Durchsatz
Kraftaufnahme	Prallplatten	-	Durchsatz
Triangulation	Lasertriangulation	Punktabtastung	3D-Koordinaten eines einzelnen Messpunktes (Höhe)
Triangulation	Lichtschnittsensor	Linienabtastung	Simultan mehrere Punkte entlang einer Linie
Triangulation	Strukturierte Beleuchtung (Erweiterung Lichtschnittsensor)	Flächenabtastung	3D-Oberflächenrelief
Lichtlaufzeit	Lichtlaufzeitsensoren (z.B. LIDAR)	Punkt bzw. Flächenabtastung	1D, 2D- bzw. 3D-Informationen
Lichtlaufzeit und Phasenverschiebung	Interferometrie (z.B. TOF-/PMD-Kameras)	Punkt bzw. Flächenaufnahme	3D-Oberflächenrelief
Laufzeitmessung	Ultraschallsensoren	Flächenaufnahme	3D-Oberflächenrelief

### 2.3.2 Funktionsweise LIDAR Sensor

Die Arbeit von Pfund (2020) behandelt die Messmethodik des LIDAR-Sensors zur Volumenstrommessung und wird für nachfolgende Darstellung der Funktionsweise und zugrundeliegenden Berechnungen verwendet.

Das grundlegende Messprinzip von LIDAR-Sensoren wurde bereits in Kapitel 2.3.1 erläutert, die Distanz vom Sensor zur Messobjektoberfläche wird anhand der für die Wegstrecke benötigten Lichtlaufzeit gemessen. Anschließend kann über geometrische Zusammenhänge und die Bandgeschwindigkeit der Volumenstrom erhalten werden.

Folgende Abbildung veranschaulicht das Funktionsprinzip.

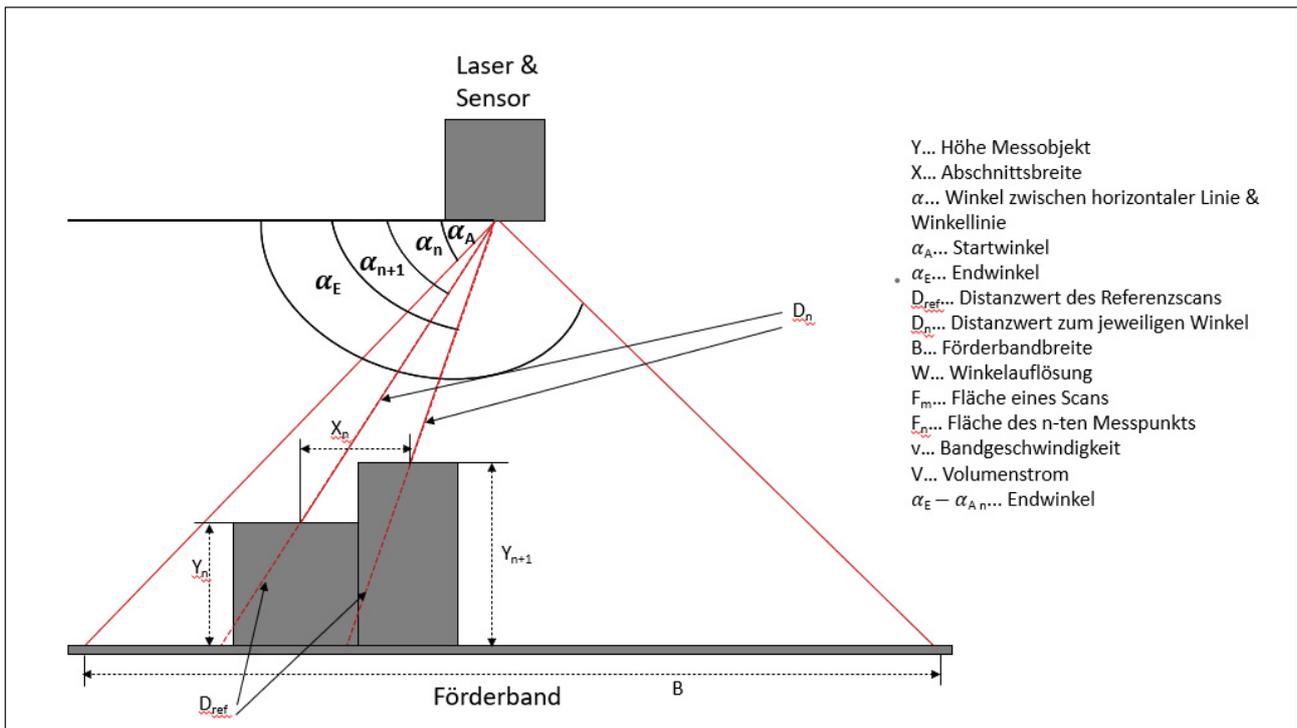


Abbildung 16 - Funktionsprinzip der Volumenstrommessung mittels LIDAR-Technologie; erstellt auf Basis von (Pfund 2020).

Die Höhe des Messobjektes wird anhand Formel (1) erhalten.

$$Y_n = \sin \alpha_n * (D_{ref} - D_n) \tag{1}$$

Dann wird die Abschnittsbreite der Messpunkte berechnet. Eine einfache Methode, bei der für jeden Messpunkt die gleiche Breite angenommen wird, ist die Berechnung anhand Formel (2).

$$X = \frac{B * W}{\alpha_E - \alpha_A} \tag{2}$$

Anschließend werden die projizierte Fläche und über die Bandgeschwindigkeit der Volumenstrom berechnet, Formel (3) und Formel (4).

$$F_n = \frac{Y_n + Y_{n+1}}{2} * X \tag{3}$$

$$\dot{V} = F_n * v \tag{4}$$

Eine andere Möglichkeit zur Berechnung der Abschnittsbreite, die den Einfluss von Höhe und Exzentrizität der Messobjekte berücksichtigt wird anhand Formel (5) beschrieben.

$$X_n = \cos \alpha_n * D_n - \cos \alpha_{n+1} * D_{n+1} \quad (5)$$

Die Fläche eines Scans wird anschließend nach Formel (6) und der Volumenstrom nach Formel (7) berechnet.

$$F_m = \sum_{n=1}^{n_{max}} X_n \frac{D_{ref,n} - \sin \beta_n * D_n + D_{ref,n+1} - \sin \beta_{n+1} * D_{n+1}}{2} \quad (6)$$

$$\dot{V} = F_m * v \quad (7)$$

Charakteristische Technische Daten für LIDAR-Sensoren sind ein Gesichtsfeld von 90° mit einer Winkelauflösung von 0,5°, Tiefenauflösung von 1 cm und einer Reichweite von 80 m. (Beyerer et al. 2012)

### 2.3.3 Grenzen und Potentiale, Vor- und Nachteile des LIDAR Sensors

Vorteile:

- Geringe Messzeit,
- Preis,
- Handhabung und
- Unempfindlich gegen Fremdlicht.

Nachteile:

- Hohe Auflösung der Zeitmessung erforderlich,
- Empfindlich gegen Vibration bzw. Schwingung von Sensor bzw. Fördergurt,
- Verschattungseffekte und
- Nicht für Anwendungen im Monoschichtbereich geeignet.

Ein Vorteil des LIDAR-Sensors ist die geringe Messzeit aufgrund der hohen Lichtgeschwindigkeit. Gleichzeitig stellt die damit einhergehende erforderliche hohe Auflösung der Zeitmessung einen Nachteil dar. (Beyerer et al. 2012)

Nachteilig auf die Messung wirken sich außerdem ein Schwingen des Förderbandes oder des Sensors bzw. Vibrationen, die auf den Sensor wirken aus. Sie sollten möglichst vermieden werden, z.B. durch eine steife Sensoraufhängung. Sogenannte "Verschattungseffekte" führen dazu, dass der detektierte Materialvolumenstrom steigt. Dabei spielen sowohl hohe Gegenstände, aber auch flächige- oder Hohlkörper eine bedeutende Rolle (Vgl. Abbildung 17). Aufgrund der Ungenauigkeit bei kleinen Schütthöhen ist die Anwendung des LIDAR-Sensors zur Volumenstrommessung im Monoschichtbereich nicht geeignet. Vorteile von LIDAR-Sensoren zur Volumenstrommessung sind der moderate Preis (etwa 1000 €, je nach Modalität auch wesentlich günstiger und teurer erhältlich) und, dass sie eher unempfindlich gegen Fremdlicht sind. (Pfund 2020)

Laut Herstellerangaben verursachen transparente Objekte Messinterferenzen, die sich Großteils herausfiltern lassen (SICK 2018). Ergebnisse aus praktischen Versuchen bestätigen systematische Fehler bei der Detektion von transparenten Folien (Pfund 2020).

Folgende Abbildung veranschaulicht den Effekt von Verschattung, dabei wird der Weg der Lichtstrahlen meist aufgrund der ungünstigen Position von Messobjekten blockiert. Auch Störungen der ordnungsgemäßen Volumenstrommessung über längere Zeitdauer sind möglich, z.B. wenn Klemmkorn mechanisch entfernt werden muss (ganz rechts in Abbildung 17).

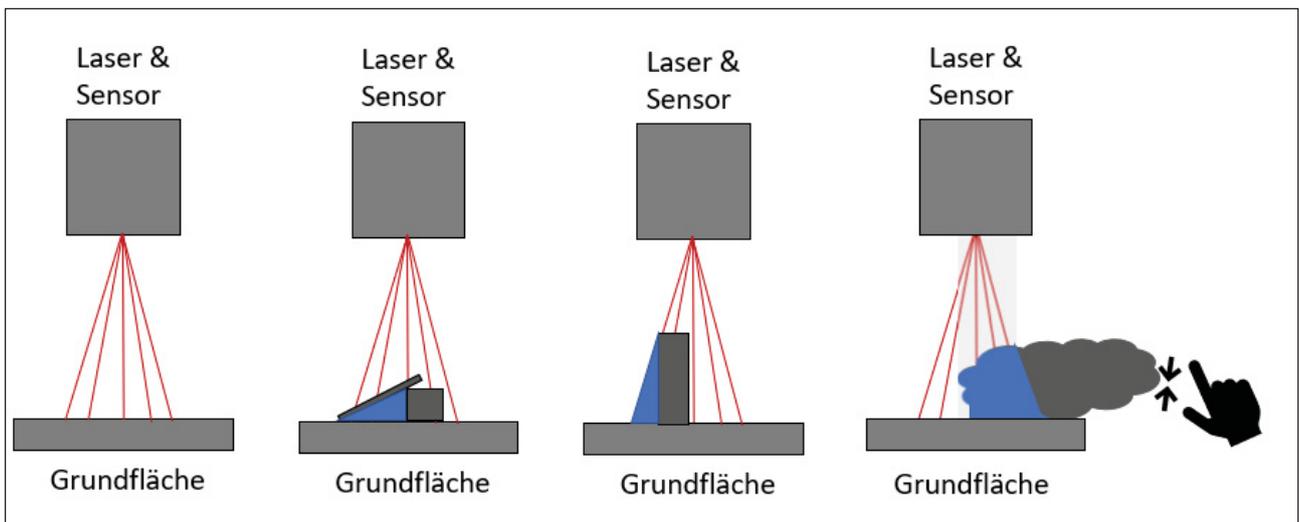


Abbildung 17 - Verschattungseffekte: z.B. durch gestapeltes, hohes oder eingeklemmtes Material; erstellt auf Basis von (Pfund 2020).

### 2.3.4 Einsatzgebiete

LIDAR-Sensoren haben ein umfassendes Anwendungspotential, sie können beispielsweise zur Geländekartierung (Reutebuch et al. 2005), zur Kollisionsvermeidung bei autonomen Fahrsystemen (Pepperl+Fuchs Group 2020), zur Messung von Wirbelströmen in Windparks (Bingöl et al. 2010), zur Erfassung der geologischen Struktur (z.B. Krater) bei Weltraummissionen (in Entwicklung) (Senshu et al. 2021) oder zur Bestandsaufnahme von Pflanzen in Wäldern eingesetzt werden. Dabei wird das entsprechende Gelände abschnittsweise überflogen und Höheninformationen durch die von der Vegetation reflektierten Laserimpulse berechnet und aufgezeichnet, wobei Reflektionen durch die Bodenstruktur von jenen durch die Vegetation unterscheidbar sind. (Reutebuch et al. 2005; Wehrli 2015)

Mit Einführung der Geräte iPad Pro 2020 (Tablet) und iPhone 12 Pro (Mobiltelefon) kam zudem eine günstige und einfach handhabbare Möglichkeit zur Entfernungsmessung und Oberflächenscan. Den darin verbauten LIDAR-Sensor und seine Anwendbarkeit für geowissenschaftliche Zwecke untersuchten Luetzenburg et al. (2021) in ihrer Arbeit. Die Ergebnisse zeigen, dass Formen von kleinen Objekten mit absoluter Genauigkeit von 1 cm detektiert werden konnten. Das Scannen einer etwa 130 m langen, 15 m breiten und 10 m hohen Steilküste war innerhalb von 15 Minuten erledigt. Referenzmessungen zeigten, dass für 80 % der etwa 1,5 Mio. mittels LIDAR-Sensoren akquirierten Bildpunkte ein kleinerer Abstand als 15 cm zur Punktwolke der Referenzwolke detektiert wurde. Als mögliche weitere Einsatzgebiete der Mobilien Geräte mit LIDAR-Technologie werden z.B. genannt: Geomorphologie, Geologie, Forstwirtschaft, Archäologie. Überall dort können sie eine bequeme, kostengünstige, zeitnahe und leichtverfügbare Alternative zu etablierten Methoden der Landvermessung und Datenerfassung darstellen. Aufgrund der begrenzten Reichweite können sie allerdings nur im Nahbereich angewendet werden. (Luetzenburg et al. 2021)

In der Industrie werden LIDAR-Sensoren z.B. eingesetzt:

- Zur effizienten und staubfreien Materialentnahme- und Materialabladesteuerung (LIDAR-Sensoren an Haldenschüttgeräten detektieren die Materialkonturen, Material wird an Stellen mit möglichst geringer Wurfhöhe abgeladen),
- Zum effizienten Materialabtrag (Volumen und Kontur einer Schüttguthalde werden detektiert und Lager- sowie Materialentnahmekapazitäten ausgeschöpft),
- Überwachung des Materialstroms auf Förderbändern (Beladungsschwerpunkt, Beladungshöhe und Volumenstrom),
- Zur Überwachung des Materialstroms beim Beladen, Positionieren und Abladen,
- Zur Überfüllsicherung bei Zerkleinerungsaggregaten und
- Zur Beladungsoptimierung von Zerkleinerungsaggregaten. (SICK AG 2017)

## 2.4 Großtechnische Anwendungspotentiale für den LIDAR Sensor

Zur Untersuchung der großtechnischen Anwendungspotentiale für den LIDAR Sensor werden die typischerweise eingesetzten Aggregate einer LVP-Sortieranlage nacheinander betrachtet:

Tabelle 6 - Gängige Aggregate in einer LVP-Sortieranlage, Volumenstrom als Einflussfaktor auf die Funktionstüchtigkeit und Einsatzmöglichkeiten von Volumenstromsensoren.

Aggregat bzw. Anlagenteil	Volumenstrom stellt u.a. ein Hauptkriterium für Funktionalität und Leistung des Aggregates dar	Einsatz von Volumenstrom-Sensoren scheint sinnvoll
Bunker und Zwischenlager	Volumen des zu lagernden Materials ist ein wesentlicher Faktor bezüglich (bzgl.) Auslastung des Anlagenteils, stellen jedoch kein Hemmnis in seiner Funktionalität dar.	Weniger als Volumenstromsensor, aber als Füllstandmesser kann LIDAR-Sensor eingesetzt werden;
Ballenauflöser	Indirekt; maximale Durchsatzleistungen werden in [t/h] angegeben (Vecoplan AG 2018) Überlastung des Aggregates eher aufgrund von Brückenbildung oder Störstoffen (Kranert 2017)	Ja, um von sinkenden Materialdurchsätzen in nachgeschalteten Aggregaten auf die Ursache wie reduzierte Materialaufgabe, Brückenbildung im oder Überlastung vom Aggregat schließen zu können.
Siebvorrichtung	Sieberfolg wird von der sogenannten offenen Siebfläche und beim Trommelsieb explizit vom Füllgrad, der 15 Volumprozent (Vol. -%) nicht überschreiten soll, beeinflusst (Kranert 2017).	Ja, zur Überwachung der volumetrisch idealen Materialbeschickung, zur Materialflussüberwachung von Input- und Output-Strömen sowie für evidenzbasierte Änderungen von Trennschnitten.
Windsichter	Eher nein; Durchsatz wird durch spezifische Beladung (kg Feststoff/m <sup>3</sup> Sichtluft) und Trennleistung von Materialvorkonditionierung und KG-Verhältnis bestimmt;	fraglich; in Kombination mit Stofferkennung und bei Kenntnis Abfall-spezifischer Schüttdichten (z.B. Datenbank) kann evtl. über den detektierten Volumenstrom der Massenstrom berechnet und die spezifische Beladung bestimmt werden, jedoch ist Volumenstrombestimmung von Folien ungenau;
Magnetscheider	Indirekt; Sortierleistung wird durch Bandbelegung beeinflusst; Vereinzelung der Objekte notwendig;	Nicht direkt vor oder nach dem Aggregat, da sich LIDAR-Sensor in der Regel nicht für Monoschichtbereiche eignet; prinzipiell zur Stoffstromüberwachung ja;
Wirbelstromscheider	Indirekt; Sortierleistung wird durch Bandbelegung beeinflusst; Vereinzelung der Objekte notwendig;	Nicht direkt vor oder nach dem Aggregat, da sich LIDAR-Sensor in der Regel nicht für

		Monoschichtbereiche eignet; prinzipiell zur Stoffstromüberwachung ja;
Ballistik Separator	Ja; gegenseitige Behinderung der Materialien in ihrer Bewegung beeinflusst die Sortierung negativ.	Ja; für optimale Sortierleistung des Aggregats; zur Materialflussüberwachung;
Optische Sortierer (NIR, VIS, etc.)	Indirekt; Sortierleistung wird durch Bandbelegung beeinflusst; Vereinzlung der Objekte notwendig;	Nicht direkt vor oder nach dem Aggregat, da sich LIDAR-Sensor in der Regel nicht für Monoschichtbereiche eignet; prinzipiell zur Stoffstromüberwachung ja;
Handsörtierplätze	Ja; zu große Materialströme belasten Sortierpersonal;	Ja; zur Stoffstromüberwachung; die Anzahl des Sortierpersonals könnte an Materialstromausmaß angepasst werden;
Pressen	Eher nein;	Ja; zur Stoffstromüberwachung; zur Abschätzung der zu erwartenden Ballenlänge;
Fördereinrichtungen	Teils; Gurtförderer funktionieren unbeeinflusst vom Materialvolumen, Überladung könnte evtl. in seitlichem Materialaustrag resultieren; bei Luftkanälen kann sich ein sehr großer Volumenstrom negativ auf die Förderleistung auswirken;	Ja; zur Materialflussüberwachung;

Volumenstromsensoren können sinnvoll vor Aggregaten wie Siebvorrichtungen und Ballistikseparatoren zum Zweck der optimierten Funktionsweise und Leistung des Aggregates eingesetzt werden, um einerseits eine „Unterfüllung“ als auch Überfüllung von Aggregaten zu vermeiden, denn beide Zustände wirken sich negativ auf deren Leistung aus (Schlögl 2021). Weniger Sinn macht die Installation von LIDAR-Sensoren direkt vor oder nach Aggregaten, die im Monoschichtbereich arbeiten, zum einen wegen der Messungenauigkeit bei kleinen Schütthöhen und zum anderen wegen der zunehmenden Streuung bei höherer Bandgeschwindigkeit (z.B. zur Materialvereinzlung vor FE-Scheidern). (Pfund 2020)

Der Einsatz von Volumenstromsensoren in Anlagen kann auch zur frühzeitigen Erkennung von Betriebsstörungen wie z.B. Materialverstopfung oder Zopfbildung dienen, wobei eine Unterscheidung zwischen kurz-, mittel- und langfristigen bzw. unschädlichen Durchsatzschwankungen und solchen, die sofortigen Handlungsbedarf erfordern, möglich ist. Wie Curtis et al. (2021) in Versuchen zeigt, können kurzzeitige Schwankungen (über einen Zeitraum < 15 Sekunden (s)) auf schwankenden Materialaustrag vorgelagerter Aggregate zurückgeführt werden, während mittelfristige (15-600 s) Fluktuationen in der Regel aus diskontinuierlicher Beschickung der Anlage resultieren. Auch das unterschiedliche Zerkleinerungs- und Förderverhalten heterogener Abfälle kann in kurz- und mittelfristigen Schwankungen des Volumen- und Massenstroms resultieren. Langfristige (> 600 s) Durchsatzschwankungen sind meist

Anlagenstillständen geschuldet. Bei umfassender Sensorausstattung von Maschinen und Anlage kann die Störquelle rasch geortet und identifiziert werden. Zur erfolgreichen Steuerung der Anlage auf Grundlage von Sensortechnik ist allerdings eine komplexe Vernetzung der verschiedenen Maschinen und Anlagenteile notwendig, um zu verhindern, dass richtige Messergebnisse in nachteiligen Konsequenzen resultieren (z.B. niedrige Füllstandmessung im Shredder aufgrund von Brückenbildung löst erhöhte Materialzufuhr und in weiterer Folge Anlagenstillstand aus). (Curtis et al. 2021a)

Der Einsatz von Volumenstromsensoren kann auch vor sensorbasierten Sortieraggregaten sinnvoll sein. Mit praktischen Versuchen untersuchten Küppers et al. (2021) den Einfluss der Materialdurchsatzrate und Input-Zusammensetzung auf die Leistung eines NIR-Sensors. Es konnte gezeigt werden, dass 2D-Material bei niedrigen Durchsatzraten wenig bis keinen Einfluss auf die Ausbeute hat, während bei hohen Durchsätzen eine Reduktion der Ausbeute um etwa 20 % beobachtet wurde. Ergebnisse der Untersuchung waren, dass steigende Durchsatzraten insgesamt zu sinkender Ausbeute und Produktreinheit zur Steigerung des fälschlich ausgetragenen Anteils an Reject-Partikeln führen, während die Produktmenge zunimmt. Als mögliche Gründe dafür werden ein Überlappen oder Berührung von Eject-Partikeln und Reject-Partikeln aufgrund unzureichender Materialvereinzelung, sowie das Mitreißen von Reject mit den Luftstößen zum Ausschießen des Ejects angeführt. (Küppers et al. 2021)

Während bei optischen Sensoren eine reduzierte Bandbelegungsrate für eine korrekte Funktionsweise und guten Trennerfolg erforderlich ist, benötigen die gängigen mechanischen Sortieraggregate wie Siebe, Sichter, Ballistikseparatoren, FE-Scheider und NE-Scheider eine reduzierte Volumenstromzufuhr (Kranert 2017).

Eingriffe in den Gesamtprozess zum Zweck der Anlagensteuerung (z.B. Entlastung eines Aggregates oder Verschiebung einer Verteilung von Fein zu Grob für mehr Reinheit) werden meist schon durch geringfügig veränderte Betriebsbedingungen (Variation der Bandgeschwindigkeit, Wahl der Sieblochung, Anströmgeschwindigkeit des Windsichters, etc.) erreicht (Sarc et al. 2019).

### 3 Material und Methoden

Die Ergebnisse vorliegender Arbeit entstammen praktischen Versuchen, welche im Werkstechnikum der Firma STADLER Anlagenbau GmbH in Altshausen, einer Gemeinde im deutschen Landkreis Ravensburg (Baden-Württemberg), stattgefunden haben. Der Versuchsstand war baulich vor direkten Witterungsbedingungen wie Wind und Nässe abgeschirmt. Ein Einfluss durch allgemeine Temperaturschwankungen (Tag-Nacht, Warmwetter- Kaltwetter) kann nicht ausgeschlossen werden, wird allerdings im Zuge der vorliegenden Arbeit vernachlässigt, da der fünfwöchige Versuchszeitraum durchgehend während der Sommermonate August und September stattfand und keine extremen Temperaturstürze beobachtet wurden. Auch Staub- und Feuchtigkeitsbeladung der Luft werden als annähernd konstant angenommen.

Grundlegende Fragestellungen, auf Hinblick derer die Versuche geplant und durchgeführt wurden, sind nachfolgend aufgelistet:

- Wie kann das gemessene Volumen validiert werden?
- Misst der Sensor richtig?
- Misst der Sensor präzise?
- Ist Wiederholgenauigkeit gegeben?
- Ist die Richtigkeit der Messung Probenmaterialabhängig?
- Herrscht ein kausaler Zusammenhang zwischen Schütthöhe und Messgenauigkeit?
- Welchen Einfluss üben Folien auf den Volumenstrom aus?

Darüber hinaus ergaben sich im Laufe der Versuchsdurchführung weitere Fragestellungen, wie:

- Welchen Einfluss haben dem Sensor nahe positionierte Lichtquellen auf das detektierte Volumen?
- Welchen Einfluss hat die Probenfeuchtigkeit auf das detektierte Volumen?

Diesen wurde im Rahmen von indikativen Versuchen nachgegangen, anhand derer erste Rückschlüsse gezogen werden sollen.

Nachfolgende Tabelle gibt einen Überblick über die durchgeführten Versuchsreihen, die dabei eingesetzten Fraktionen sowie zur Verfügung gestandenen Sensor-Modelle.

Tabelle 7 – Überblick über durchgeführte Versuche mit verschiedenen Fraktionen und dabei eingesetzten Sensor-Modellen.

Fraktion	Versuche						
	Flakes-Referenz	150 mm Schütthöhe	300 mm Schütthöhe	550 mm Schütthöhe	Bandbelegung	Lichteinfluss	Wasser
<b>GVK</b>		HDDM, HDDM+, SAMSoric					
<b>RESTE</b>		HDDM, HDDM+, SAMSoric	HDDM, HDDM+, SAMSoric	HDDM, HDDM+, SAMSoric			
<b>PPK</b>		HDDM, HDDM+, SAMSoric	HDDM, HDDM+, SAMSoric	HDDM, HDDM+, SAMSoric			
<b>PP</b>		HDDM, HDDM+, SAMSoric	HDDM, HDDM+, SAMSoric	HDDM, HDDM+, SAMSoric			
<b>PET Tray</b>		HDDM, HDDM+, SAMSoric	HDDM, HDDM+, SAMSoric	HDDM, HDDM+, SAMSoric			
<b>PET Flaschen</b>		HDDM, HDDM+, SAMSoric	HDDM, HDDM+, SAMSoric	HDDM, HDDM+, SAMSoric		HDDM, HDDM+, SAMSoric	HDDM, HDDM+, SAMSoric
<b>PE</b>			HDDM, HDDM+, SAMSoric				
<b>NE</b>		HDDM, HDDM+, SAMSoric	HDDM, HDDM+, SAMSoric	HDDM, HDDM+, SAMSoric			
<b>MG Grob</b>		HDDM, HDDM+, SAMSoric	HDDM, HDDM+, SAMSoric	HDDM, HDDM+, SAMSoric			
<b>MG Fein</b>		HDDM, HDDM+, SAMSoric	HDDM, HDDM+, SAMSoric	HDDM, HDDM+, SAMSoric			
<b>Folien</b>		HDDM, HDDM+, SAMSoric	HDDM, HDDM+, SAMSoric	HDDM, HDDM+, SAMSoric			
<b>Flakes</b>	HDDM, HDDM+, SAMSoric		HDDM, HDDM+, SAMSoric				

Tabelle 7 zeigt, dass nicht alle Versuchsreihen mit jeder Materialart durchgeführt wurden. Sie zeigt auch, welche Sensormodelle bei den Versuchen eingesetzt wurden, wobei in wenigen Fällen nicht für alle Einzelversuche Ergebnisse vorliegen.

Ein umfassender Versuchsplan mit zusätzlichen Angaben wie fortlaufender Versuchsnummer, Datum der Durchführung und im Einzelversuch eingesetzten Sensor-Modellen ist im Anhang (Abbildung 53 & Abbildung 54) zu finden und wird nur auszugsweise in den Erläuterungen zur Versuchsdurchführung der einzelnen Versuchsreihen dargestellt.

In den folgenden Abschnitten wird erst die Probenahme der LVP-Abfälle und dann das Probenmaterial selbst beschrieben. Anschließend werden in Kapitel 3.3, 3.4 und 3.5 Versuchsaufbau, -durchführung und -auswertung beschrieben.

### 3.1 Probenahme in einer LVP-Sortieranlage

Die Probenahme der LVP-Abfälle erfolgte in einer LVP-Sortieranlage der *PreZero Stiftung & Co. KG*. Das Unternehmen ist Teil der Handelsgruppe Schwarz und zählt mit etwa 30.000 Mitarbeitern und einem Jahresumsatz von rund drei Milliarden Euro (€) im Jahr 2021 zu den zehn größten Entsorgungsunternehmen weltweit. (EUWID Recycling und Entsorgung 2021)

Standort besagter LVP-Sortieranlage liegt in Ölbronn-Dürrn, einer Gemeinde im Enzkreis in Baden-Württemberg. Dort werden im Dreischichtbetrieb nach Unternehmensangaben jährlich rund 100.000 t Verpackungsabfälle sortiert, wobei wesentliche Unterschiede im angelieferten Input-Material bestehen, welche auf regional unterschiedliche Sammelsysteme in den Einzugsgebieten zurückzuführen sind. Etwa die Hälfte des zu sortierenden Materials entstammt Landkreisen in denen LVP-Material im *Gelben Sack* oder der *Gelben Tonne* gesammelt wird. Das restliche zu sortierende Inputmaterial wird aus Landkreisen mit den Sammelsystemen *Wertstofftonne* und *Flach und Rund* generiert. (PreZero Recycling Süd GmbH 2021)

In Tabelle 8 werden Unterschiede der Sammelsysteme *LVP*, *Flach Rund*, und *Wertstofftonne* angeführt:

Tabelle 8 - Darstellung der Unterschiede in den gesammelten Materialien im Rahmen der Sammelsysteme *LVP*, *Flach*, *Rund* und *Wertstoff* (Wagner et al. 2018).

Sammelsystem	Fraktion
<i>LVP</i>	Leichtverpackungen aus Aluminium, Weißblech, Kunststoff und Verbunden
<i>Flach</i>	PPK, Folien und expandiertes Polystyrol
<i>Rund</i>	Glas und LVP ohne Folien und ohne expandiertes Polystyrol
<i>Wertstofftonne</i>	Recyclbare Materialien wie Alufolie, GVK, Kunststoffe, Metalle, expandiertes Polystyrol, Verpackungen aus Holz, Metall oder Kunststoff

In Tabelle 9 werden die Output-Fractionen der LVP-Sortieranlage und Abkürzungen, welche in vorliegender Arbeit verwendet werden, angeführt.

Tabelle 9 - Output-Fractionen der LVP-Sortieranlage.

Fraktion	Abkürzung
HDPE-Folien unterschiedlicher KG	Folien
LDPE-Folien unterschiedlicher KG	
Folien-Mix	
Getränkeverbundkarton	GVK
Eisenmetalle	FE
Nicht-Eisenmetalle	NE
Polyethylenterephthalat-Tray	PET Tray
Polyethylenterephthalat-Flaschen	PET Flaschen
Mischkunststoffe	MKS
Polypropylen	PP
Papier, Pappe, Karton	PPK
Polystyrol	PS
Reste	Reste

Nachfolgende Abbildung 18Abbildung 12 zeigt die Darstellung eines vereinfachten Fließbildes der LVP-Sortieranlage und gibt einen grundlegenden Überblick über die Prozesskette.

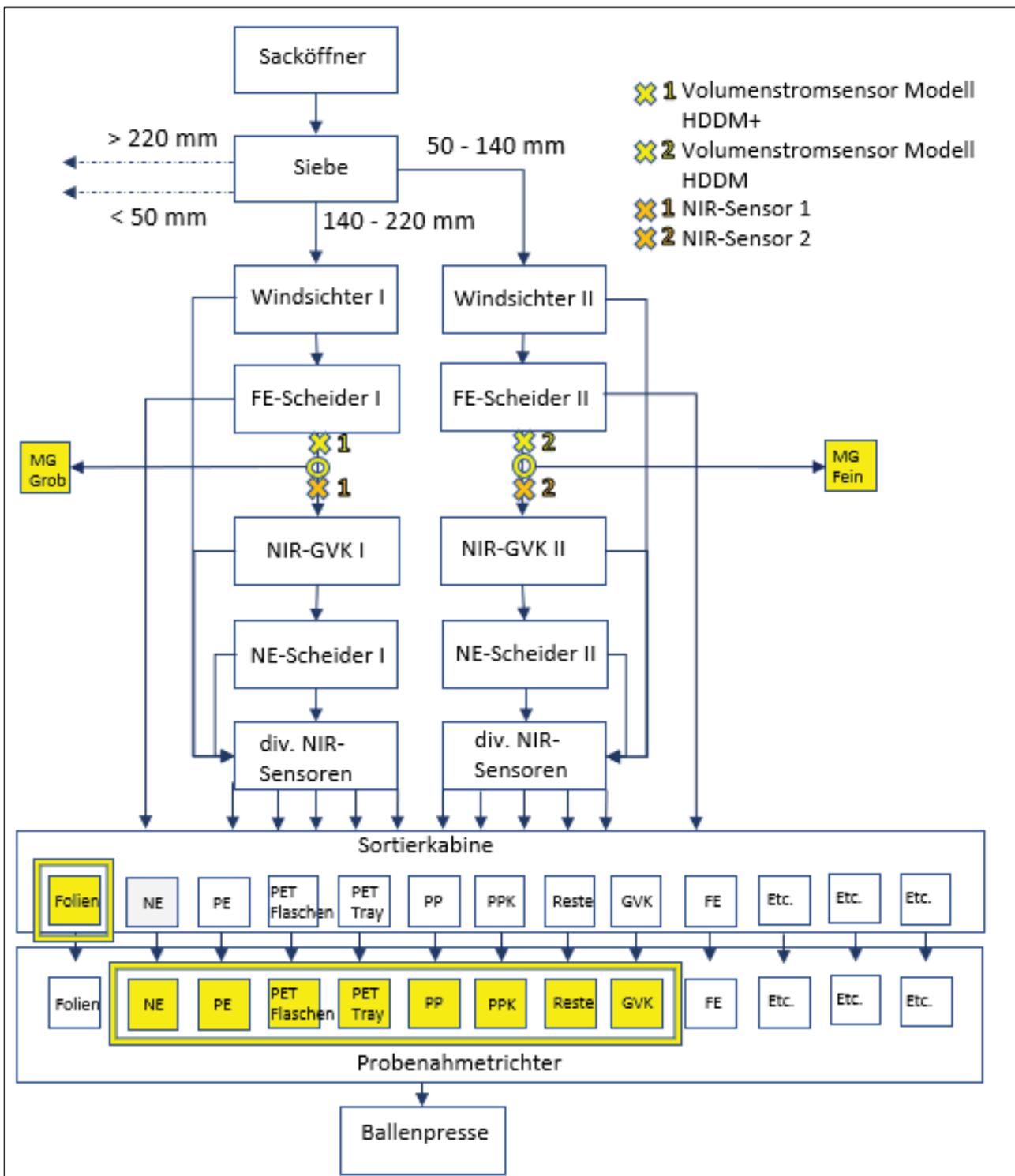


Abbildung 18 - Vereinfachtes Fließbild der PreZero Sortieranlage. Materialströme der KG < 50 und > 220 mm sind für die weitere Arbeit irrelevant und werden daher nicht näher ausgeführt. Abkürzung NIR-GVK wird für einen NIR-Sensor mit GVK als Eject verwendet. An zwei Stellen (markiert durch gelb gefärbte Ringe) wurde Probenmaterial vom bewegten Band genommen. Die eckigen gelb gefärbten Umrandungen markieren die Entnahmestellen der restlichen Probenfraktionen. Zusätzlich angebrachte Volumenstrom- und NIR-Sensoren sind mit gelb und orange gefärbten gekreuzten Balken markiert; erstellt auf Basis von (PreZero 2021).

Das Fließbild zeigt zu Beginn der Prozesskette einen Sacköffner, der neben dem Öffnen von Abfallsäcken auch einem Aufschluss von Agglomeraten und einer gleichmäßigen Materialzuführung dient. Eine anschließende Siebung trennt das zu sortierende Material in Stoffströme < 50 mm, 50 bis 140 mm, 140 bis 220 mm und größer 220 mm KG. Die parallele Stoffstromführung bei gleicher Prozessgestaltung hat den Vorteil der Materialstromteilung, wodurch eine Überlastung einzelner Aggregate und Fördereinrichtungen verhindert werden kann. Nachdem weder aus Materialstrom größer 220 mm noch kleiner 50 mm KG eine Probe entnommen wird, werden sie an dieser Stelle nicht weiter ausgeführt.

Nach Windsichtern zur Abtrennung von Flugfähigem und Folien werden magnetische Bestandteile mittels Überbandbandmagneten abgetrennt und anschließend händisch nachsortiert. Aus dem restlichen Material wird nach den FE-Scheidern mittels NIR-Sensoren I und II GVK heraussortiert. Dieses wird zuerst einem weiteren NIR-Sortierer, einem sogenannten „Cleaner“ zugeführt und anschließend zusätzlich in der Handsortierkabine nachsortiert.

Aus dem Eject nach den NIR-GVK-Sortierern werden mittels Wirbelstromscheidern NE-Teile aussortiert, welche wiederum als nächstes Cleanern und anschließend einer Handsortierung zugeführt werden. Im nun verbleibenden Materialstrom sind nun im Wesentlichen noch diverse Kunststoffe, PPK und „anderes“, wie z.B. Verbunde oder Inertstoffe enthalten. In mehreren nachfolgenden NIR-Sensor-gestützten Sortierstufen und abschließender Handsortierung werden diese Materialien voneinander getrennt, sodass am Ende des Sortierprozesses folgende Fraktionen getrennt vorliegen: Folien Mix unterschiedlicher KG, Folien PO Flex, Folien LDPE, NE, PE (HDPE und LDPE), PS, PET Flaschen, PET Tray, PP, PPK, GVK, FE, MKS und Reste.

In Abbildung 18 sind mit gelb und orange gefärbten gekreuzten Balken zusätzlich angebrachte Volumenstrom- und NIR-Sensoren markiert. Diese haben über einen Zeitraum von etwa zwei Wochen Volumen- und Stoffstromdaten aufgezeichnet, welche auf Basis der Ergebnisse der vorliegenden Arbeit ausgewertet werden sollen.

Die Materialproben wurden an folgenden Stellen gezogen:

- *MG Grob* und *MG Fein* aus dem bewegten Abfallstrom, indem zu einem Zeitpunkt des Anlagenstillstandes das Material vom Förderband zwischen FE-Scheider I und NIR-GVK I, sowie zwischen FE-Scheider II und NIR-GVK II entnommen wurde,
- *Folien* direkt in der Sortierkabine und
- *NE, PE, PET Flaschen, PET Tray, PP, PPK, GVK* und *Reste* mithilfe von sogenannten Probetrichtern (Abbildung 19) zwischen Handsortierkabine und Ballenpresse.

In Abbildung 19 sind Probenahmetrichter dargestellt, über die Material aus der Handsortierkabine ausgeschleust werden kann.



Abbildung 19 – Die Probenahme für die Fraktionen NE, PE, PET Flaschen, PET Tray, PP, PPK, GVK und Reste erfolgte über Probenahmetrichter zwischen Handsortierkabine und Ballenpresse.

### 3.2 Probenmaterial

Wie in Kapitel 3.1 erläutert wurden Proben an unterschiedlichen Stellen einer LVP-Sortieranlage gezogen.

Abbildung 20 zeigt das Probenmaterial fraktionsmäßig auf Big Bags aufgeteilt vorliegend. Nachfolgend werden die Proben bezüglich Zusammensetzung und Beschaffenheit fraktionsweise beschrieben:



Abbildung 20 - Probenmaterial: 1) Folien, 2) MG Grob, 3) MG Fein, 4) NE, 5) PE, 6) PET Flaschen, 7) PET Tray, 8) PP, 9) PPK, 10) Reste und 11) GVK.

Fraktion *Folien* besteht vorwiegend aus transparenten Folien (vorwiegend aufgeraut und nicht mehr glänzend), teils < 15 cm, teils als große, mehr oder weniger kompakte Folienballen vorliegend. Die Probe enthält nur vereinzelt Störstoffe wie Joghurtbecher oder PET-Trays (siehe Abbildung 20, 1). Die *Mittelgut Grob* Probe ist ähnlich der *Mittelgut Fein* Probe eine heterogene Mischung sämtlicher Input-Materialien, was der frühen Entnahmestelle im Sortierprozess geschuldet ist (Vgl. Abbildung 18). Dennoch sind Unterschiede in der Zusammensetzung erkennbar. Objekte kleinerer KG und damit in *Mittelgut Fein* zu finden, sind vor allem Joghurtbecher, Trays und vereinzelt Folien, während in Fraktion *Mittelgut Grob* wesentlich größere Folienknäuel, volle Müllsäcke, Kübel und ähnlich unhandliche Verpackungen enthalten sind (siehe Abbildung 20, 2 & 3). Fraktion *NE* enthält vorwiegend Tiernahrungs-Frischhaltebeutel, Spraydosen, Blister, Konservendosen, aber auch Zigarettenverpackungen und zerknüllte Alufolien (siehe Abbildung 20, 4). Die *PE* Probe zeichnet sich durch Sortenreinheit und große KG-Varianz aus, Kosmetiktuben, Gießkannen und größere Kanister sind enthalten (siehe Abbildung 20, 5). Fraktion *PET Flaschen* umfasst Großteils transparente, aber auch braune und grüne Flaschen, etwa die Hälfte davon inklusive Deckel. Darüber hinaus verfügen wenige Flaschen über Full Sleeves. Vereinzelt sind Blister und PET-Trays in der *PET Flaschen* Probe enthalten (siehe Abbildung 20, 6). Fraktion *PET Tray* wiederum zeichnet sich durch Sortenreinheit aus und enthält vorwiegend flach gedrückte Gemüse- und Obst-Behälter, Käse- und Wurstverpackungen, Fleischtassen und Folien. Nur vereinzelt sind PET-Flaschen und NE-Frischhaltebeutel enthalten (siehe Abbildung 20, 7). In der *PP* Probe sind vor allem Behältnisse wie größere Joghurt-, Eis- und Waschtabsboxen sowie Blumentöpfe, aber auch kleine Aufstrich- und Joghurtbecher enthalten (siehe Abbildung 20, 8). Fraktion *PPK* zeichnet sich durch das Vorhandensein zerkleinerter Kartons, Papiertücher und Papier-KS-Verbunde, wenig Zeitungs- oder Schreibpapier, durchaus einigen Folien aus (siehe Abbildung 20, 9). Die Probe liegt teils trocken, teils feucht vor. Die *Reste* Probe ist eine heterogene Mischung an Verpackungs- und Nicht-Verpackungsmaterialien unterschiedlicher Größe und mittlerer Verschmutzung (siehe Abbildung 20, 10). Die *GVK* Probe zeichnet sich durch hohe Sortenreinheit aus. Etwa ein Drittel der GVKs liegt zerknüllt oder zerkleinert vor, die restlichen Einzelobjekte sind mehr oder weniger gleichmäßig flachgedrückt (siehe Abbildung 20, 11).

Darüber hinaus wurden KS-Flakes als Probenmaterial eingesetzt, welche nicht aus der LVP-Sortieranlage stammen. In Tabelle 10 sind die Materialproben und deren Charakteristika in Bezug auf vorwiegend enthaltene KG und Kornform (KF), typischerweise enthaltene Einzelobjekte und Fremdstoffe sowie das Probengewicht überblicksmäßig angeführt. Die Zuweisung von Farben zu den Fraktionen (braun: *Folien*; violett: *MG Grob*; dunkel-grau: *MG Fein*; dunkel-blau: *NE*; hell-blau: *PE*, mittel-grün: *PET Flaschen*; hell-grün: *PET Tray*; gelb: *PP*; orange: *PPK*; hell-rot: *Reste*; dunkel-rot: *GVK*; dunkel-grün: *Flakes*) wird zur besseren Übersichtlichkeit in der gesamten Arbeit beibehalten.

Tabelle 10 – Beschreibung des Probenmaterials: Angeführt werden für die Probenfraktion typische Charakteristika und Beschaffenheit wie Korngröße und Kornform, enthaltene Objekte und Fremdstoffe sowie das Probengewicht.

Fraktion und Charakteristik		PE	PPK	MG Fein
Folien		PE	PPK	MG Fein
KG und KF	Sowohl 2D < 15 cm, als auch voluminöse Folienknäuel von 40 x 20 x 15 cm	Divers, 2D, 3D, < 10 x 10 cm, durchaus große Teile von etwa 30 x 40 x 20 cm	2D, 3D, 20 - 30 cm bzw. 25 x 10 x 5cm	2D, 3D, < 20 cm, 10 x 10 x 5 cm
Produkte	Helle und transparente Folien	Reinigungsmittel- und Shampoo-Flaschen, Kanister, Gießkannen, Kosmetiktuben	Karton, viele Papiertücher, KS-Papier-Verbunde	Diverse Verpackungs-KS, hoher Folienanteil
Fremdstoffe	Kaum, vereinzelt Joghurtbecher und PET-Trays	Wenig, Folien	einige Folien	vereinzelt FE und NE, Papierhandtücher
Probengewicht	8 kg	30 kg	27,5 kg	33 kg
KG und KF	<b>MG Grob</b> 25 cm oder größer, teilweise 50 x 30 x 30 cm große Folienknäuel	<b>PET Flaschen</b> 20 x 5 x 5 cm oder 30 x 10 x 5 cm	<b>Reste</b> 2D, 3D, wenige cm bis > 70 cm	<b>PET Tray</b> Flach, etwa 20 cm
Produkte	Diverse KS-Verpackungen insbesondere Blumentöpfe, Kübel, Säcke, Folien	0,5 - 1,5 Liter transparente, auch grüne und braune Flaschen, etwa die Hälfte mit Deckel, manche mit Sleeve, wenige mit Fullsleeve	Divers, auch Glas, FE und NE	Gemüse- und Obst-Schalen, Käse- und Wurst-Trays, Fleischtassen, Folien
Fremdstoffe	GVK, PET-Flaschen	Wenig, vereinzelt Folien, Blister und PET Trays		Wenige PET Flaschen und NE-Folien/Beutel
Probengewicht	19,5 kg	25,5 kg	44,5 kg	18,5 kg
Vorwiegende Korngröße und Kornform	<b>NE</b> 2D: 15 x 10 cm, 3D: < 20 x 5 x 5 cm	<b>PP</b> 20 - 30 cm, teilweise größer, 2D und 3D	<b>Flakes</b> 2D, 0,5 - 1 cm	<b>GVK</b> 2D, 20 cm
Vorwiegend enthaltene Produkte	Spray- und Konservendosen, Aluminium-KS-Verbunde, Blister, Alufolienknäuel	Joghurteimer, Eis- und Waschtabsboxen, Blumentöpfe, kleine Joghurt- und Aufstrichbecher, Trays	Flakes	GVK
Fremdstoffe	Wenig, kleinere KS-Folien, GVK, EPS	Wenig Folien	keine	
Probengewicht	39,5 kg	21 kg	198,5 kg	37 kg

### 3.2.1 Eingesetzte Sensoren

In den nachfolgenden Abschnitten wird zuerst die verwendete Hard- & Software beschrieben. Anschließend wird ein Überblick über die notwendigen Schritte bei der Parametereinstellung, der Referenzmessung und den Volumenstrommessungen gegeben.

Es wurden zwei LIDAR-Sensoren der Firma SICK eingesetzt (Modell Tim561), wobei eine Ausführung (Advanced High Definition Distance Measurement (HDDM+)) eine Erweiterung der anderen Ausführung (High Definition Distance Measurement (HDDM)) darstellt. Das Sensor-Modell in HDDM+ Ausführung ist speziell zur Distanzmessung von diffus reflektierenden Objekten oder bei Mehrfachreflexion, z.B. aufgrund von Schutzscheiben zwischen Sensor und Messobjekt, ausgelegt. Im weiteren Verlauf der Arbeit werden die Sensoren der Einfachheit halber *Sensor-Modell HDDM* und *Sensor-Modell HDDM+* genannt.

Nachfolgend werden einige technische Daten der beiden Sensor-Modelle HDDM und HDDM+ aufgelistet.

Tabelle 11 - Technische Daten LIDAR-Sensor-Modell TiM561 (SICK AG 2015).

<b>Sensor-Modell TiM561</b>	
Öffnungswinkel radialer Abtastbereich	270° in 1°-Schritten
Winkelauflösung	0,33°
Abtastfrequenz	15 Hz (15 Abtastungen /s)
Ansprechzeit	67 ms (1 Scan)
Abtastbereich	0,05 m..10 m
Mindest-KG Messobjekt	100 mm bei 8 m, 55 mm bei 4 m und 33 mm bei 2 m Tastweite.
Typischer Messfehler	Statistischer (1s): 20 mm Systematischer: ± 60 mm Temperaturdrift: 0,5 mm/K
Lichtquelle	Laserdiode, infrarot, $\lambda = 850 \text{ nm}$
Ausgabeinformation	Radialer Abstand, Reflektivitätswert, Geräte- und Statusinformation und Zeitstempel.
Gerätengewicht	250 g

Folgende Abbildung veranschaulicht einige technische Angaben aus Tabelle 11.

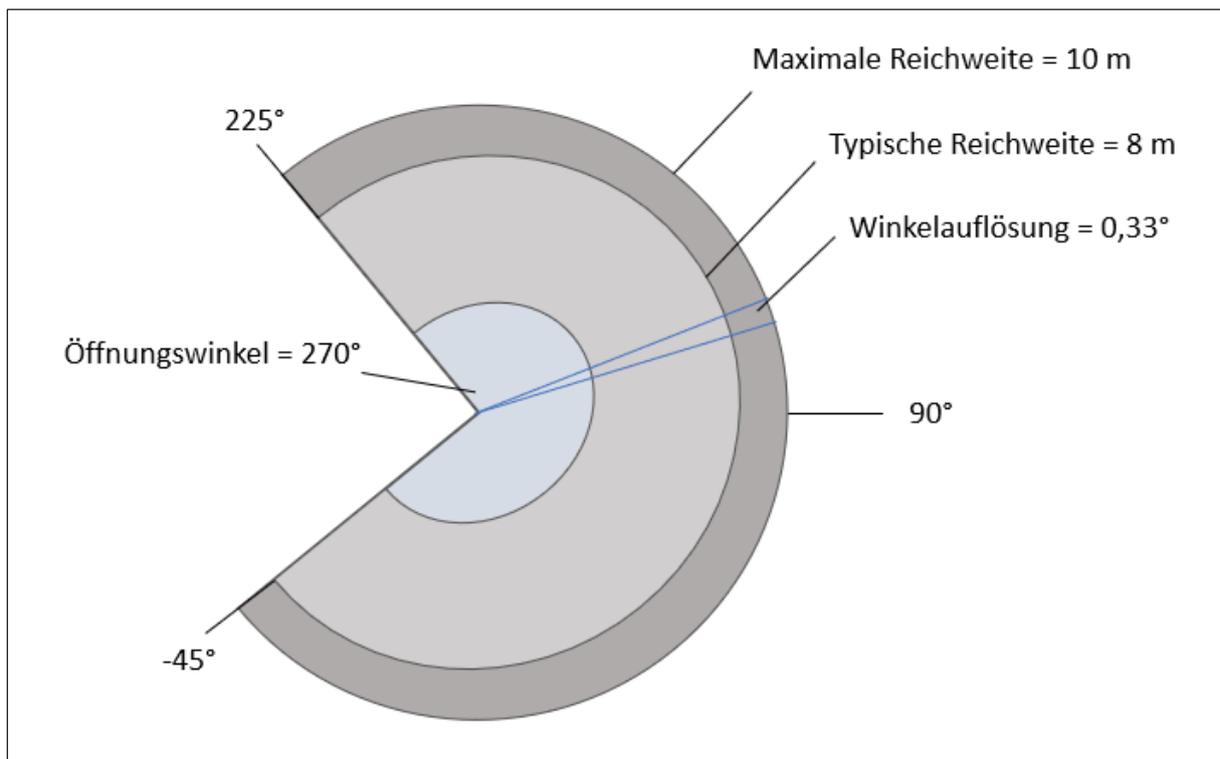


Abbildung 21 - Reichweiten-Diagramm inklusive Winkelauflösung und Öffnungswinkel; erstellt auf Basis von SICK AG (2015).

Der Öffnungswinkel beispielsweise beschreibt das Sichtfeld des Sensors, innerhalb dessen die Oberfläche gescannt werden kann. In der Grundeinstellung werden 271 Messwerte pro Scan erhalten. Die Winkelauflösung gibt an, wie lückenlos Oberflächen gescannt werden können. Das Datenausgabeformat pro Scan enthält u.a. den Messwert (als Radialabstand) in mm und einen Zeitstempel. SICK AG (2015).

Die *SOPAS-Konfigurationssoftware* der Firma SICK AG kann zur Visualisierung der Messkontur verwendet werden. Das ist insbesondere hilfreich, um die Eignung von Parametereinstellungen vor der Aufzeichnung zu überprüfen oder auch zur Fehlerdiagnose, z.B. kann die Remission des gescannten Materials in Echtzeit betrachtet werden. (SICK AG 2015) In SOPAS kann außerdem eine sogenannte *Region of Interest (ROI)* definiert werden, sodass nur Werte, die innerhalb der ROI liegen ausgewertet werden. So können Echos, z.B. aufgrund Spiegelungen, verworfen werden. HDDM+ (High Definition Distance Measurement Plus) stellt eine Weiterentwicklung der HDDM-Technologie dar. Es werden die Echos mehrerer Lichtpulse statistisch ausgewertet. (SICK 2017)

Voraussetzung für die Verwendung der LIDAR-Sensoren ist eine stabile Internetverbindung. Parametereinstellungen werden einerseits in der *SOPAS-Konfigurationssoftware* und andererseits in der *TwinCAT-Automatisierungssoftware* der Firma Beckhoff Automation GmbH & Co. KG (zur speicherprogrammierten Steuerung der Sensoren) vorgenommen.

Parametereinstellung in *SOPAS*:

- Start- und Endwinkel werden festgelegt.

Parametereinstellung in *TwinCAT*:

- Start- und Endwinkel eintragen,
- Förderbandbreite eintragen,
- Bandgeschwindigkeit eintragen,
- Referenzhöhe eintragen (das ist jene Höhe zwischen Sensor und leerem Band),
- Toleranz festlegen,
- Zeitraum für Datenaufzeichnung festlegen (nach Stopp der Aufzeichnung werden Daten als CSV-Datei in eine Cloud geladen).

Referenzmessung:

- Förderband wird geleert und auf grobe Verunreinigungen überprüft,
- Aus 1000 Scans wird der Median als Referenzwert herangezogen.

Volumenstrommessung:

- Volumenstromaufzeichnung in *TwinCAT* starten und stoppen,
- Daten werden als CSV-Datei in einer Cloud gespeichert.

Der dritte Volumenstromsensor, der im Zuge der vorliegenden Arbeit zum Einsatz kam, ist das Modell SAMsoric der Firma VOLPOWER. (Beck 2021) Das Messprinzip dieses Sensors beruht einerseits auf der Laufzeitmessung des ausgestrahlten Lichtes und andererseits auf Stereovision. Dabei werden mindestens zwei Bilder derselben Szene aus verschiedenen Positionen aufgenommen. Im Fall von zwei Bildern, werden die beiden Bildpunkte, die zu einem Punkt im realen Raum gehören (Messobjektoberfläche) miteinander verknüpft. Anschließend erfolgt eine Auswertung anhand der Informationen einer vorherigen räumlichen Kalibrierung des Versuchsstandes und geometrischen Beziehungen, sodass 3D-Koordinaten des Punktes im Raum erhalten werden. (Heckenkamp 2008) Im Fall des SAMsoric wird alle 2 Sekunden ein Bild vom Flächenabschnitt unterhalb des Sensors aufgenommen. Nach Auswertung der akquirierten Daten werden die Messdauer, die Fläche des Abschnitts, das kumulierte Volumen sowie der Volumenstrom (über 10 Sekunden gemittelt) dargestellt.

Folgende Abbildung zeigt das Funktionsprinzip des SAMsoric-Sensors.

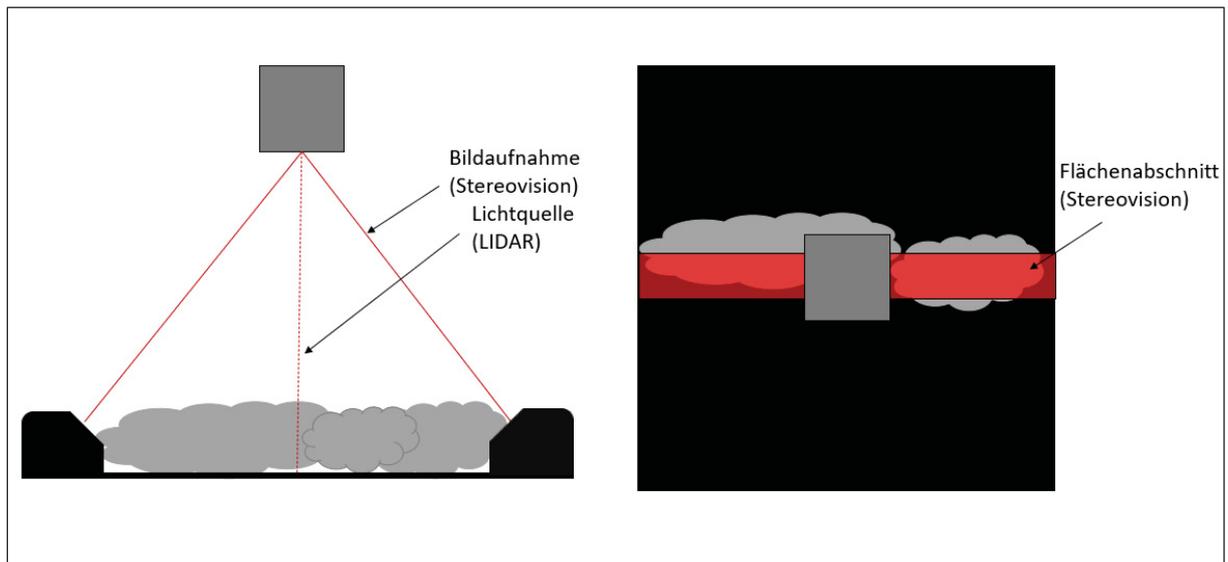


Abbildung 22 - Funktionsweise SAMsoric-Sensor; erstellt auf Basis von (Beck 2021).

Der Sensor ist über einen Webbrowser erreichbar. Die Parametereinstellungen werden auf einer Inbetriebnahmeseite festgelegt, die Referenzmessung sowie die Volumenstrommessungen können auf der Startseite gestartet und gestoppt werden. Voraussetzung dafür ist eine durchgehend stabile Internetverbindung. Im weiteren Verlauf der Arbeit wird dieser Sensor als *Sensor-Modell SAMsoric* bezeichnet.

### 3.3 Versuchsaufbau

Alle Versuchsreihen konnten am selben Versuchsstand durchgeführt werden und haben lediglich teilweise geringe Adaptierungen erfordert. Anschließend wird der allgemeine Versuchsaufbau erläutert.

Abbildung 23 zeigt den Versuchsstand, an dem sämtliche Technikums-Versuche durchgeführt wurden skizzenhaft in Ansicht:

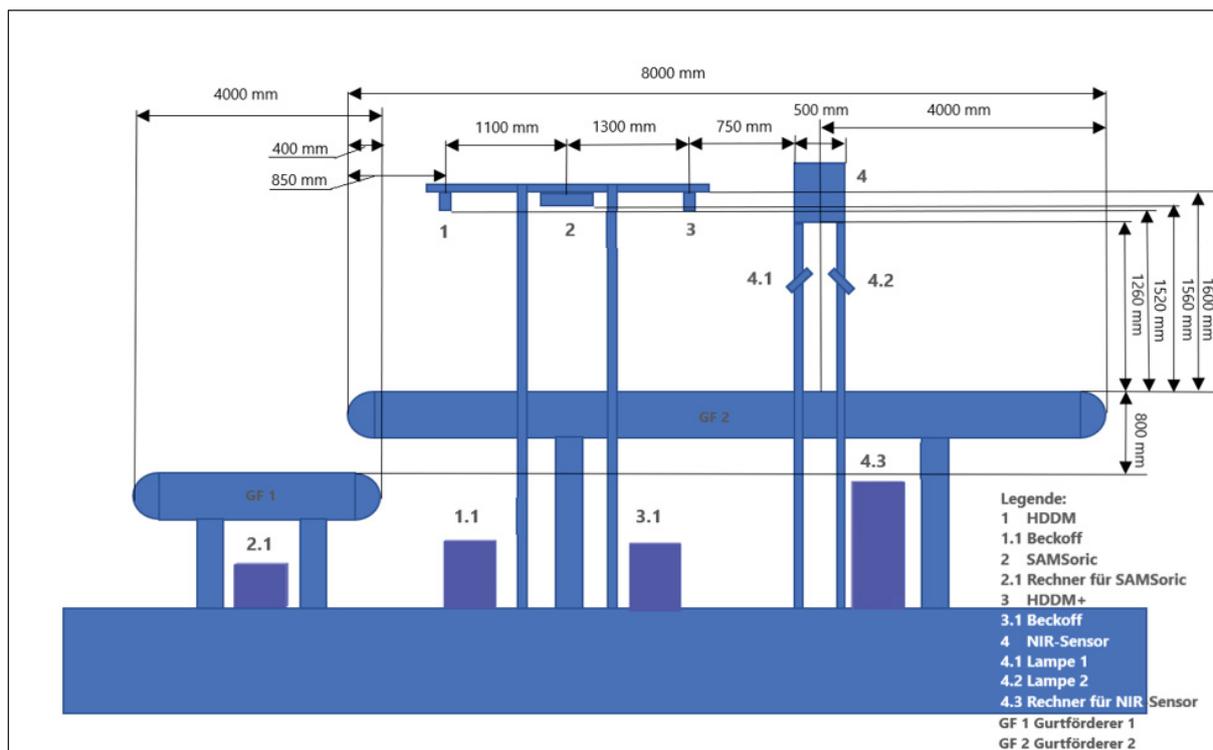


Abbildung 23 - Skizze vom allgemeinen Aufbau des Versuchsstandes (Ansicht, Bemaßt).

Über dem acht Meter (m) langen Gurtförderer (GF) 2, an dessen Anfang die Materialaufgabe erfolgt befindet sich eine Brücke mit einem NIR-Sensor (4) und zwei Lampen (4.1 und 4.2) sowie eine Aluminium-Stahl-Profil-Konstruktion, an der die Volumenstrom-Sensor-Modelle HDDM (1), HDDM+ (3) und SAMSoric (2) befestigt sind. Von GF 2 fällt das aufgegebene Material auf GF 1 und anschließend in ein Behältnis, z.B. eine Absetzmulde. Die speicherprogrammierte Steuerung (SPS) der Sensor-Modelle HDDM und HDDM+ befindet sich in den Schaltschränken 1.1 und 3.1. In Schaltschrank 4.3 befindet sich der Rechner für den NIR-Sensor und 2.1 stellt einen portablen Rechner dar, mithilfe dessen die digitalen Aufzeichnungen der Versuche gestartet und gestoppt wurden.

Die räumliche Verteilung der Sensoren entlang der Stahlkonstruktion über GF 2 war insofern nur eingeschränkt modifizierbar, da beim Anbringen auf die vorhandenen Befestigungsmöglichkeiten an den Sensorgehäusen zurückgegriffen wurde und zusätzlich die Ausrichtung der Sensoren sowie deren Stabilität gegenüber Schwingungen und Vibrationen - verursacht durch den Fördergurtantrieb - berücksichtigt werden mussten. Denn bei Montage

der Sensoren ist darauf zu achten, dass diese im Betrieb keinen Stößen, Erschütterungen oder Vibrationen ausgesetzt sind und die Ausrichtung der Sensoren soll lotrecht über dem Messobjekt auf einen nicht reflektierenden Hintergrund erfolgen (SICK AG 2015). Dadurch ergab sich die Anordnung der Sensoren wie in Abbildung 23 gezeigt und führte dazu, dass LIDAR-Sensor-Modell HDDM+ und NIR-Sensor in naher Entfernung zueinander angebracht wurden. Wie im Laufe der Vorversuche klar wurde, konnte ein Einfluss der NIR-Sensor-Lampen 4.1 und 4.2 auf die Performance der Volumenstrom-Sensoren nicht gänzlich ausgeschlossen werden. Um jedoch den Platzbedarf bei Materialaufgabe nicht weiter einzuschränken wäre lediglich ein geringfügiges Verrücken der NIR-Sensorbrücke in Richtung Anfang des GF 2 möglich gewesen, was eine zeitaufwendige Neukalibration mit sich gebracht hätte, weshalb in weiterer Folge auf den Einsatz des NIR-Sensors verzichtet wurde. Jene anfänglichen Vorversuche und die dazugehörigen Ergebnisse, bei denen die NIR-Lampen eingesetzt wurden, werden dennoch im Zuge dieser Arbeit als Lichteinfluss-Versuche vorgestellt und können als Indikativversuche betrachtet werden.

Abbildung 24 zeigt den Versuchsstand aus Draufsicht; seitlich am Bandquerschnitt befinden sich sogenannte Gummilippen und Abdeckleisten, welche Materialeinzug und -Einklemmen verhindern und in der Skizze bemaßt abgebildet sind. Dadurch ergibt sich auf GF 2 ein freier Bandquerschnitt von 1250 mm und auf GF 1 von 1715 mm, was eine Probenübergabe von GF 2 auf GF 1 ohne Materialverlust ermöglicht.

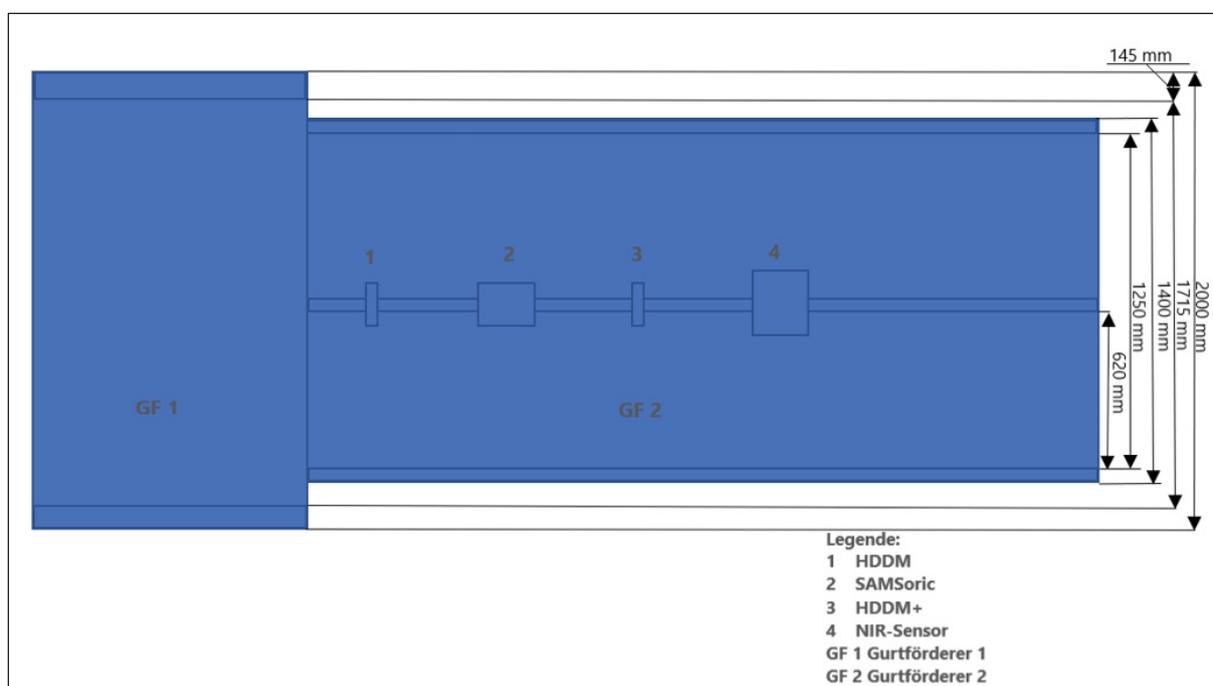


Abbildung 24 - Skizze vom allgemeinen Aufbau des Versuchsstandes (Draufsicht, Bemaßt mit Legende).

Die folgende Abbildung 25 zeigt ein Foto vom Aufbau des Versuchsstandes im Technikum. Bei der Handy-Fotografie wurde die Panorama-Bild-Funktion verwendet, um den gesamten Versuchsstand in einem Foto festhalten zu können, was zu der abgebildeten Fischaugen-

ähnlichen Projektionsweise führte. Zu sehen sind GF 1 und GF 2, vier Sensoren (1, 2, 3 & 4), Lampen des NIR-Sensors (4.1 & 4.2) sowie ein portabler Rechner (2.1) und drei Schaltkästen (1.1, 3.1 & 4.3), wobei jener für den NIR-Sensor Großteils vom Werkzeugwagen im Bildvordergrund verdeckt wird. Die Holzkonstruktion am Ende von GF 1 dient der einfacheren Materialüberführung in den Auffangbehälter, z.B. Mulde, um möglichst geringen Materialverlust pro Durchgang zu erzielen. Die Materialaufgabe erfolgt auf GF 2 in ausreichendem Abstand zu den Sensoren.

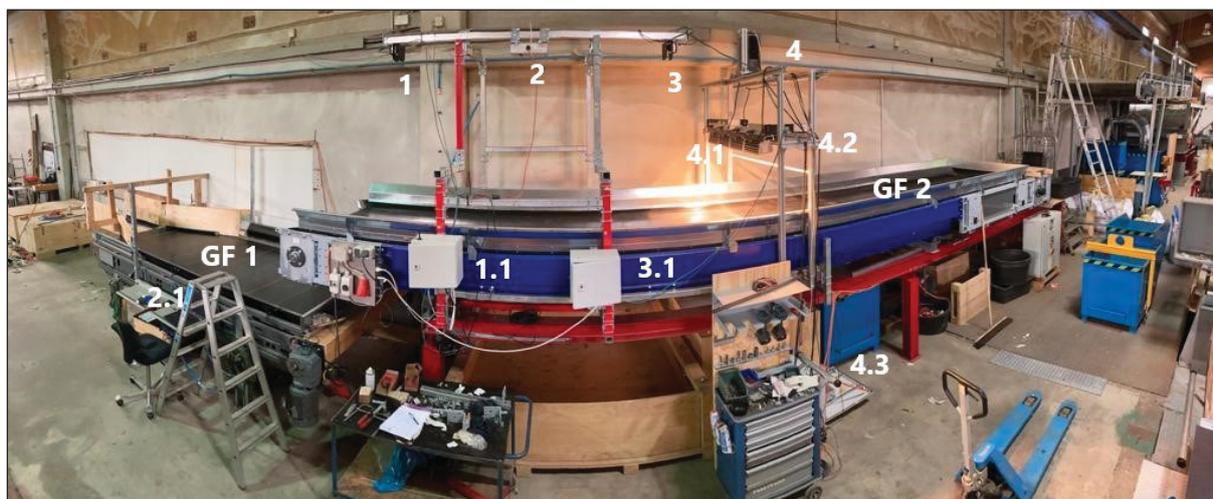


Abbildung 25 - Foto vom allgemeinen Versuchsstand inklusive den Volumenstrom-Sensor-Modellen HDDM (1), SAMSoric (2) und HDDM+ (3), dem NIR-Sensor (4) inklusive zweier Lampen (4.1 & 4.2) sowie den dazugehörigen Schaltkästen (1.1, 3.1 & 4.3) sowie dem portablen Rechner (2.1) und den Gurtförderern GF 1 und G F2 (Ansicht, Nummeriert).

### 3.4 Versuchsdurchführung

Zuerst wird beschrieben, wie die Autorin zu Referenzvolumina gekommen ist, auf die detektierte Volumen bezogen werden konnten. Anschließend werden in den Kapiteln 3.4.2 bis 3.4.6 die einzelnen Versuchsreihen dargestellt.

Die unterschiedlichen Versuche liefen grundsätzlich nach demselben Schema ab und setzten sich aus den folgenden Teilschritten zusammen:

- Eventuell (evtl.) notwendige Adaptionen des Versuchsstandes vornehmen,
- Bereitstellen eines Behältnisses zum lückenlosen Auffangen des Materials nach GF 1,
- Materialaufgabe am stehenden GF 2 inklusive Überprüfung versuchsspezifischer Aufgabevorgaben wie z.B. Erreichen bestimmter Schütthöhen mit Meterstab kontrollieren,
- Startzeit des Versuchs (als Stunden (h)- und Minuten (m)- Angabe in Form von hh:mm) notieren,
- Aufzeichnungsstart aller eingesetzten Sensoren,
- Erst GF 1, dann GF2 in Betrieb nehmen,
- Stoppen von GF 1 und GF 2, sobald gesamtes Probenmaterial im Behältnis nach GF 1 aufgefangen wurde,
- Stoppen der Volumenstrom-Aufzeichnungen aller eingesetzter Sensoren und
- Endzeit des Versuchs (wiederum in Form hh:mm) sowie Auffälliges und Beobachtungen notieren.

Abweichungen zur allgemeinen Herangehensweise bei den individuellen Versuchsreihen existieren und werden im Zuge der detaillierten Versuchsbeschreibungen dargestellt.

#### 3.4.1 Bestimmung des „wahren“ Volumens

Die Volumenproblematik als Resultat einer inhomogenen Schüttdichte von Verpackungsabfällen, wurde bereits in Kapitel 2.1 Leichtverpackungsmaterial hinreichend dargelegt. Nachfolgend wird beschrieben, wie die Autorin im Rahmen der Versuchsdurchführung das „wahre“ Probenvolumen der unterschiedlichen Fraktionen bestimmt hat, um einen Referenzwert zur Validierung der sensorisch gemessenen Probenvolumina zu erhalten.

Dafür wurde zuerst eine Abgrenzung verschiedener Volumenbegriffe und deren Verwendung im weiteren Verlauf der Arbeit festgelegt.

Folgende Tabelle 12 zeigt eine Abgrenzung unterschiedlicher Begrifflichkeiten, welche im weiteren Verlauf dieser Arbeit verwendet werden, um vorliegendes oder detektiertes Volumen zu beschreiben.

Tabelle 12 - Abgrenzung verwendeter Volumen-Begriffe: Begriffe in grün eingefärbten Zellen beschreiben „wahre“ Werte, welche als Referenz für sensorisch gemessene Volumina (orange eingefärbte Zelle) herangezogen werden.

<b>Probenvolumen = Überbegriff</b>				
<i>Feststoffvolumen</i> = Volumen sämtlicher Probenpartikel ohne Porenvolumen der Schüttung	<i>Partikelvolumen</i> = Volumen eines Partikels inklusive des Porenvolumens des Partikels	<i>Schüttvolumen</i> = Gesamtes Volumen sämtlicher eingesetzter Probenpartikel inklusive Porenvolumen der Probenschüttung		
		<b>Wahres Volumen</b> = Arithmetisches Mittel über endliche Anzahl von händisch gemessenen Schüttvolumina in Mulde	<b>Wahres Wannenvolumen</b> = Volumen einer Kunststoffmulde bekannter Abmessungen	<b>Sensorvolumen</b> = sensorisch gemessenes Schüttvolumen am Förderband

Die Tabelle zeigt, dass *Probenvolumen* ein unkonkreter Art Überbegriff ist, mit dem das nicht näher definierte Volumen einer Materialprobe gemeint ist. Es kann grundsätzlich unterschieden werden zwischen Feststoffvolumen, Partikelvolumen und Schüttvolumen.

Dabei beschreibt *Feststoffvolumen* ausschließlich das Volumen des Feststoffes eines Objektes, nicht jedoch darin enthaltendes Porenvolumen, z.B. Hohlräume bei Wellpappe oder Hohlraum eines Flaschenkörpers. Als *Partikelvolumen* wird das Feststoffvolumen einschließlich dem Porenvolumen bezeichnet.

Als *Schüttvolumen* wird im Rahmen der vorliegenden Arbeit jenes Volumen bezeichnet, welches das im Versuch eingesetzte Material einnimmt, wenn dieses aus geringer Höhe in eine Mulde oder auf das Förderband geschüttet wird.

Als *Wahres Volumen* bezeichnet die Autorin der Arbeit jenes Volumen, das die gesamte Materialmenge einer gezogenen Probenfraktion in einer Mulde bekannten Volumens einnimmt.

Einige Versuchsreihen (siehe Kapitel 3.4.4 Bandbelegungsversuche & Kapitel 3.4.6 Wasserversuche) werden nur mit einem Teil des Probenmaterials durchgeführt. Das sensorisch gemessene Volumen wird bei Auswertung dieser Versuche auf das *Wahre Wannenvolumen* bezogen. Damit wird der Rauminhalt einer Kunststoffwanne bezeichnet, deren Abmaße gemessen wurden.

Je nach Versuchsziel wird das von den Sensoren detektierte Volumen der Materialschüttung am Band, das *Sensorvolumen*, auf das *Wahre Volumen* oder das *Wahre Wannenvolumen* bezogen, um die Messrichtigkeit der Sensoren zu untersuchen.

Folgende Abbildung zeigt eine Skizze der Mulde (1) und die KS-Wanne (2), welche zur Bestimmung des *Wahren Volumens* und des *Wahren Wannenvolumens* herangezogen wurden, sowie Beispielbilder von Materialschüttungen unterschiedlicher Fraktionen, zur Bestimmung des *Wahren Volumens* (3, 4 & 5).

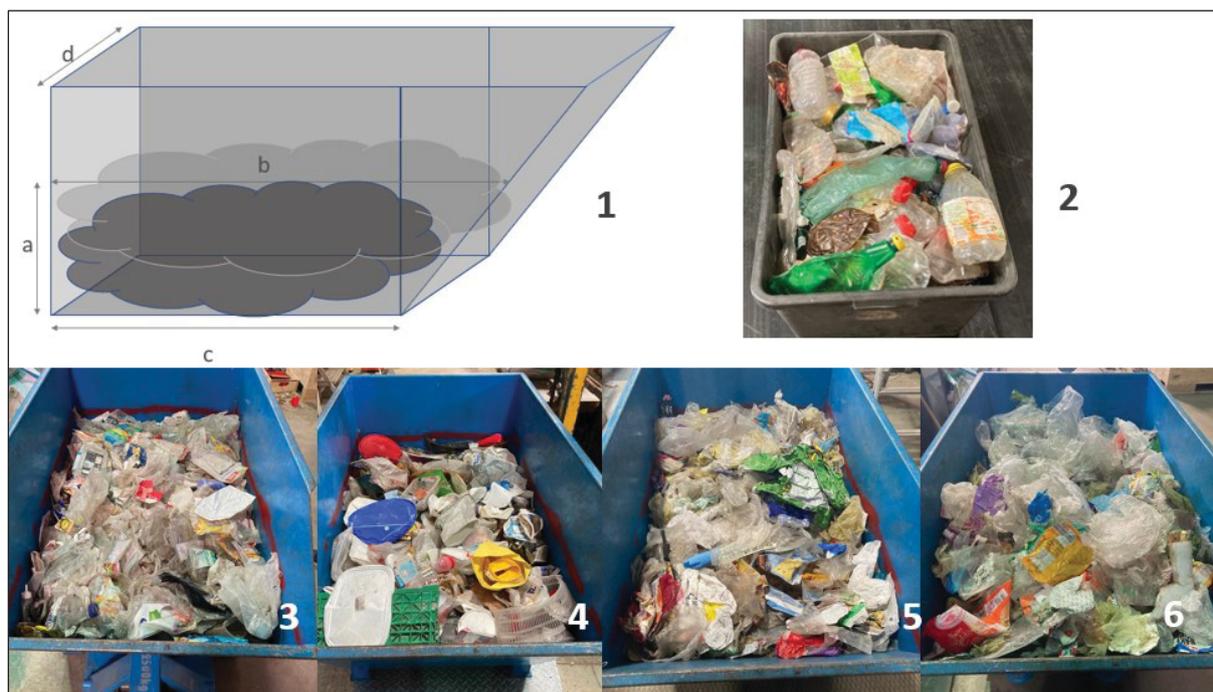


Abbildung 26 - 1) Mulde und 2) KS-Wanne zur Bestimmung des Probenvolumens sowie Beispielbilder vom Schüttvolumen der Fraktionen 3) PET Tray, 4) PP-, 5) Folien vor einem Einzelversuch & 6) Folien nach demselben Einzelversuch.

Die Bestimmung der Schüttvolumina erfolgte im Zuge der Versuchsdurchführungen, jeweils am Ende von Einzelversuchen, nach Auffangen des Probenmaterials in der Mulde. Für die Fraktionen *PET Flaschen*, *PET Tray*, *PE*, *PP*, *GVK*, *MG Grob*, *MG Fein*, *NE*, *PPK* und *Reste* ergaben sich keine offensichtlichen Abweichungen der Schüttvolumina. Bei Fraktion *Folien* wichen die gemessenen Volumina aufeinanderfolgender Versuche augenscheinlich voneinander ab (Vgl. Abbildung 26, 5 & 6), was auf eine Materialauflockerung während der Versuche zurückzuführen ist.

### 3.4.2 Flakes-Referenzversuch

Intention des Flakes-Referenzversuches ist es, Richtigkeit und Wiederholbarkeit der Volumen-Messung aller drei Sensor-Modelle, bei Einsatz einer homogenen Materialschüttung von KS-Flakes, zu untersuchen. Aufgrund des geringen Hohlraumvolumens der Schüttung kann davon ausgegangen werden, dass das Schüttvolumen der Flakes in der Mulde kaum vom Schüttvolumen auf dem Band abweicht und dem *Wahren Volumen* entspricht. Dafür wurde eine Schütthöhe von 300 mm gewählt, sodass Vergleichbarkeit mit den Schütthöhenversuchen aus Kapitel 3.4.3 vorliegt.

In nachfolgender Tabelle wird ein Ausschnitt aus dem Versuchsplan gezeigt, in dem das verwendete Probenmaterial, die eingesetzten Sensor-Modelle, Datum der Versuchsdurchführung und fortlaufende Versuchsnummern vermerkt sind.

Tabelle 13 - Ausschnitt aus dem Versuchsplan mit Angabe eingesetzter Sensor-Modelle, Datum und fortlaufender Versuchsnummer.

Fraktion	Sensor-Modell	Datum	Versuchsnummer				
Flakes	HDDM	25.08.2021	228	229	230	231	232
	HDDM+	25.08.2021	228	229	230	231	232
	SAMSoric	25.08.2021	228	229	230	231	232

Zu Beginn werden konkrete Fragestellungen, auf welche die Versuche Rückschlüsse geben sollen, aufgelistet. Anschließend werden Versuchsaufbau und -durchführung erläutert und veranschaulicht.

- Ist die Volumen-Messung mittels Volumenstromsensoren richtig?
- Ist die Volumen-Messung mittels Volumenstromsensoren präzise?
- Wie groß ist die Wiederholgenauigkeit für aufeinander folgende Messungen desselben Materials?
- Ist ein systematischer Fehler erkennbar, sodass für jedes Sensor-Modell ein Korrekturfaktor formuliert werden kann, der die Abweichung vom „Wahren“ zum gemessenen Volumen beschreibt und evtl. auf die restlichen Probenmaterialien angewendet werden kann?

Der Allgemeine Versuchsaufbau konnte adaptionsfrei verwendet werden.

Die Kunststoff-Flakes werden aus der Mulde auf das stehende Band (GF 2) geschüttet und mit einer Schaufel zu einer gleichmäßigen langgezogenen prismatischen Materialschüttung verteilt, sodass eine Proben-Schütthöhe von 300 mm erreicht wird (siehe Abbildung 27).



Abbildung 27 - Materialaufgabe Flakes-Referenzversuch (Schütthöhenversuch). Mittels Meterstab wurde das Erreichen der angepeilten Schütthöhe kontrolliert.

Die hohe Schüttdichte der Flakes-Probe resultierte in einem Probengewicht von 198,5 kg und hat zu einem außerordentlich geräuschvollen Anfahren des Bandes geführt. Um sicherzustellen, dass das Material mit der anfangs festgelegten Geschwindigkeit von 0,7 m/s unter den Sensoren durchfährt und um die Akquise vermehrter Messpunkte durch eine geringere Bandgeschwindigkeit auszuschließen, wurde für zwei Versuche die Bandgeschwindigkeit beim Anfahren mittels Handtachometer gemessen und ergab, dass jeweils eine Sekunde nach Anfahren des Gleitgurtes eine Bandgeschwindigkeit von 0,7 m/s gemessen werden konnte. Da der Abstand des Probenmaterials zum ersten Sensor jeweils größer einem Meter war kann folglich davon ausgegangen werden, dass die Versuchsbedingungen die gleichen waren, wie für die restlichen Probenmaterialien bzw. das große Gewicht der Flakes-Probe keinen Einfluss auf die Bandgeschwindigkeit ausgeübt hat.

### 3.4.3 Schütthöhenversuche

Intention dieser Versuchsreihen ist, Richtigkeit und Wiederholgenauigkeit der Volumenmessung bei unterschiedlichen Schütthöhen zu untersuchen. Neben der Schütthöhen- soll auch die Materialabhängigkeit der Sensor-Performance betrachtet werden.

Es werden Versuchsreihen bei 150 mm, 300 mm und 550 mm Schütthöhe durchgeführt, die nachfolgend abschnittsweise erläutert werden. Zuvor werden konkrete Fragestellungen formuliert und ein Ausschnitt aus dem Versuchsplan, in dem das verwendete Probenmaterial, die eingesetzten Sensor-Modelle, Datum der Versuchsdurchführung und fortlaufende Versuchsnummern für die Versuchsreihe bei 150 mm Schütthöhe vermerkt sind (Tabelle 14 - Tabelle 16), gezeigt. Anschließend werden Versuchsaufbau und -durchführung erläutert.

#### 150 mm Schütthöhen-Versuch:

- Wie groß ist die Genauigkeit der Volumen-Messung bei einer Material-Schütthöhe von 150 mm?
- Wie groß ist die Wiederholgenauigkeit?
- Ist die Messgenauigkeit materialabhängig?

Tabelle 14 - Ausschnitt aus dem Versuchsplan, der das verwendete Probenmaterial, die eingesetzten Sensoren, Datum und fortlaufende Versuchsnummern für die 150 mm Schütthöhenversuche zeigt.

150 mm Schütthöhe							
Fraktion	Sensor-Modell	Datum	Versuchsnummer				
GVK	HDDM	16.08.2021	100	101	103	104	105
	HDDM+	16.08.2021	100	101	103	104	105
	SAMSoric	16.08.2021	100	101	103	104	105
RESTE	HDDM	24.08.2021	222	223	224	225	226
	HDDM+	24.08.2021	222	223	224	225	226
	SAMSoric	24.08.2021	222	223	224	225	226
PPK	HDDM	24.08.2021	197	198	199	200	201
	HDDM+	24.08.2021	197	198	199	200	201
	SAMSoric	24.08.2021	197	198	199	200	201
PP	HDDM	16.08.2021	110	111	112	113	114
	HDDM+	16.08.2021	110	111	112	113	114
	SAMSoric	16.08.2021	110	111	112	113	114
PET Tray	HDDM	16.08.2021	116	117	118	119	120
	HDDM+	16.08.2021	116	117	118	119	120
	SAMSoric	16.08.2021	116	117	118	119	120
PET Flaschen	HDDM	13.08.2021	88	89	90		
	HDDM+	13.08.2021	88	89	90		
	SAMSoric	13.08.2021	88	89	90		
	HDDM	16.08.2021	91	92	93		
	HDDM+	16.08.2021	91	92	93		
	SAMSoric	16.08.2021	91	92	93		
NE	HDDM	23.08.2021	192	193	194	195	196
	HDDM+	23.08.2021	192	193	194	195	196
	SAMSoric	23.08.2021	192	193	194	195	196
MG Grob	HDDM	20.08.2021	162	163	164	165	166
	HDDM+	20.08.2021	162	163	164	165	166
	SAMSoric	20.08.2021	162	163	164	165	166
MG Fein	HDDM	20.08.2021	167	168	169	170	171
	HDDM+	20.08.2021	167	168	169	170	171
	SAMSoric	20.08.2021	167	168	169	170	171
Folien	HDDM	16.08.2021	121	122	124	125	126
	HDDM+	16.08.2021		122	124	125	126
	SAMSoric	16.08.2021		122	124	125	126

Dieser Versuch konnte nicht für Probenfraktion PE durchgeführt werden, da die KG einzelner Objekte in der Probe > 150 mm waren. Der Allgemeine Versuchsaufbau wurde insofern adaptiert, dass im Abschnitt vor den Sensoren an den Seitenbanden von GF 2 eine Holzkonstruktion mit Abstreifer als Art „Höhenkontrolle“ montiert wurde (siehe Abbildung 28).

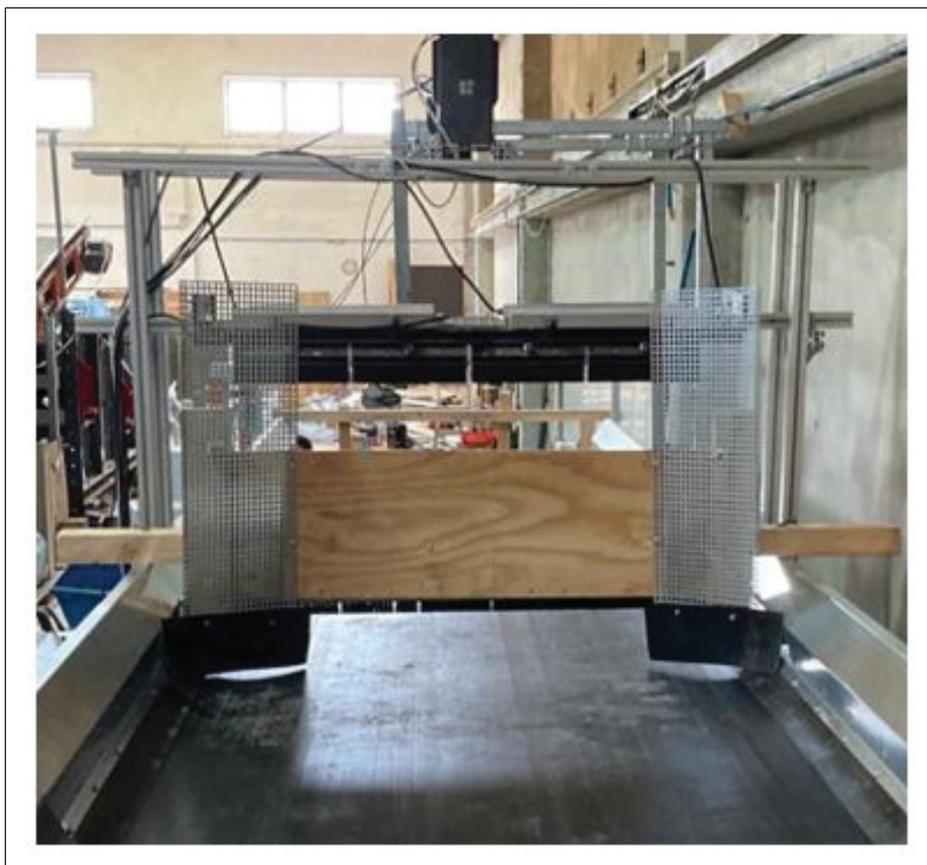


Abbildung 28 - Aufbau adaptierter Versuchsstand: Holzkonstruktion mit Abstreifer dient als Art „Höhenkontrolle“ für die 150 mm Schütthöhenversuche.

Probenmaterial wird aus der Mulde auf das fahrende Band geleert, wobei die Holzkonstruktion sowohl als Art „Höhenkontrolle“ als auch Dosierer dient, sodass eine gleichmäßige Materialmenge von 150 mm Schütthöhe unter den Sensoren durchgeführt wird, welche von GF 2 auf GF 1 und schließlich in eine Auffang-Mulde transportiert wird.

Diese Vorgehensweise resultierte bei manchen Fraktionen in verklemmtem Material unter dem Abstreifer, nachschiebendes Material türmte sich vor der Holzkonstruktion auf und eine Volumenmessung war nicht möglich (siehe Abbildung 30, 1 und 2). Die geringe Ziel-Schütthöhe sowie die allgemein geringe Schüttdichte der Probenmaterialien führten zur Herausforderung, dass die Materialaufgabe nicht – vorab zu einem 150 mm hohen Materialbett drapiert - am stehenden Band erfolgen konnte, da dafür der Platzbedarf vor den Sensoren zu groß war.

Daher wurde wie folgt vorgegangen: Es wurden drei Wannen à 90 Liter auf das Förderband gestellt und das Material aus der Mulde auf das Förderband bzw. in die Wannen geleert. Anschließend wurden die Wannen vom GF 2 weggenommen, auf der Plattform vor den Anfang des GF 2 platziert und das restliche am Band liegende Material in geringfügig größerer Höhe als 150 mm vor dem Abstreifer drapiert (siehe Abbildung 29: 1, 2 und 3). Bei Anfahren des Bandes wurde das Material aus den schwarzen Wannen händisch auf das freiwerdende Band geleert, sodass im Idealfall ein gleichmäßiger Materialstrom zustande kam.



Abbildung 29 - – Um eine Materialverstopfung unter der 150 mm hohen „Höhenkontrolle“ durch nachschiebendes Material zu vermeiden, wurde zur Materialaufgabe ein Teil der Probe als Materialbett auf dem stehenden Band verteilt und ein Teil aus den Wannen auf das freiwerdende fahrende Band geleert. 1) Materialaufgabe der Folien-lastigen Mittelgut Grob-Fraktion, 2) Materialaufgabe Mittelgut Fein-Fraktion und 3) Materialaufgabe NE-Fraktion.

Nachdem sich bei der Versuchsdurchführung materialspezifische Unterschiede zeigten, werden diese nachfolgend beschrieben:

Die Fraktionen *PET Flaschen*, *PP*, *Mittelgut Fein* und *NE* zeigten sich bezüglich Materialaufgabe unproblematisch, sie konnte wie im ersten Absatz der Versuchsbeschreibung dargestellt, durchgeführt werden. Für die *PET Tray*-Fraktion musste ein Versuch wegen verkeiltem Material verworfen werden. Bei den Versuchen mit *GVK* mussten etliche Versuche verworfen werden, da das Material stark zum Verstopfen unter dem Abstreifer neigte. Erfolgreich konnte der Versuch erst durchgeführt werden, indem nach Materialaufgabe sich vor dem Abstreifer verkeilendes Material umgehend mit einer Art Heugabel aufgelockert wurde. Die *Mittelgut Grob*-Fraktion neigte teilweise zum Verkeilen vor dem Abstreifer. Mitgerissene Folien näherten sich hinter dem Abstreifer ihrem ursprünglichen Volumen an und zeigten Schütthöhen größer 150 mm.

Für die Folien bestand die Annahme, dass einzelne Folien durch nachfolgendes Material unter den Abstreifer geschoben werden und nachfolgendes Material mitziehen werden, was sich jedoch nicht bewahrheitete, die Folien türmten sich fast ausnahmslos vor dem Abstreifer auf (siehe Abbildung 30, 1 und 2). Verschiedene Herangehensweisen folgten, welche alle zum gleichen Ergebnis führten:

- um dem Effekt des nachschiebenden Materials zu entgehen, erfolgte die Materialaufgabe weniger Folien, die aus Wannen auf das Band gekippt wurden,

- Folien wurden vereinzelt auf dem Band vor dem Abstreifer drapiert,
- Folien wurden als Art „Anfahrtsilfe“ zu Teilen unter dem Abstreifer durchgestopft, um ein Mitreißen der restlichen Folien zu provozieren, was jedoch in weit größeren Schütthöhen als 150 mm nach und weiterhin Materialstau vor dem Abstreifer resultierte.

Um den Versuch dennoch durchführen zu können wurde der Abstreifer abmontiert und das Material als 150 mm hohes Schüttbett auf dem stehenden Band verteilt (siehe Abbildung 30, 3). Durch das Verteilen der Folien ergab sich ein sehr großes Volumen, sodass der Containerinhalt auf 2,5 Bandlängen, also drei Durchgänge pro Einzelversuch aufgeteilt werden musste. Durch dieses Aufteilen und „Zerfleddern“ der Folienprobe wurde nach jedem Durchgang ein voneinander abweichendes *Wahres Volumen* gemessen, was in der Ergebnis-Interpretation berücksichtigt werden soll.



Abbildung 30 – Herausforderungen in der Materialaufgabe beim 150 mm Schütthöhenversuch. 1) Insbesondere Folien-lastiges Material türmte sich vor dem Abstreifer, 2) Versuche, das Material am laufenden Band aufzulockern, blieben erfolglos und 3) Der Abstreifer wurde abmontiert und die Folienfraktion als 150 mm hohes Schüttbett auf dem stehenden Band verteilt, wofür aufgrund der geringen Materialdichte mehrere Bandlängen notwendig waren.

#### 300 mm Schütthöhenversuch:

- Wie groß ist die Genauigkeit der Volumen-Messung bei einer Material-Schütthöhe von 300 mm?
- Wie groß ist die Wiederholgenauigkeit?
- Ist die Messgenauigkeit materialabhängig?

Tabelle 15 - Ausschnitt aus dem Versuchsplan, der das verwendete Probenmaterial, die eingesetzten Sensoren, Datum und fortlaufende Versuchsnummern für die 300 mm Schütthöhenversuche zeigt.

Fraktion	Sensor-Modell	Datum	Versuchsnummer									
GVK	HDDM	10.08.2021	41	42								
	HDDM+	10.08.2021	41	42								
	SAMSoric	10.08.2021	41	42								
	HDDM	12.08.2021	83	84	85							
	HDDM+	12.08.2021	83	84	85							
	SAMSoric	12.08.2021	83	84	85							
RESTE	HDDM	24.08.2021	217	218	219	220	221					
	HDDM+	24.08.2021	217	218	219	220	221					
	SAMSoric	24.08.2021	217	218	219	220	221					
PPK	HDDM	24.08.2021	202	203	204	205	206					
	HDDM+	24.08.2021	202	203	204	205	206					
	SAMSoric	24.08.2021	202	203	204	205	206					
PP	HDDM	11.08.2021	73	74	75	76	77					
	HDDM+	11.08.2021	73	74	75	76	77					
	SAMSoric	11.08.2021	73	74	75	76	77					
PET Tray	HDDM	11.08.2021	63	64	65	66	67					
	HDDM+	11.08.2021	63	64	65	66	67					
	SAMSoric	11.08.2021	63	64	65	66	67					
PET Flaschen	HDDM	10.08.2021	43	44	45	46	47	48	49	50	51	52
	HDDM+	10.08.2021	43	44	45	46	47	48	49	50	51	52
	SAMSoric	10.08.2021	43	44	45	46	47	48	49			
PE	HDDM	11.08.2021	68	69	70	71	72					
	HDDM+	11.08.2021	68	69	70	71	72					
	SAMSoric	11.08.2021	68	69	70	71	72					
NE	HDDM	23.08.2021	187	188	189	190	191					
	HDDM+	23.08.2021	187	188	189	190	191					
	SAMSoric	23.08.2021	187	188	189	190	191					
MG Grob	HDDM	20.08.2021	157	158	159	160	161					
	HDDM+	20.08.2021	157	158	159	160	161					
	SAMSoric	20.08.2021	157	158	159	160	161					
MG Fein	HDDM	23.08.2021	172	173	174	175	176					
	HDDM+	23.08.2021	172	173	174	175	176					
	SAMSoric	23.08.2021	172	173	174	175	176					
Folien	HDDM	12.08.2021	78	79	80	81	82					
	HDDM+	12.08.2021	78	79	80	81	82					
	SAMSoric	12.08.2021	78	79	80	81	82					
Flakes	HDDM	25.08.2021	228	229	230	231	232					
	HDDM+	25.08.2021	228	229	230	231	232					
	SAMSoric	25.08.2021	228	229	230	231	232					

Der Allgemeine Aufbau des Versuchsstandes konnte für die 300 mm Schütthöhenversuche unverändert genutzt werden (siehe Abbildung 31).

Die Mulde mit dem Probenmaterial wurde mittels Krans über das Band geführt und durch zweimaliges Kippen geleert, sodass auf dem Band zwei große Materialhaufen vorlagen. Diese wurden anschließend zu einem langgestreckten, 300 mm hohen trapezförmigen Materialhaufen verteilt, indem das seitlich an den Banden liegende Material zwischen die beiden Haufen locker verteilt wurde. Hierbei wurde darauf geachtet, dass das Material von den Seitenwänden nicht in die Materialhaufen hineingeschoben, sondern daraufgelegt wurde, um die Material-Schüttdichte und folglich das zu messende Volumen nach Möglichkeit nicht zu manipulieren. Das Erreichen einer Schütthöhe von 300 mm wurde in jedem Einzelversuch an mehreren Stellen mit dem Meterstab kontrolliert.

Die 300 mm Schütthöhenversuche konnten für die Fraktionen *GVK*, *Reste*, *PPK*, *PE*, *PET Tray*, *PP*, *PET Flaschen*, *NE*, *PE*, *MG Grob* und *MG Fein* planmäßig wie oben beschrieben durchgeführt werden. Auch für die Fraktion *Folien* konnten die Versuche planmäßig durchgeführt werden, es wurde allerdings ab dem dritten Versuchs-Durchgang festgestellt, dass augenscheinlich ein größeres *Wahres Volumen* beim Auffangen des Materials am Ende von GF 1 in der Mulde vorlag, welches notiert wurde, sodass bei der Auswertung, die vom LIDAR Sensor gemessenen Volumina mit den individuellen *Wahren Volumina* verglichen werden können. Für den 300 mm Schütthöhenversuch mit der Fraktion *Flakes* gilt die Vorgehensweise wie in Kapitel 3.4.2 *Flakes-Referenzversuch* beschrieben.

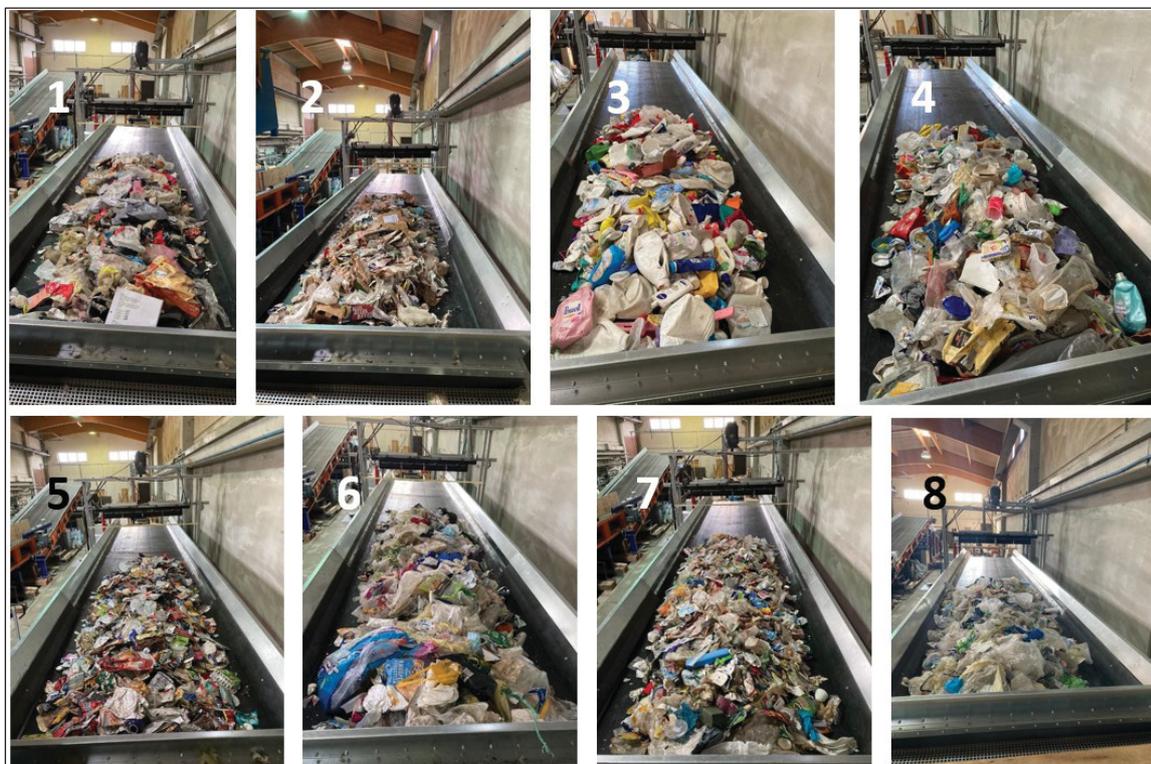


Abbildung 31 – Materialaufgabe beim 300 mm Schütthöhenversuch. Beispielfotos für die Fraktionen: 1) *Reste*, 2) *PPK*, 3) *PE*, 4) *PP*, 5) *NE*, 6) *MG Grob*, 7) *MG Fein* und 8) *Folien*.

550 mm Schütthöhenversuch:

- Wie groß ist die Genauigkeit der Volumen-Messung bei einer Material-Schütthöhe von 550 mm?
- Wie groß ist die Wiederholgenauigkeit?
- Ist die Messgenauigkeit materialabhängig?

Tabelle 16 - Ausschnitt aus dem Versuchsplan, der das verwendete Probenmaterial, die eingesetzten Sensoren, Datum und fortlaufende Versuchsnummern für die 550 mm Schütthöhenversuche zeigt.

Fraktion	Sensor-Modell	Datum	Versuchsnummer				
GVK	HDDM	17.08.2021	137	138	139	140	141
	HDDM+	17.08.2021	137	138	139	140	141
	SAMSoric	17.08.2021	137	138	139	140	141
RESTE	HDDM	24.08.2021	212	213	214	215	216
	HDDM+	24.08.2021	212	213	214	215	216
	SAMSoric	24.08.2021	212	213	214	215	216
PPK	HDDM	24.08.2021	207	208	209	210	211
	HDDM+	24.08.2021	207	208	209	210	211
	SAMSoric	24.08.2021	207	208	209	210	211
PP	HDDM	17.08.2021	142	143	144	145	146
	HDDM+	17.08.2021	142	143	144	145	146
	SAMSoric	17.08.2021	142	143	144	145	146
PET Tray	HDDM	17.08.2021	147	148	149	150	151
	HDDM+	17.08.2021	147	148	149	150	151
	SAMSoric	17.08.2021	147	148	149	150	151
PET Flaschen	HDDM	17.08.2021	127	128	129	130	131
	HDDM+	17.08.2021	127	128	129	130	131
	SAMSoric	17.08.2021	127	128	129	130	131
NE	HDDM	23.08.2021	182	183	184	185	186
	HDDM+	23.08.2021	182	183	184	185	186
	SAMSoric	23.08.2021	182	183	184	185	186
MG Grob	HDDM	20.08.2021	152	153	154	155	156
	HDDM+	20.08.2021	152	153	154	155	156
	SAMSoric	20.08.2021	152	153	154	155	156
MG Fein	HDDM	23.08.2021	177	178	179	180	181
	HDDM+	23.08.2021	177	178	179	180	181
	SAMSoric	23.08.2021	177	178	179	180	181
Folien	HDDM	17.08.2021	132	133	134	135	136
	HDDM+	17.08.2021	132	133	134	135	136
	SAMSoric	17.08.2021	132	133	134	135	136

Der allgemeine Aufbau konnte großteils unverändert genutzt werden. Als Orientierungshilfe und Art Höhenkontrolle wurde in 550 mm Höhe über GF2 an der Metallkonstruktion des allgemeinen Aufbaus ein Malerband angebracht (siehe Fotos in Abbildung 32).

Probenmaterial wird aus der Mulde auf das Band geleert, sodass mittig ein großer Materialhaufen vorliegt. Anschließend wird das Material von den Seiten weggenommen und dem Haufen in Höhe oder Länge zugeführt, sodass ein trapezförmiger länglicher Haufen von 550 mm Schütthöhe vorliegt. Dabei wurde ein weiteres Mal darauf geachtet, das an den Seitenbänden liegende Material nicht in den Haufen zu schieben, um die Material-Schüttdichte nicht zu manipulieren. Das Erreichen einer Schütthöhe von 550 mm Höhe wurde mit dem Meterstab an mehreren Stellen kontrolliert.

Die *PET Flaschen* ließen sich gut stapeln und neigten kaum zum Wegrollen. Aufgrund der großen Schütthöhe und dem nunmehr geringeren Abstand vom Material zum Sensor bestand das Risiko von Verschattungen, also dass höher gelegenes Material insbesondere die seitlichen Grenzbereiche des Materialhaufens verdecken. Daher wurde für zwei Durchgänge die Sensordarstellung in SOPAS beobachtet, was keinen Hinweis auf Verschattungseffekte brachte, da die Seitenränder abgebildet wurden. Dennoch wurden vorsichtshalber die Materialhaufen ab der dritten Schüttung geringfügig schmaler und langgezogener aufgeschüttet, sodass mit großer Sicherheit die gesamte Haufenbreite aufgenommen werden konnte. In der Datenauswertung soll auf entsprechende Hinweise geachtet werden.

Für die Fraktionen *GVK*, *PP*, *PET Tray*, *PPK*, *Reste*, *NE* und *Mittelgut Fein* konnten die Versuche wie oben beschrieben durchgeführt werden. Auch Fraktion *Folien* konnte planmäßig gehandhabt werden, resultierte allerdings in einem wesentlich längeren Materialhaufen (vergleiche in Abbildung 32, *Folienfraktion* und z.B. *GVK*). Bei Fraktion *Mittelgut Grob* fiel auf, dass bei jedem Versuch unterschiedlich lange Materialhaufen zustande kamen, was auf die Folien-Lastigkeit dieser Fraktion zurückgeführt werden kann. Es ist davon auszugehen, dass sich in den einzelnen Versuchsdurchgängen die Position größerer Folien auf das Volumen auswirkt, also liegt ein Großteil der Folien flachgedrückt unterhalb der restlichen Probe oder bauschig oben auf. (siehe Abbildung 32, 8).

Die folgende Abbildung zeigt beispielhaft für 550 mm Schütthöhenversuche die Materialaufgabe unterschiedlicher Fraktionen am stehenden Band:

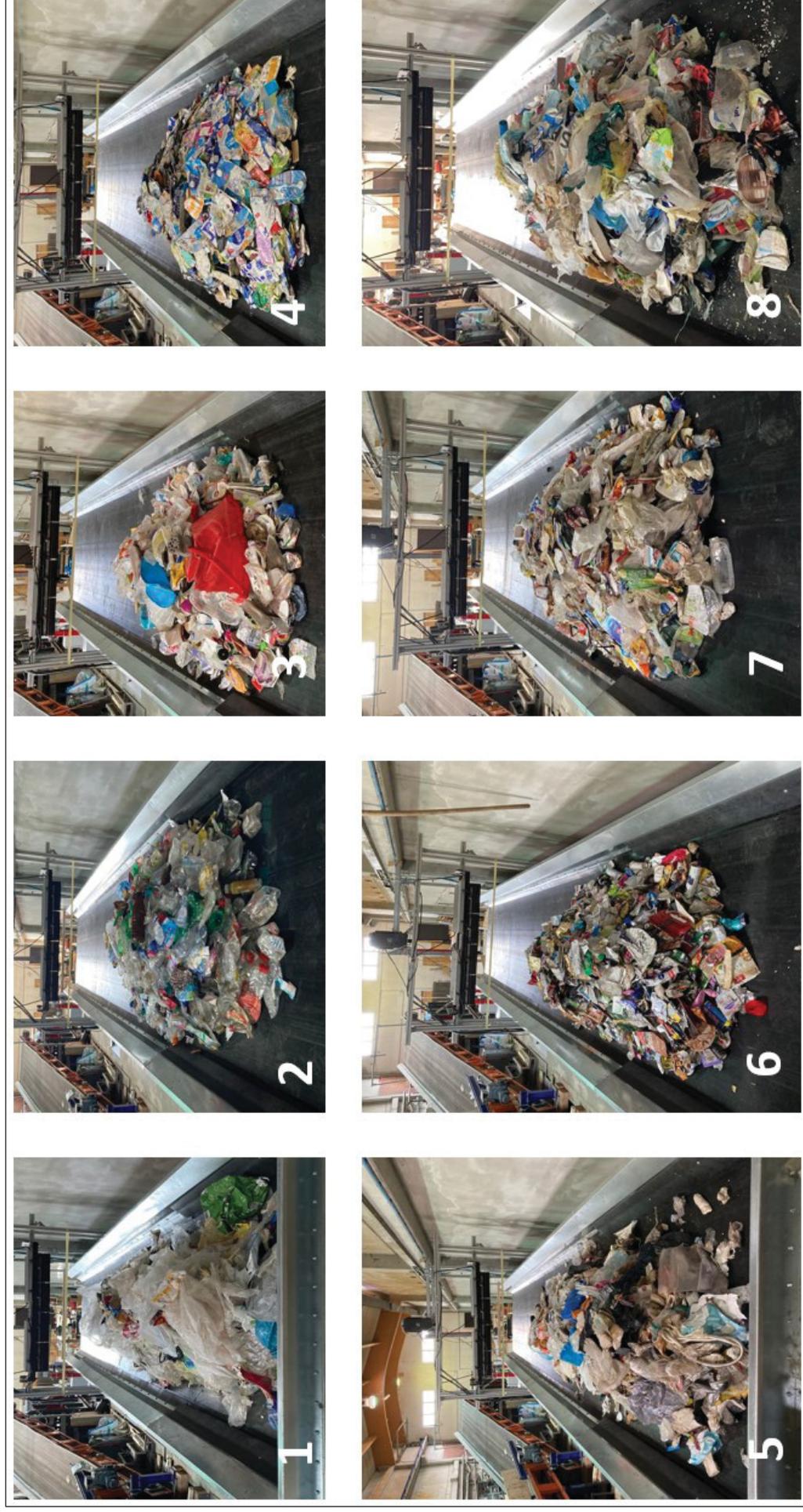


Abbildung 32 - Materialaufgabe beim 550 mm Schütthöhenversuch, unterhalb der NIR-Sensor-Lampen ist das Materband als Orientierungshilfe und Höhenkontrolle zu sehen. Zusätzlich wurde das Erreichen von 550 mm Schütthöhe mit einem Meterstab kontrolliert. Beispielfotos für die Fraktionen 1) Folien, 2) PET-Flaschen, 3) PP, 4) GVK, 5) Reste, 6) NE, 7) MG Fein und 8) MG Grob.

### 3.4.4 Bandbelegungsversuche

Intention der Bandbelegungsversuche ist die Richtigkeit der Sensor-Messergebnisse für GVK – eine Fraktion, deren Einzelobjekte Großteils gleichförmig vorkommen (1 Liter Behältnis mit immergleichen Abmessungen) zu untersuchen, indem ein und dieselbe Materialmenge auf unterschiedliche Art aufgegeben wird. Die erhaltenen Messergebnisse sollen einander gegenübergestellt werden und im Idealfall übereinstimmen.

Erst werden konkrete Fragestellungen, auf welche die Versuche Rückschlüsse geben sollen, formuliert und ein Ausschnitt aus dem Versuchsplan gezeigt, in dem das verwendete Probenmaterial, die eingesetzten Sensor-Modelle, Datum der Versuchsdurchführung und fortlaufende Versuchsnummern vermerkt sind. Anschließend werden Versuchsaufbau und -durchführung erläutert und veranschaulicht.

- Welches Volumen misst der Sensor, wenn eine bestimmte Probenmaterialmenge als Monoschicht auf dem Band verteilt vorliegt?
- Welches Volumen misst der Sensor bei 200 %-iger Bandbelegung mit demselben Material und derselben Materialmenge?
- Welches Volumen misst der Sensor bei 400 %-iger Bandbelegung mit demselben Material und derselben Materialmenge?

Tabelle 17 - Ausschnitt aus dem Versuchsplan, der das verwendete Probenmaterial, die eingesetzten Sensoren, Datum und fortlaufende Versuchsnummern für die Bandbelegungsversuche zeigt.

Fraktion	Bandbelegung	Sensor-Modell	Datum	Versuchsnummer								
				15*	16*	17*	18*	19*	20*	21*	22	23
GVK	100 %	HDDM	09.08.2021	15*	16*	17*	18*	19*	20*	21*	22	23
		SAMSoric	09.08.2021	15*	16*	17*	18*	19*	20*	21*	22	23
	200 %	HDDM	09.08.2021	24	25	26	27	28	29	30		
		HDDM+	09.08.2021			26	27	28	29	30		
		SAMSoric	09.08.2021	24	25	26	27	28	29	30		
	400 %	HDDM	10.08.2021	31	32	33	34	35	36	37		
		HDDM+	10.08.2021	31	32	33	34	35	36	37		
		SAMSoric	10.08.2021	31	32	33	34	35	36	37		

Für die Bandbelegungs-Versuche konnte der Allgemeine Versuchsaufbau adaptionsfrei verwendet werden.

Für die Versuchsreihe *Monoschicht (100% Bandbelegung)* wurde eine Wanne bekannten Volumens bis zur Oberkante mit GVK gefüllt. Das Probenmaterial wurde anschließend auf dem stehenden Band verteilt, indem alle Einzelobjekte möglichst lückenlos aneinandergelegt wurden, sodass eine fast 100-prozentige Bandbelegung zustande kam (siehe Abbildung 33, 1). Die Volumenstrom-Messung und Materialaufgabe erfolgte für alle Einzelversuche mit demselben Material und auf gleiche Weise.

Für die Versuchsreihe *200% Bandbelegung* wurde dasselbe Material wie in *Monoschicht (100% Bandbelegung)* herangezogen, wobei die Materialaufgabe folgendermaßen erfolgte: etwa die Hälfte der Einzelobjekte wurde möglichst lückenlos nebeneinander auf das Band gelegt, die restlichen GVK wurden als Art „zweite Lage“ auf die erste Schicht Einzelobjekte gelegt (siehe Abbildung 33). Es wurde dabei nicht darauf geachtet, nur exakt gleiche Formen übereinander zu legen, sodass Lücken zwischen den Einzelobjekten der ersten Schicht von darüber liegendem Material teilweise verdeckt wurden. Daher sollte das bei den *200 % Bandbelegung*-Versuchen gemessene Volumen geringfügig größer sein als jenes der *Monoschicht*-Versuche.

Für die Versuchsreihe *400% Bandbelegung* wurde dasselbe Material wie in den Versuchen *Monoschicht (100% Bandbelegung)* und *200% Bandbelegung* herangezogen. Diesmal wurden die Einzelobjekte in vier Schichten oder Lagen möglichst lückenlos nebeneinander auf das Band gelegt (siehe Abbildung 33). Es wurde wiederum nicht darauf geachtet, nur exakt gleiche Formen übereinander zu legen, sodass Lücken zwischen den Einzelobjekten der unteren Lagen von darüber liegendem Material verdeckt wurden, weshalb das bei den *400% Bandbelegung*-Versuchen gemessene Volumen geringfügig größer sein sollte als jenes der *Monoschicht*- und *200%-Bandbelegung*-Versuchen.

Die folgende Abbildung 33 zeigt die Materialaufgabe für die *100%-*, *200%-* und *400%-Bandbelegung*-Versuche.

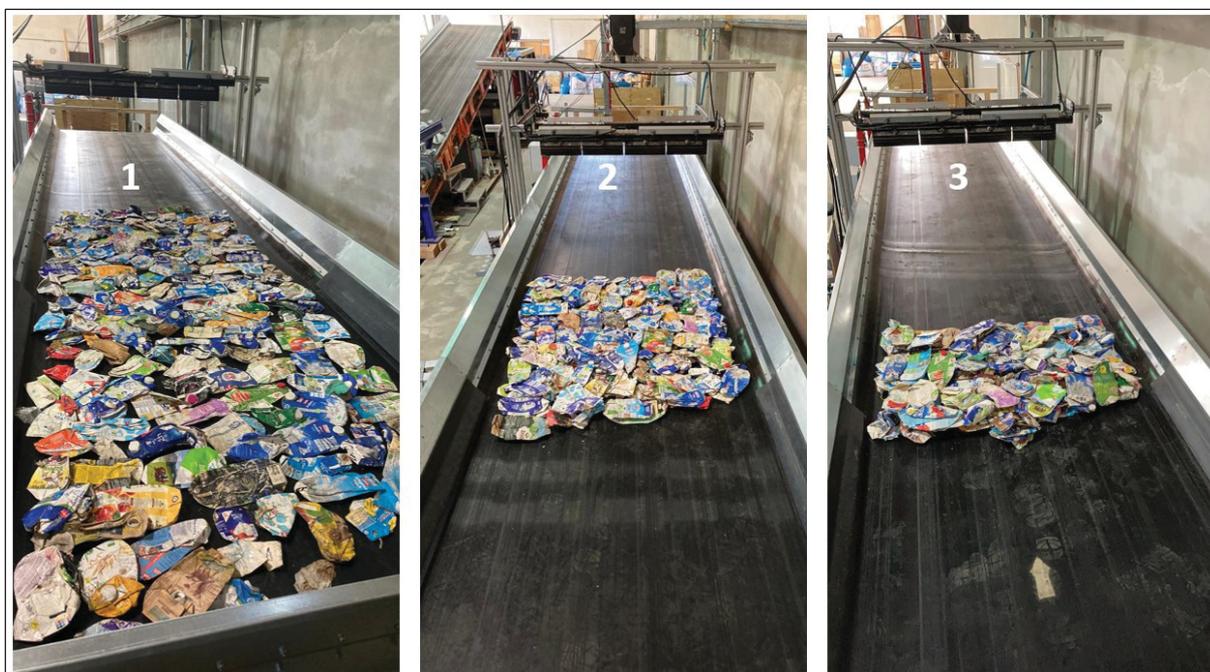


Abbildung 33 – Materialaufgabe von GVK als 1) *Monoschicht*, 2) *200%-Bandbelegung* (zwei Einzelobjekte GVK liegen übereinander) und 3) *400%-Bandbelegung* (vier Einzelobjekte GVK liegen übereinander) bei den Bandbelegungsversuchen.

### 3.4.5 Untersuchung des Lichteinflusses

Der Einfluss von nahen Lichtquellen auf die Sensorperformance (Richtigkeit und Wiederholgenauigkeit) wird im Zuge der vorliegenden Arbeit lediglich in beschränktem Rahmen untersucht. Bei Befestigung der Sensoren wurde zwischen den Volumenstrom-Sensoren und den Lampen der NIR-Einheit der baulich größtmögliche Abstand gewählt, dennoch ist nicht klar, ob die NIR-Lampen als nahe Lichtquelle Einfluss auf die Performance der Sensoren insbesondere das räumlich am nächsten positionierte Sensor-Modell HDDM+ hat. Aufschluss sollen die *Sensorvolumen*-Daten aus Versuchen geben, welche mit zwei unterschiedlichen Fraktionen (*GVK* und *PET Flaschen*) bei zweifacher eingeschalteter Lichtquelle stattgefunden haben.

Erst werden konkrete Fragestellungen, auf welche die Versuche Rückschlüsse geben sollen, formuliert und ein Ausschnitt aus dem Versuchsplan gezeigt, in dem das verwendete Probenmaterial, die eingesetzten Sensor-Modelle, Datum der Versuchsdurchführung und fortlaufende Versuchsnummern vermerkt sind. Anschließend werden Versuchsaufbau und -durchführung erläutert und veranschaulicht.

- Welchen Einfluss haben die NIR-Lampen auf die Messergebnisse der Volumenstrom-Sensoren?

Tabelle 18 - Ausschnitt aus dem Versuchsplan, der das verwendete Probenmaterial, die eingesetzten Sensoren, Datum und fortlaufende Versuchsnummer für die Licht-Einfluss-Versuche zeigt. Jene Versuchsnummern sind mit einem Stern\* gekennzeichnet, wenn die Lampen während des Versuchs eingeschalten waren.

Fraktion	Sensor-Modell	Datum	Versuchsnummer									
			38*	39*	40*	41	42					
GVK	HDDM	10.08.2021	38*	39*	40*	41	42					
	HDDM+	10.08.2021	38*	39*	40*	41	42					
	SAMSoric	10.08.2021	38*	39*	40*	41	42					
PET Flaschen	HDDM	10.08.2021	53*	54*	55*	56*	57*	58*	59*	60*	61	62
	HDDM+	10.08.2021	53*	54*	55*	56*	57*	58*	59*	60*	61	62
	SAMSoric	10.08.2021	53*	54*	55*	56*	57*	58*	59*	60*		

Für die beiden Versuchsreihen konnte der Allgemeine Versuchsaufbau adaptionsfrei verwendet werden.

#### Versuch mit GVK:

Probenmaterial wird durch zweimaliges Kippen der Mulde auf das stehende Band geleert, sodass zwei Materialhaufen vorliegen. GVK, welcher sich seitlich an beziehungsweise nahe der Seitenbande befand, wurde zwischen die beiden Haufen gelegt, sodass diese zu einem lang gezogenen Haufen verbunden wurden (siehe Abbildung 34). So sollte sichergestellt werden, dass sich kein Material außerhalb des Sichtkegels der Sensoren befand und

vermieden werden, dass durch Zusammenschieben des Materials die Schüttdichte am Band manipuliert wird.

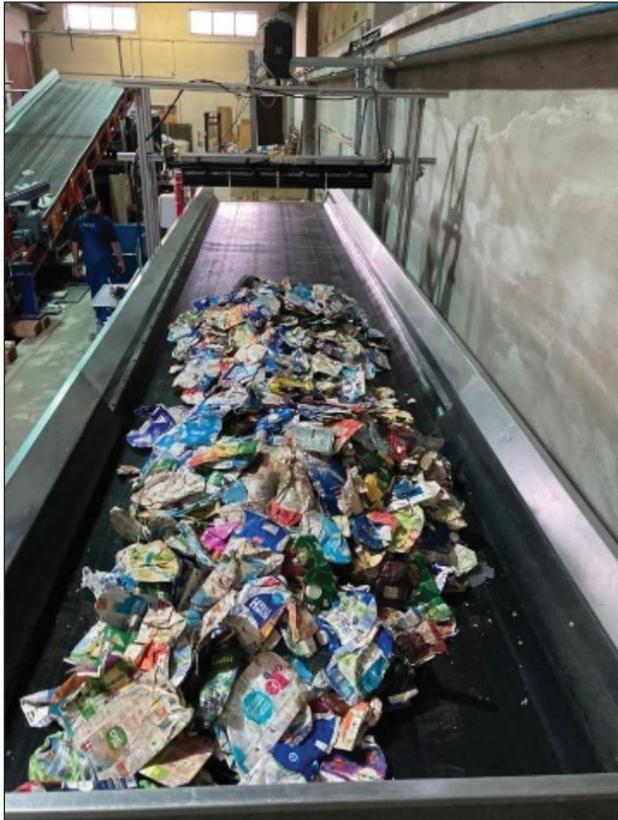


Abbildung 34 - Materialaufgabe durch zweimaliges Kippen der Mulde und seitlichem Räumen der GVKs zwischen die beiden Haufen zur Untersuchung des Lichteinflusses.

Versuch mit PET-Flaschen:

Eine Wanne bekannten Volumens wurde randvoll mit PET-Flaschen gefüllt. Anschließend wurde das Probenmaterial als möglichst lückenlose Monoschicht auf dem stehenden Band verteilt und das Materialvolumen sensor-gestützt gemessen.



Abbildung 35 – Fotos vom Lichteinfluss-Versuch: 1) Wanne bekannten Volumens bis zum Rand mit PET-Flaschen gefüllt und 2) Materialaufgabe als Monoschicht.

### 3.4.6 Wasserversuche

Intention dieser Versuche ist, den Einfluss von Materialfeuchtigkeit auf die Volumenmessung der Sensoren zu untersuchen. Aufgrund des kleinen Versuchsumfanges kann der Wasserversuch lediglich einen ersten Eindruck darüber vermitteln.

Nachfolgend werden konkrete Fragestellungen, auf welche die Versuche Rückschlüsse geben sollen, formuliert und ein Ausschnitt aus dem Versuchsplan gezeigt, in dem das verwendete Probenmaterial, die eingesetzten Sensor-Modelle, Datum der Versuchsdurchführung und fortlaufende Versuchsnummern vermerkt sind. Anschließend werden Versuchsaufbau und -durchführung erläutert und veranschaulicht.

- Welches Volumen misst der Sensor für ein bekanntes Volumen PET-Flaschen in trockenem Zustand?
- Welches Volumen misst der Sensor für dieselbe Probe mit einem kleinen Rest Flüssigkeit in den PET-Flaschen verbleibend?
- Welches Volumen misst der Sensor für dieselbe Probe, wenn die PET-Flaschen vollständig mit Flüssigkeit aufgefüllt werden?
- Welches Volumen misst der Sensor für dieselbe Probe bei feuchter Material-Außenfläche?

Tabelle 19 - Ausschnitt aus dem Versuchsplan, der das verwendete Probenmaterial, die eingesetzten Sensoren, Datum und fortlaufende Versuchsnummern für die Wasser-Einfluss-Versuche zeigt.

Fraktion	Sensor-Modell	Datum	Versuchsnummer	
PET Flaschen	HDDM	26.08.2021	238	239
	SAMSoric	26.08.2021	238	239
	HDDM+	26.08.2021	238	239

Es wurden zwei Versuchsreihen (238 und 239) à zehn Einzelversuche mit der Fraktion PET Flaschen durchgeführt, die erste trocken und die zweite feucht. Für die Wasserversuche konnte der Allgemeine Versuchsaufbau adaptionsfrei verwendet werden.

Für die Versuchsreihe Nummer 238 wurde eine Wanne bekannten Volumens mit PET-Flaschen gefüllt und auf das stehende Band geleert, sodass ein zusammenhängender Materialhaufen von 200 mm Schütthöhe vorlag (siehe Abbildung 36). Anschließend wurde das Band angefahren und der Versuch zehn Mal hintereinander durchgeführt und aufgezeichnet.

Anschließend wurden für die Versuchsreihe 239 die Flaschen mit Wasser befüllt, indem der Wasserhahn rasch auf- und zuge dreht wurde, sodass original-förmige Flaschen vom Flaschenboden weg zwei Finger hoch und flachgedrückte Flaschen meist etwa zur Hälfte befüllt wurden. Da eine Vielzahl der Flaschen bereits beschädigt waren, kam es bei diesen zu

einem stetigen Wasseraustritt, wodurch sämtliche Flaschen auch an der Außenfläche befeuchtet waren und auch das Förderband stellenweise nass wurde. Dadurch können Messergebnisse nicht eindeutig auf das Vorhandensein von Wasser in der Flasche oder an der Außenseite zurückgeführt werden und die anfänglichen Fragestellungen mussten adaptiert werden:

- Welches Volumen misst der Sensor für dieselbe Menge eingesetzter PET-Flaschen, erst in trockenem Zustand und dann bei feuchtem Material?

Die Durchführung von Versuchsreihe 239 erfolgte in gleicher Weise wie Versuchsreihe 238, die Materialaufgabe erfolgte am stehenden Band, wobei sich die Feuchtigkeit am Band des Gurtförderers mit jedem Versuch ausbreitete.

Abbildung 36 zeigt die Wanne bekannten Volumens gefüllt mit erst trockenen, dann feuchten PET-Flaschen und als Materialhaufen auf das stehende Band aufgegeben:

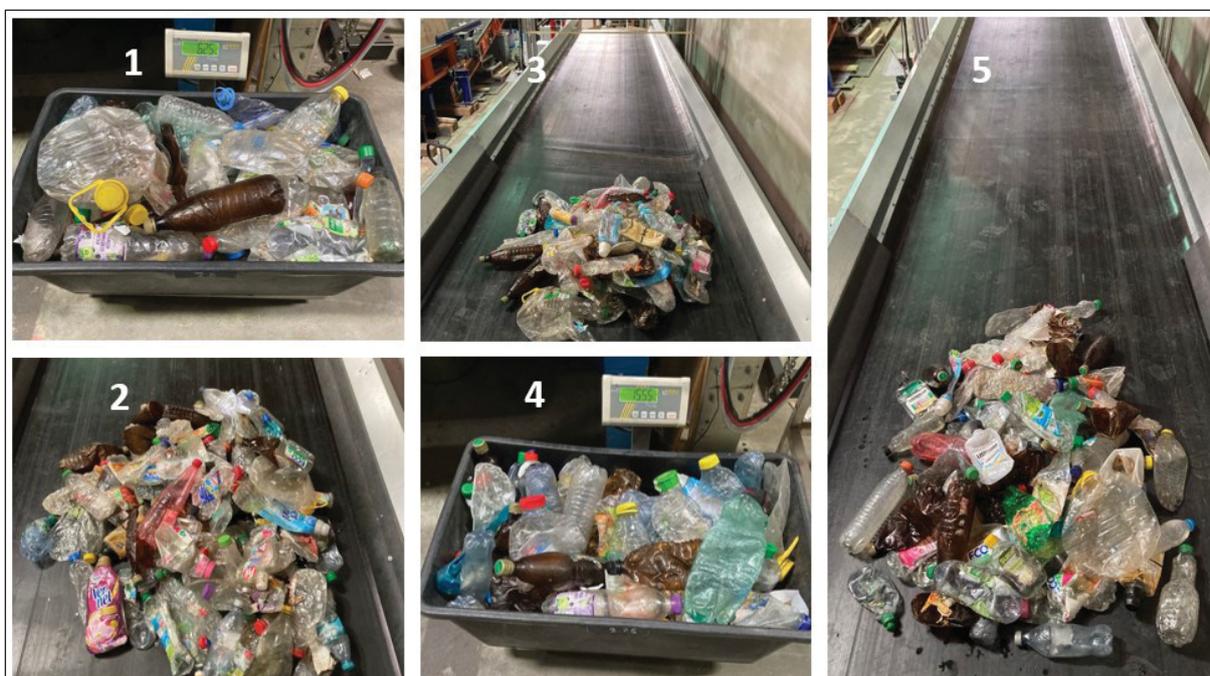


Abbildung 36 – Fotos von Wasserversuchen: 1) Wanne voll trockener PET-Flaschen, 2) Trockene Probe als Materialhaufen am stehenden Band, 3) Materialaufgabe trockene Probe, 4) Wanne voll PET-Flaschen mit wenig Flüssigkeit gefüllt und 5) Materialaufgabe feuchte PET-Flaschen.

## 3.5 Datenauswertung

### 3.5.1 Validierung der Volumenstromdaten

Zur grundsätzlichen Validierung der Sensor-akquirierten Messwerte werden die über einen bestimmten Versuchszeitraum akquirierten Volumenstromdaten in Abbildung 37 graphisch dargestellt und mit Angaben wie Materialaufgabeart sowie Versuchsstart- und Endzeit aus dem Versuchsprotokoll verglichen:

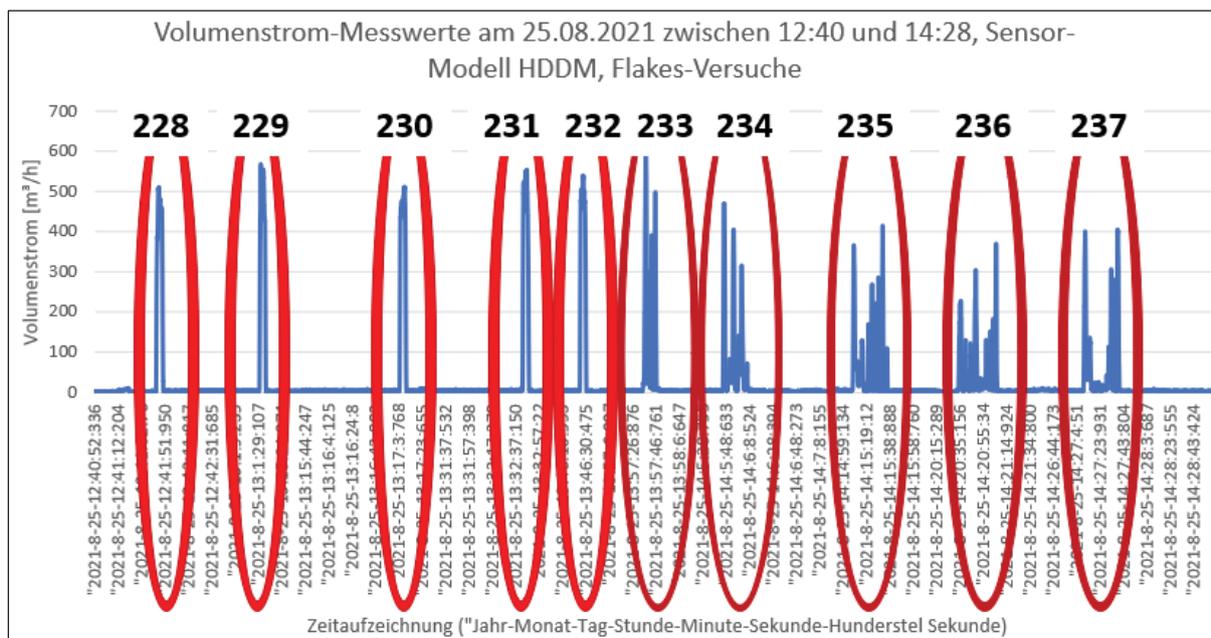


Abbildung 37 – Zur Validierung der Messwerte erfolgt ein Abgleich der Zeitstempel der Sensorsysteme mit vor und nach den Versuchen notierten Start- und Endzeiten. Die rot umrandeten Peaks zeigen Materialströme an, dazwischen läuft das Band leer. Oberhalb der roten Markierungen sind die fortlaufenden Versuchsnummern angeführt.

Wie Abbildung 54 (im Anhang) zu entnehmen ist, stimmt die Anzahl der in Abbildung 37 gezeigten sensorisch aufgezeichneten Peaks mit der Anzahl an durchgeführten Einzelversuchen im selben Zeitraum überein. Auch die Zeitangaben passen zusammen. In ähnlicher Vorgangsweise wurden die Messdaten für sämtliche Versuchsreihen validiert.

### 3.5.2 Grundrauschen

Mit dem Begriff *Grundrauschen* oder *Hintergrundrauschen* wird in der vorliegenden Arbeit jedes als Höhenwert aufgezeichnete Messsignal bezeichnet, das nicht offensichtlich auf ein Einzelobjekt unter dem Sensor zurückzuführen ist.

Folgende Fragen sollen beantwortet werden:

- Wie groß ist das Grundrauschen?
- Liegt an unterschiedlichen Versuchstagen unterschiedliches Grundrauschen vor?
- Inwiefern wird es bei der Daten-Auswertung berücksichtigt?

Für eine Quantifizierung des Grundrauschens werden die Volumenstrom-Werte aller Versuchstage um jene Werte bereinigt, welche bei Vorhandensein von Objekten unter dem Sensor, aufgezeichnet wurden. Da aufgrund der verwendeten Programmierung zudem der erste Wert zu Beginn jeder Volumenstrom-Aufzeichnung als nicht zuverlässig angesehen werden konnte (ein Volumen-Wert um mehrere Potenzen größer als darauffolgende Werte wird angezeigt), wird dieser ebenfalls gefiltert. Dadurch werden zur Berechnung des Grundrauschens für Sensor-Modell HDDM nur jene Volumenstromwerte herangezogen für die gilt: Volumen < 0,05 [m<sup>3</sup>] und maximale Höhe < 13 [mm]. Zur Berechnung des Grundrauschens für Sensor-Modell HDDM+ werden nur jene Volumenstromwerte herangezogen für die gilt: Volumen < 0,05 [m<sup>3</sup>] und maximale Höhe < 60 [mm]. Aus den nunmehr vorliegenden Werten wird anhand des arithmetischen Mittels ein mittleres Grundrauschen in [m<sup>3</sup>/h] berechnet (Ergebnis siehe Tabelle 20, Kapitel Ergebnisse und Diskussion):

Die folgende Formel (8) zeigt die Berechnung des arithmetischen Mittels zur Berechnung des mittleren Grundrauschens:

$$\bar{x} = \frac{\sum_{i=1}^n x_i}{n} \quad (8)$$

(Arnfried Kemnitz 2010)

Um zu einer Einschätzung zu gelangen, ob das mittlere Grundrauschen an unterschiedlichen Versuchstagen wesentlich voneinander abweicht, wird in analoger Vorgehensweise, das mittlere Grundrauschen pro Versuchstag berechnet (siehe Tabelle 21, Kapitel Ergebnisse und Diskussion).

### 3.5.3 Wahres Volumen und Wahres Wannenvolumen

Zur Bestimmung des *Wahren Volumens* wird das Probenmaterial aus geringer Höhe in die Mulde geleert und das ohne weitere Materialverdichtung eingenommene Volumen ausgemessen, indem an fünf Stellen der Mulde Schütthöhe *a* und an einer Stelle die Länge *b* der Schüttemengenoberfläche gemessen wird (siehe Abbildung 38). Diese Vorgehensweise wird für jede Fraktion mehrmals wiederholt, sodass aus einer endlichen Anzahl an Schüttvolumina das arithmetische Mittel berechnet und als *Wahres Volumen* definiert werden kann.

Folgende Abbildung zeigt eine Skizze der Mulde (1), jene Stellen, an denen Abmaße *a – d* zur Berechnung des Probenvolumens genommen wurden (2) sowie Beispielbilder von Materialschüttungen unterschiedlicher Fraktionen, zur Bestimmung des Wahren Volumens.

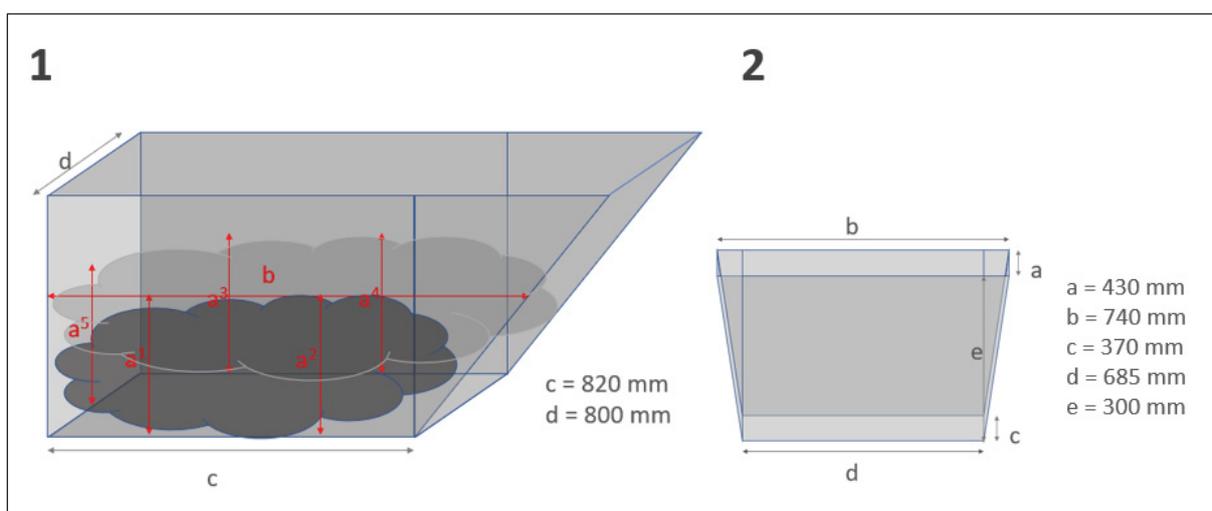


Abbildung 38 - (1) Skizze der Mulde: jene Stellen, an denen Abmaße *a – d* zur Berechnung des fraktionsspezifischen *Wahren Volumens* genommen wurden sind rot gefärbt markiert und (2) Skizze der KS-Wanne inklusive Abmaße zur Berechnung des *Wahren Wannenvolumens*.

Die Vorgehensweise zur Berechnung des *Wahren Volumens* erfolgt in zwei Schritten: zuerst wird das Schüttvolumen, welches eine Probe in der Mulde einnimmt nach Formel (9) berechnet, wobei *a* und *b* schütthöhenabhängige Größen und *c* und *d* konstante Abmessungen der Mulde sind.

$$\text{Schüttvolumen } (V_{\text{Schütt}}) = a * c * d + \frac{a * d * (b - c)}{2} \tag{9}$$

Anschließend wird das *Wahre Volumen* wie in (10)

berechnet. Es ist das arithmetische Mittel einer endlichen Anzahl (meist fünf) an zuvor berechneter *Schüttvolumina*.

$$\text{Wahres Volumen } (V_{\text{Wahr}}) = \frac{\sum_{i=1}^n V_{\text{Schütt}}}{n} \quad (10)$$

Das *Wahre Wannenvolumen* wird entsprechend Formel (11) berechnet.

$$V_{\text{Wanne Wahr}} = \left( \frac{a+c}{2} * \frac{b+d}{2} \right) * e \quad (11)$$

Anschließend können anhand der nun bekannten Probenvolumina die fraktionsspezifischen Schüttdichten nach Formel (12) und Formel (13) berechnet werden:

$$\rho_{\text{Schütt, Mulde}} = \frac{m_{\text{Probe in Mulde}}}{V_{\text{Wahr}}} \quad (12)$$

$$\rho_{\text{Schütt, Wanne}} = \frac{m_{\text{Probe in Wanne}}}{V_{\text{Wanne Wahr}}} \quad (13)$$

### 3.5.4 Sensorisch gemessenes Volumen

Die Vorbereitung der Daten zur Feststellung des detektierten Volumens erfolgt ähnlich wie bei der Bestimmung des Grundrauschens, nur dass diesmal jene Werte zur Auswertung herangezogen werden, deren Höhenwert bei Sensor-Modell HDDM > 13 mm und bei Sensor-Modell HDDM+ > 60 mm ist.

Die genaue Anfangszeit  $t_{\text{Anfang}}$  und Endzeit  $t_{\text{Ende}}$  des Einzelversuches können aus den Sensordaten herausgelesen und die Versuchsdauer  $t_{\text{Einzelversuch}}$  in Formel (14) berechnet werden.

$$t_{\text{Einzelversuch}} = t_{\text{Ende}} - t_{\text{Anfang}} \quad (14)$$

Anschließend wird das über die Versuchsdauer  $t_{\text{Einzelversuch}}$  detektierte Volumen  $V_{\text{Sensor}}$  in Kubikmeter (m<sup>3</sup>) ermittelt.

$$V_{\text{Sensor}} = \sum_{i=t_{\text{Anfang}}}^{t_{\text{Ende}}} V_i \quad (15)$$

Bei Division des detektierten Volumens durch die Versuchsdauer kann ein Volumenstrom  $\dot{V}$  [ $\text{m}^3/\text{s}$ ] erhalten werden.

$$\dot{V} = \frac{V_{\text{Sensor}}}{t_{\text{Einzelversuch}}} \quad (16)$$

Von diesem wird der „Grundrauschen-Volumenstrom“  $\dot{V}_{\text{Grundrauschen}}$  [ $\text{m}^3/\text{s}$ ] subtrahiert und der Materialvolumenstrom  $\dot{V}_{\text{Material}}$  [ $\text{m}^3/\text{s}$ ] erhalten.

Für Sensor-Modell HDDM:

$$\dot{V}_{\text{Material}} = \dot{V} - \dot{V}_{\text{Grundrauschen HDDM}} \quad (17)$$

Beziehungweise für Sensor-Modell HDDM+:

$$\dot{V}_{\text{Material}} = \dot{V} - \dot{V}_{\text{Grundrauschen HDDM+}} \quad (18)$$

Anschließend wird vom Materialvolumenstrom und der Versuchsdauer auf das detektierte Volumen [ $\text{m}^3$ ] zurückgerechnet.

$$V_{\text{Sensor}} = \dot{V}_{\text{Material}} * t_{\text{Einzelversuch}} \quad (19)$$

Zur graphischen Darstellung der *Sensorvolumen*-Verteilung werden Box-Whiskers verwendet, ihr Aufbau wird in folgender Abbildung gezeigt.

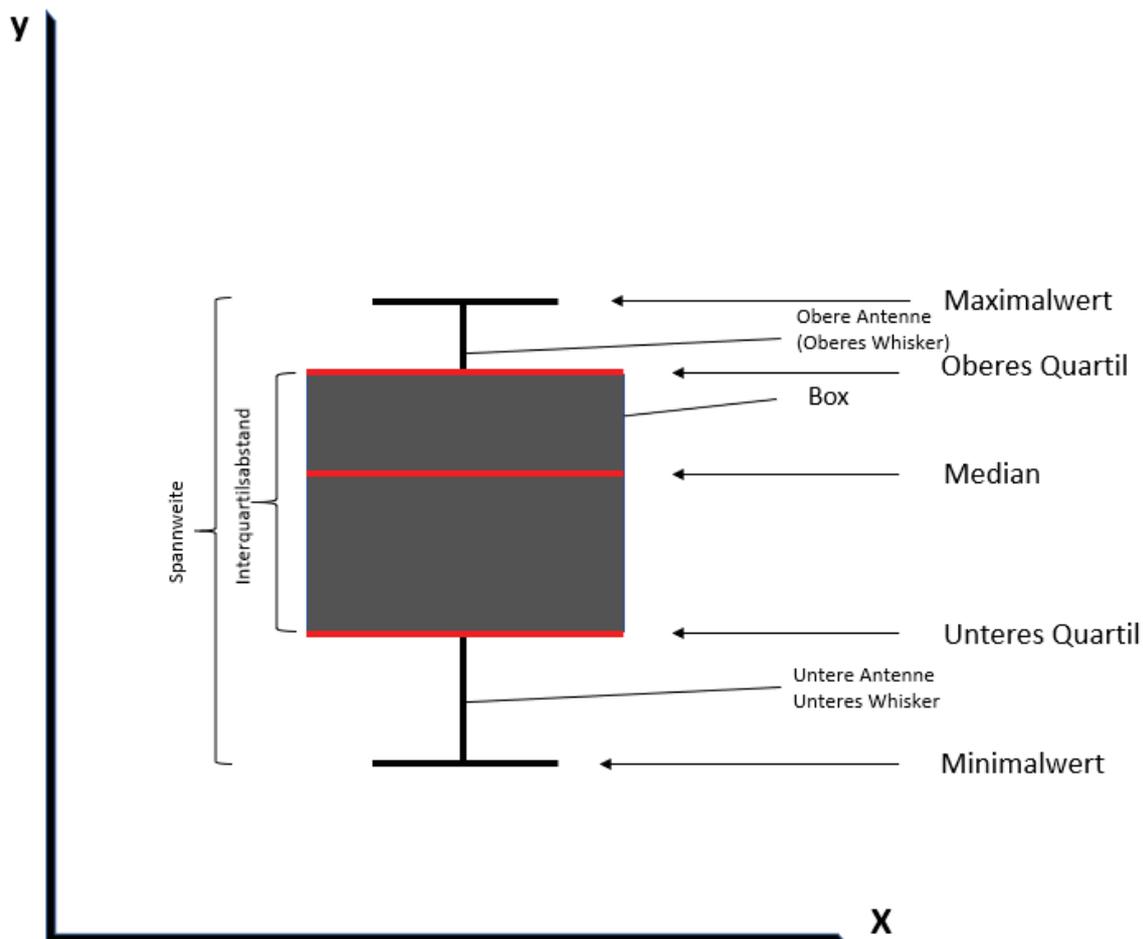


Abbildung 39 - Aufbau eines Box-Whiskers: innerhalb der Box liegen 50 % aller Werte, der Median wird durch einen Querbalken dargestellt; von der Box aus nach oben und unten gehen zwei Antennen, welche mit dem Maximal- bzw. dem Minimalwert abschließen.

Ein Box-Whisker, auch Kastengraphik genannt, stellt die Verteilung von fünf oder mehr Werten dar. In dem Bereich, der durch die sogenannte Box abgedeckt wird, befinden sich 50 % aller Messwerte, der Abstand von Unterem zu Oberem Quartil wird Interquartilsabstand genannt. Der rot gefärbte Querbalken innerhalb der Box zeigt die Position des Medians an. Anhand seiner Lage kann abgelesen werden, in welche Richtung die vorliegende Verteilung an Messwerten verschoben ist. Den Abschluss der sogenannten Antennen bilden Querbalken, welche den größten und kleinsten Messwert anzeigen (Maximal- bzw. Minimalwert). Der Abstand von Maximal- zu Minimalwert wird Spannweite genannt.

In Excel (Version 2108) werden anhand integrierter Excel-Funktionen Minimalwert, Erstes Quartil, Medianwert, Drittes Quartil und Maximalwert berechnet.

Das *Wahre Volumen* der jeweiligen Materialprobe wird in den Diagrammen zusätzlich als farbiger Querbalken dargestellt.

Zur Bewertung der Messrichtigkeit wird nun auch die prozentuelle Abweichung vom arithmetisch gemittelten *Sensorvolumen* der Einzelversuche einer Versuchsreihe zum *Wahren Volumen* entsprechend Formel (20) berechnet.

$$\text{Prozentuelle Abweichung} = \frac{\sum_{i=1}^n V_{\text{Sensor } i}}{n} - V_{\text{Wahr}} \quad (20)$$

Normierung:

Aus Gründen der Übersichtlichkeit und zur leichteren Vergleichbarkeit der Sensorperformance für unterschiedliche Fraktionen werden die erhaltenen Ergebnisse normiert. Dafür werden alle *Sensorvolumina* mit einem fraktionsspezifischen Normierungsfaktor multipliziert und auf ein normiertes *Wahres Volumen* von 1 m<sup>3</sup> bezogen. Die Normierungsfaktoren werden wie folgt berechnet.

$$\text{Normierungsfaktor}_{\text{Fraktion}} = \frac{1}{V_{\text{Wahr}_{\text{Fraktion}}}} \quad (21)$$

Anschließend werden mit den normierten Werten erneut Box-Whiskers in einem Diagramm erstellt. Die Box-Whiskers beziehen sich dabei auf die primäre Vertikalachse (Volumen in [m<sup>3</sup>]). Die sekundäre Vertikalachse stellt die Skalierung für die prozentuelle Abweichung des mittleren *Sensorvolumens* vom *Wahren Volumen* dar.

## 4 Ergebnisse und Diskussion

### 4.1.1 Grundrauschen

In Tabelle 20 werden die Ergebnisse zur Quantifizierung des mittleren Grundrauschens über alle Versuchstage je Sensor-Modell dargestellt:

Tabelle 20 - Ergebnis aus der Berechnung des mittleren Volumenstromes über die Grundrauschwerte sämtlicher Versuchstage, je Sensor-Modell.

	V-Strom in [m <sup>3</sup> /h] Sensor-Modell HDDM $\dot{V}_{\text{Grundrauschen HDDM}}$	V-Strom in [m <sup>3</sup> /h] Sensor- Modell HDDM+ $\dot{V}_{\text{Grundrauschen HDDM+}}$
Mittleres Gesamtgrundrauschen bzw. in [m <sup>3</sup> /h]	2,969	14,52
Standardabweichung in [m <sup>3</sup> /h]	1,469	5,127

Folgende Tabelle 21 zeigt die Ergebnisse zur Quantifizierung des mittleren Grundrauschens je Versuchstag und Sensor-Modell:

Tabelle 21 - Ergebnisse aus den Berechnungen der mittleren Volumenströme über die Grundrauschwerte je Versuchstag und Sensor-Modell.

Versuchstag	Mittlerer V-Strom in [m <sup>3</sup> /h] Sensor-Modell HDDM	Mittlerer V-Strom in [m <sup>3</sup> /h] Sensor-Modell HDDM+
05.08.2021	2,532	
06.08.2021	2,343	13,91
09.08.2021	1,913	13,63
10.08.2021	1,620	16,59
10.08.2021	1,872	13,48
11.08.2021	1,387	13,38
12.08.2021	2,899	13,01
13.08.2021	2,842	13,53
13.08.2021	2,910	14,89
16.08.2021	3,294	11,31
17.08.2021	3,255	10,17
20.08.2021	2,716	11,03
23.08.2021	3,099	10,43
23.08.2021	2,892	17,52
24.08.2021	3,004	17,30
24.08.2021	3,509	16,67
25.08.2021	3,475	20,33
26.08.2021	3,133	19,33
<b>Mittleres Tagesgrundrauschen in [m<sup>3</sup>/h]:</b>	<b>2,705</b>	<b>14,50</b>
<b>Standardabweichung in [m<sup>3</sup>/h]</b>	<b>0,635</b>	<b>3,036</b>

Aus Tabelle 20 und Tabelle 21 geht hervor, dass für Sensor-Modell HDDM das mittlere Tagesgrundrauschen mit 2,705 [m<sup>3</sup>/h] plus/minus der Standardabweichung von 0,635 [m<sup>3</sup>/h] innerhalb des mittleren Gesamtgrundrauschens von 2,969 [m<sup>3</sup>/h] plus/minus der Standardabweichung von 1,469 [m<sup>3</sup>/h] liegt. Auch für Sensor-Modell HDDM+ liegt das mittlere Tagesgrundrauschen plus/minus Standardabweichung innerhalb des mittleren Gesamtgrundrauschens plus/minus Standardabweichung.

Um die nachfolgende Volumenstrom-Auswertung für alle durchgeführten Versuche zu erleichtern und ein praxisnahes Vorgehen, bei dem auf eine tägliche Neubewertung des Grundrauschens der eingesetzten Sensoren verzichtet wird, zu imitieren, werden die Werte aus Tabelle 20 herangezogen und bei der Auswertung vom Sensor-gestützt gemessenen Volumenstrom subtrahiert:

### 4.1.2 Referenzvolumen

Die Wahren Volumina und Schüttdichten sämtlicher Probenfraktionen in der Mulde, berechnet anhand Formel (10) und Formel (12) werden in folgender Tabelle 22 dargestellt.

Tabelle 22 - *Wahres Volumen* sämtlicher Materialproben.

Referenzvolumen		
Fraktion	Wahres Volumen in [m <sup>3</sup> ]	Schüttdichte in [t/m <sup>3</sup> ]
GVK	0,513	0,0721
MG Grob	0,626	0,0312
MG Fein	0,580	0,0569
NE	0,526	0,0751
PPK	0,516	0,0533
Reste	0,552	0,0806
PE	0,538	0,0558
PP	0,514	0,0409
PET Tray	0,480	0,0385
PET Flaschen	0,420	0,0607
Folien	0,613	0,0131

Die Tabelle sagt aus, dass die Schüttdichten der verschiedenen Proben mehr oder weniger voneinander abweichen, so ist z.B. jene von Fraktion *Reste* etwa sechs Mal größer als jene von Fraktion *Folien*.

Die Schüttdichten sämtlicher Fraktionen aus Tabelle 22 weichen nur wenig von den Schüttdichten für LVP-Abfälle aus Tabelle 3 in Kapitel 2.1 ab.

Tabelle 23 zeigt das *Wahre Wannenvolumen* und die Schüttdichte der Fraktionen *PET Tray* und *PET Flaschen* in der Wanne, berechnet anhand Formel (11) und Formel (13).

Tabelle 23 - *Wahres Wannenvolumen*.

Referenzvolumen		
Fraktion	Wahres Wannenvolumen in [m <sup>3</sup> ]	Schüttdichte in [t/m <sup>3</sup> ]
PET Tray	0,0852	0,0320
PET Flaschen	0,0852	0,0476

Aus Tabelle 22 und Tabelle 23 geht hervor, dass das Schüttvolumen für *PET Tray* und *PET Flaschen* in der Wanne von jenem in der Mulde unterscheidet.

Die geringeren Schüttdichten in der Wanne könnten in einer lockereren Schüttung aufgrund der verhältnismäßig größeren Kontaktfläche zwischen Behälterwand und Probenmaterial begründet sein. Möglich ist auch eine unbeabsichtigte Überrepräsentation von großen bzw.

sperrigen und leichten Einzelobjekten in der Wanne. Auch Verdichtungseffekte könnten Grund für die höhere Schüttdichte in der Mulde sein.

### 4.1.3 Flakes-Referenzversuche

Nachfolgende Abbildung zeigt die Verteilung der *Sensorvolumina* je eingesetztem Sensor-Modell und die prozentuelle Abweichung vom mittleren *Sensorvolumen* zum *Wahren Volumen* bei 300 mm Schütthöhe, wobei der grau gefärbte Querbalken das Referenzvolumen ( $1 \text{ m}^3$ ) darstellt.

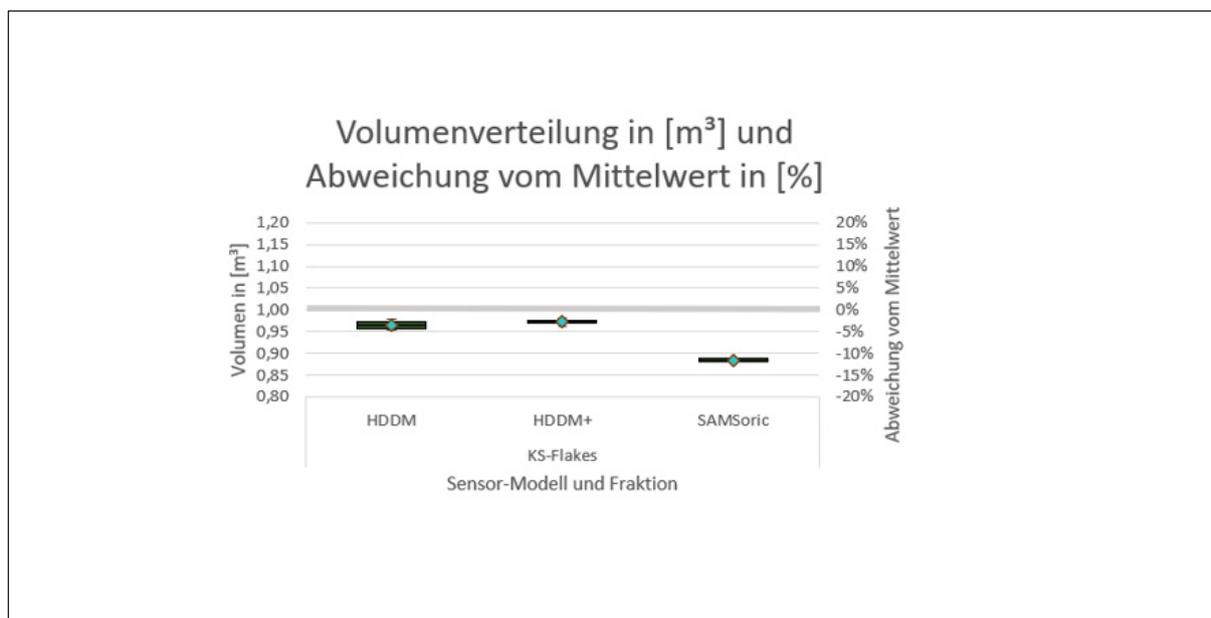


Abbildung 40 - Verteilung des detektierten Volumens und prozentuelle Abweichung vom mittleren *Sensorvolumen* zum *Wahren Volumen* für Fraktion Flakes, je Sensor-Modell.

Die Abbildung zeigt, dass alle drei eingesetzten Sensoren zu wenig Volumen detektieren. Die Abweichung vom mittleren *Sensorvolumen* zum *Wahren Volumen* beträgt für die Sensor-Modelle HDDM und HDDM+ weniger als 5 %, für Sensor-Modell SAMSoric rund 10 %. Die Abweichungen könnten entweder auf Messfehler der Sensoren zurückzuführen sein, es wäre aber auch möglich, dass sich die Bestimmung des *Wahren Volumens* in der Mulde nicht dazu eignet, um einen Referenzwert für die detektierten Volumina zu erhalten.

### 4.1.4 Schütthöhenversuche

Nachfolgend wird in Abbildung 41 die Verteilung der sensorisch gemessenen Volumina bei 150 mm Schütthöhe als Box-Whiskers dargestellt. Das *Wahre Volumen* des aufgegebenen Probenmaterials wird fraktionsweise als farbiger Querbalken dargestellt.

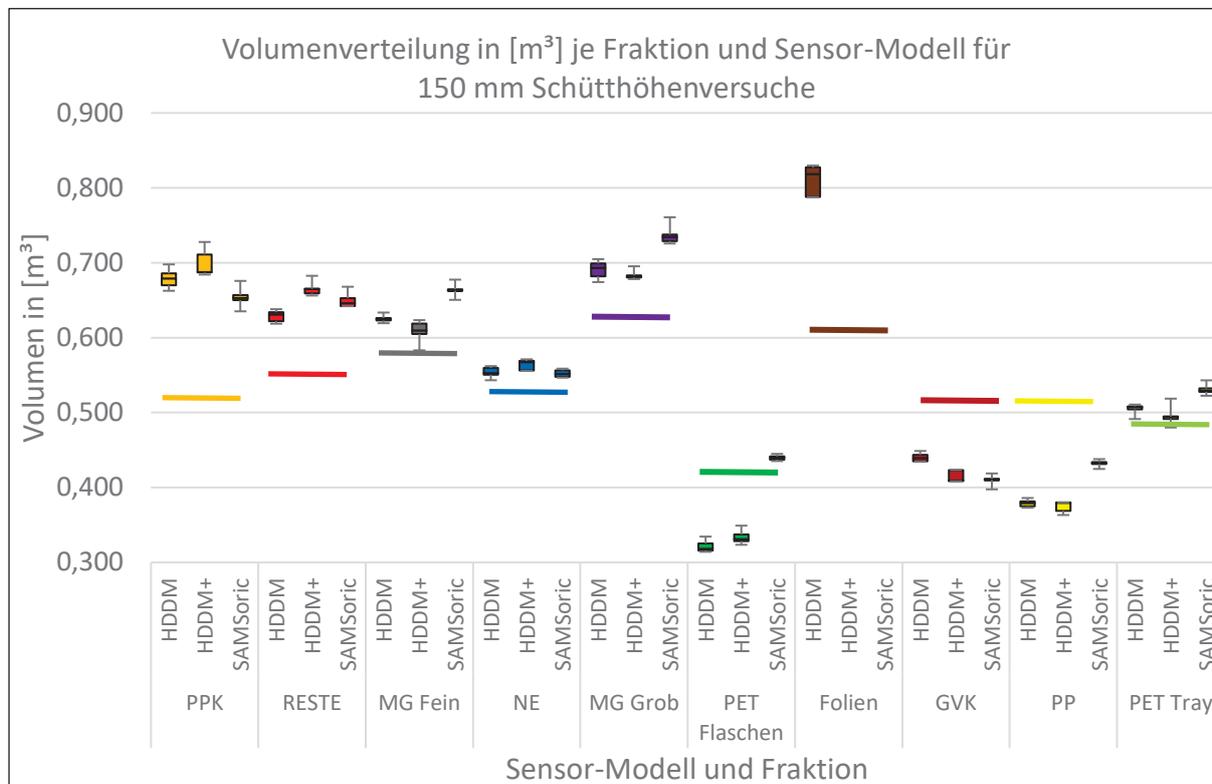


Abbildung 41 - Ergebnisse der 150 mm Schütthöhenversuche. Die *Sensorvolumina* werden als Box-Whiskers dargestellt. Farbige Querbalken zeigen das *Wahre Volumen*.

Abbildung 41 zeigt, dass bei 150 mm Material-Schütthöhe die drei eingesetzten Sensor-Modelle für alle Fraktionen bis auf *PET Flaschen*, *GVK* und *PP* ein größeres als das *Wahre Volumen* detektiert haben. Zu sehen ist außerdem, dass außer bei Fraktion *PET Flaschen*, die Ergebnisse aller drei Sensoren nahe beieinander liegen. Diese hohe Wiederholgenauigkeit lässt jedoch nicht zwangsläufig auf die Richtigkeit der Messung schließen, da die Abweichungen bei etwa  $\pm 20\%$  liegen. Auffallend ist, dass Sensor-Modell HDDM+ in je einem Einzelversuch mit den Fraktionen *MG Fein* und *PET Tray* beinahe exakt das *Wahre Volumen* detektiert. Die große Abweichung von etwa 30 % bei Fraktion *Folien* ist evtl. auf ein „Entfalten“ der Folien am Band zurückzuführen, insbesondere da bei Herstellung einer Schütthöhe von 150 mm speziell die Fraktion *Folien* viel Förderbandfläche eingenommen hat (2 bis 3 Bandlängen).

Nachfolgend wird in Abbildung 42 die Verteilung der *Sensorvolumina* bei 300 mm Schütthöhe.

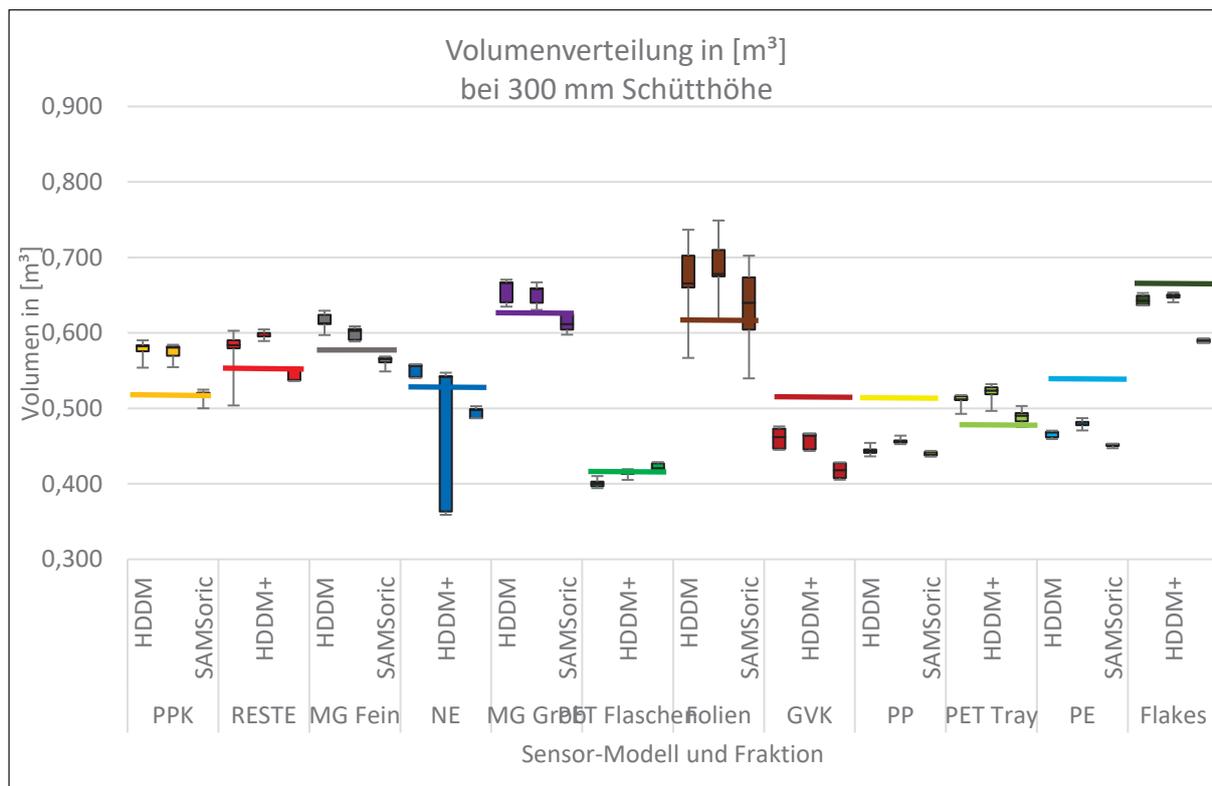


Abbildung 42 - Ergebnisse der 300 mm Schütthöhenversuche: Verteilung der *Sensorvolumina* als Box-Whiskers, das *Wahre Volumen* als farbiger Querbalken.

Aus Abbildung 42 geht hervor, dass bei 300 mm Schütthöhe die sensorisch gemessenen Volumina für die meisten Fraktionen um den *Wahren Wert* streuen. Auffallend ist die breite Volumenverteilung bei Fraktion *NE*. Diese ist auf eine Neukalibrierung des HDDM+-Sensor-Modells nach den ersten beiden Einzelversuchen (von insgesamt fünf) zurückzuführen. Die Ergebnisse der ersten zwei Einzelversuche weichen mit einem detektierten Volumen von 0,363 m³ bzw. 0,359 m³ weit vom *Wahren Volumen* ab. Das sensorisch gemessene Volumen nach der Kalibrierung von 0,542 m³, 0,547 m³ bzw. 0,543 m³ liegt dagegen nahe beim *Wahren Volumen* von 0,526 m³. Worauf die große Abweichung von den beiden ersten Werten, welche kaum voneinander, jedoch um fast 30 % zum *Wahren Volumen* abweichen, zurückzuführen ist, kann an dieser Stelle nicht festgestellt werden. Auffallend diesbezüglich ist, dass die Ergebnisse der restlichen Fraktionen diese Abweichungen zwischen Messungen vor und nach Kalibrierung nicht zeigen. Die breite Streuung des *Sensorvolumens* für Fraktion *Folien* ist möglicherweise in einem mehr oder weniger ausgeprägten Zerfleddern der Folien bei Materialaufgabe begründet.

Folgende Abbildung zeigt die Verteilung der *Sensorvolumina* bei 550 mm Schütthöhe.

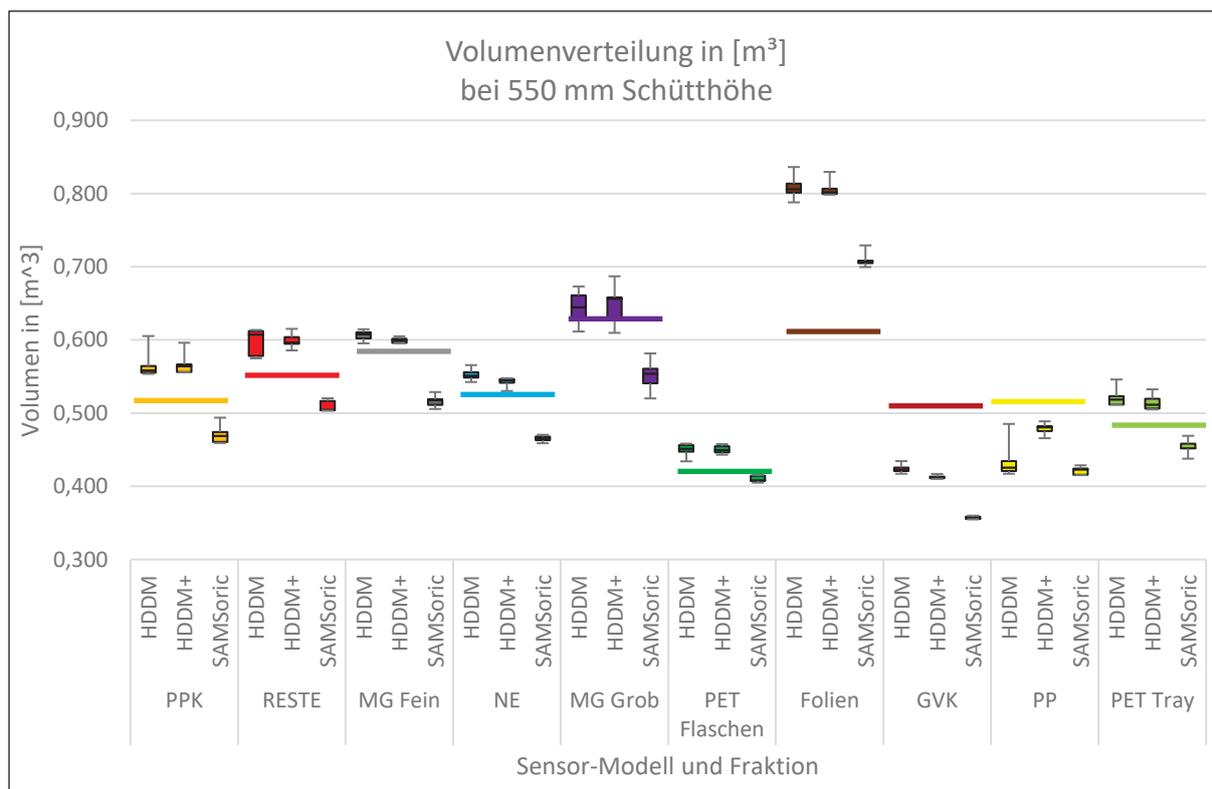


Abbildung 43 - Ergebnisse der 550 mm Schütthöhenversuche. Die *Sensorvolumina* werden als Box-Whiskers dargestellt. Farbige Querbalken zeigen das *Wahre Volumen* für jede Fraktion.

Abbildung 43 zeigt für alle Sensoren und Fraktionen *außer PP* das gleiche Muster: Die Sensor-Modelle HDDM und HDDM+ detektieren für alle Fraktionen bis auf *GVK* und *PP* zu viel Volumen und die *Sensorvolumina* liegen nahe beieinander. Sensor-Modell SAMSoric zeigt eine Unterbestimmung des Volumens sämtlicher Fraktionen bis auf *Folien*. Eine mögliche Erklärung für das regelmäßige Muster der Volumen-Über- bzw. -Unterbestimmung könnte der jedem Sensor-Modell charakteristische systematische Messfehler sein (Vgl. *typische Messfehler* in Tabelle 11 für die Modell HDDM und HDDM+).

In Abbildung 44, Abbildung 45 und Abbildung 46 werden anschließend die Verteilung der *Sensorvolumina* sowie die Abweichung vom mittleren *Sensorvolumen* zum *Wahren Volumen* je Fraktion und eingesetztem Sensormodell dargestellt.

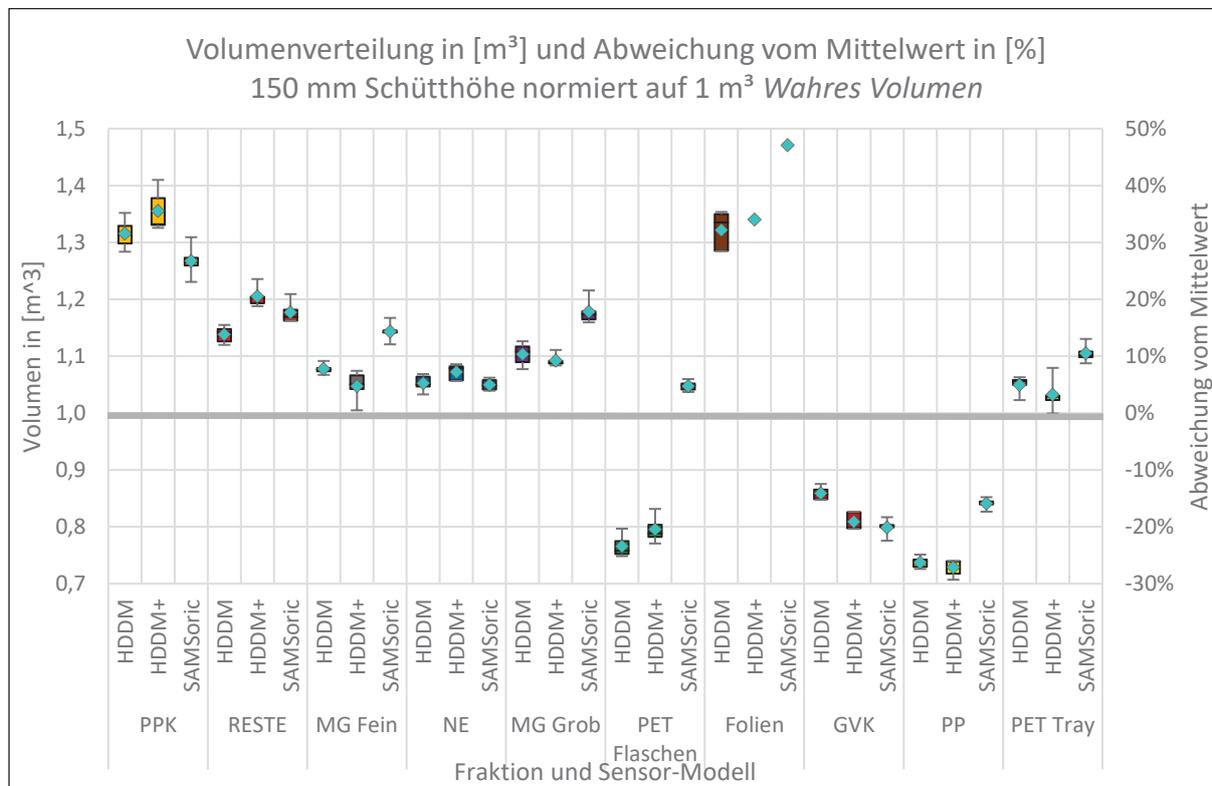


Abbildung 44 - Darstellung der Verteilung normierter *Sensorvolumina* als Box-Whiskers und der prozentuellen Abweichung vom mittleren *Sensorvolumen* zum Normvolumen als gefärbte quadratische Markierung.

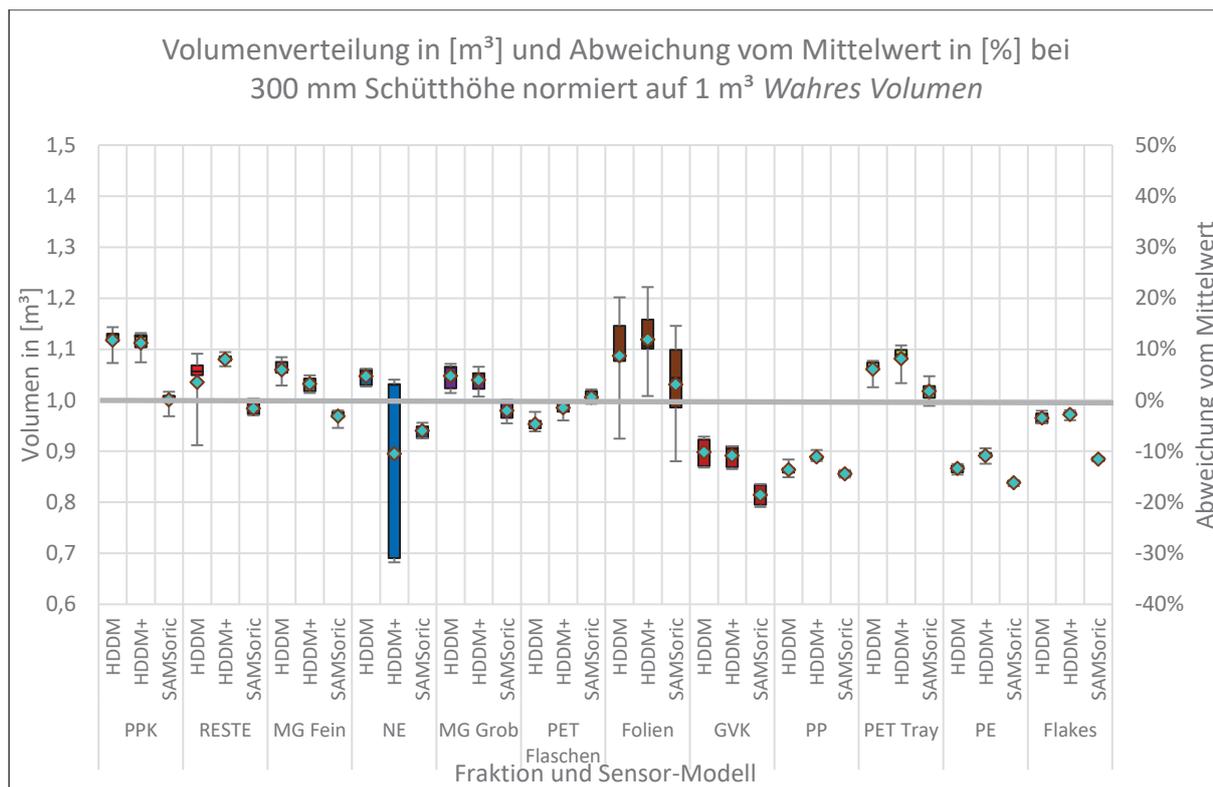


Abbildung 45 - Darstellung der Verteilung normierter *Sensorvolumina* als Box-Whiskers und der prozentuellen Abweichung vom mittleren *Sensorvolumen* zum Normvolumen als gefärbte quadratische Markierung.

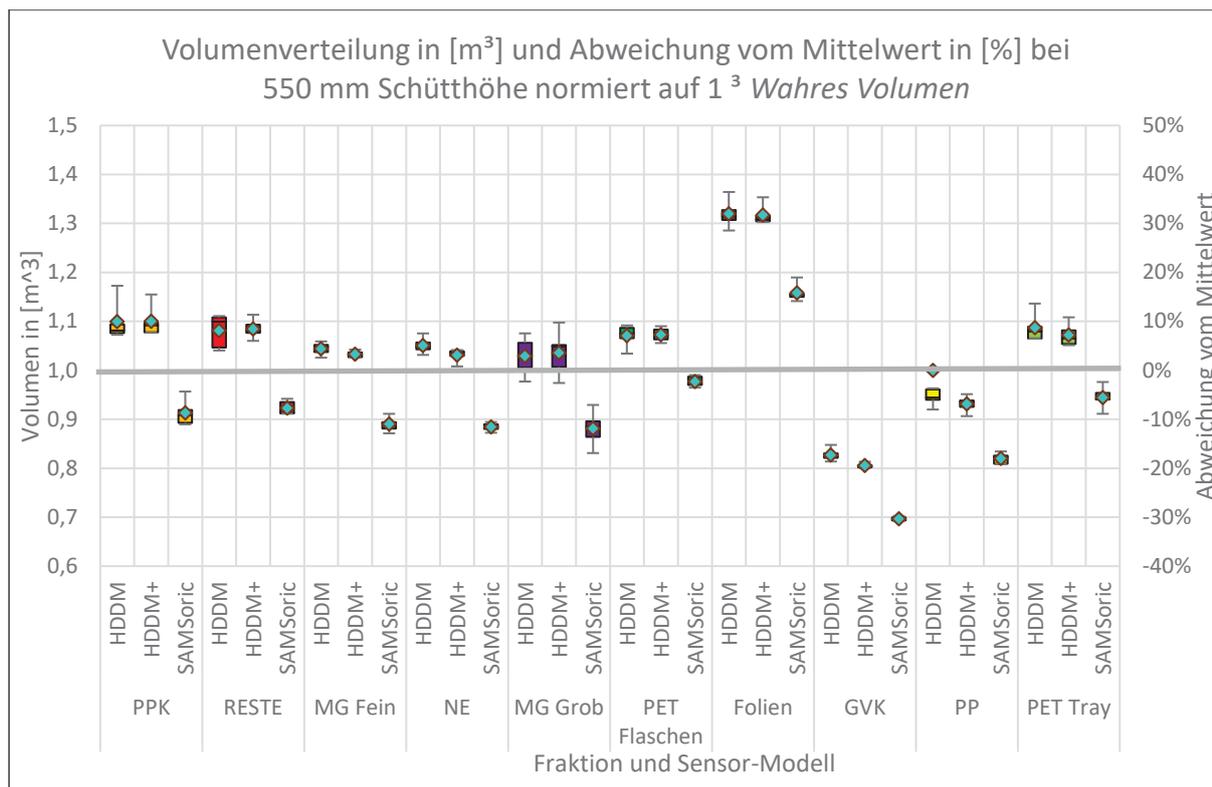


Abbildung 46 - Darstellung der Verteilung normierter *Sensorvolumina* als Box-Whiskers und der prozentuellen Abweichung vom mittleren *Sensorvolumen* zum Normvolumen als gefärbte quadratische Markierung.

Abbildung 44, Abbildung 45 und Abbildung 46 zeigen Unterschiede in Richtigkeit und Präzision des sensorisch gemessenen Volumens je Material, Schütthöhe und Sensor-Modell. Eine Hypothese ist, dass Richtigkeit und Präzision von den drei genannten Parametern abhängig sind. So streuen die Ergebnisse für *GVK* zwar bei allen drei Schütthöhen und für alle eingesetzten Sensor-Modelle um nur etwa 5%, weichen aber je nach Schütthöhe und Sensor-Modell um etwa 10 - 30% vom *Wahren Volumen* ab. Die Abweichungen vom *Sensorvolumen* zum Normvolumen liegen bei 330 mm Schütthöhe für alle Fraktionen außer *NE* bei maximal +/- 20%. Auch bei 550 mm Schütthöhe liegt die Abweichung für alle Fraktionen außer *Folien* und *GVK* zwischen +/- 20%. Sensor-Modell *SAMSoric* detektiert bei dieser Schütthöhe bei allen Fraktionen außer *Folien* um etwa 10% zu wenig Volumen. Wesentlich größere Abweichungen (-30 bis +50%) sind bei 150 mm Schütthöhe zu sehen. Ein möglicher Grund für die fraktionsabhängigen Abweichungen bei dieser Schütthöhe könnte sein, dass die Materialbeschaffenheit wie *KG* und Kornform bei geringer Schütthöhe eventuell eine größere Rolle spielt als bei größeren Schütthöhen. Möglicherweise fällt hier die Bildung dichter Packungen von Fraktionen mit niedriger *KG* und wenig sperriger Kornform wie z.B. *MG Fein* und *NE* stärker ins Gewicht.

Nachfolgend wird in Tabelle 24, Tabelle 25 und Tabelle 26 überblicksmäßig die prozentuelle Abweichung vom mittleren *Sensorvolumen* zum Normvolumen je Sensor und Fraktion dargestellt.

Tabelle 24 - Zusammenfassung der Ergebnisse zur prozentuellen Abweichung vom mittleren *Sensorvolumen* zum Normvolumen bei 150 mm Schütthöhe.

Fraktion	Schwankt um Wahres Volumen	Abweichung					
		+/- 5 %	+/- 10 %	+/- 15 %	+/- 20 %	+/- 30 %	> + 30 % < - 30 %
PPK						SAMSoric	HDDM HDDM+
RESTE				HDDM	HDDM+ SAMSoric		
MG Fein		HDDM+	HDDM	SAMSoric			
NE		HDDM HDDM+ SAMSoric					
MG Grob			HDDM HDDM+	SAMSoric			
PET Flaschen		SAMSoric			HDDM+	HDDM	
Folien						HDDM	HDDM+ SAMSoric
GVK				HDDM	HDDM+ SAMSoric		
PP				SAMSoric		HDDM HDDM+	
PET Tray		HDDM HDDM+	SAMSoric				

Tabelle 24 zeigt, dass alle drei eingesetzten Sensor-Modelle bei 150 mm Schütthöhe für die Fraktionen *PPK* und *Folien* ein um mindestens 30 % vom *Wahren Volumen* abweichendes Volumen detektierten. Sensor-Modell HDDM erzielte die geringsten Abweichungen vom *Sensorvolumen* zum *Wahren Volumen* für die Fraktionen *MG Fein*, *NE* und *PET Tray*. Sensor-Modell SAMSoric schnitt bei der Volumenmessung von Fraktion *PET Flaschen* am besten ab. Keiner der eingesetzten Sensoren ist laut Tabelle 24 dafür geeignet alle Fraktionen bei 150 mm Schütthöhe mit einer Genauigkeit von zumindest +/- 20 % zu messen.

Tabelle 25 - Zusammenfassung der Ergebnisse zur prozentuellen Abweichung vom mittleren *Sensorvolumen* zum Normvolumen bei 300 mm Schütthöhe.

Fraktion	Schwankt um <i>Wahres Volumen</i>	Abweichung					
		+/- 5 %	+/- 10 %	+/- 15 %	+/- 20 %	+/- 30 %	> + 30 % < - 30 %
PPK	SAMSoric		HDDM HDDM+				
RESTE		HDDM SAMSoric	HDDM+				
MG Fein		HDDM HDDM+ SAMSoric					
NE		HDDM	SAMSoric				
MG Grob		HDDM HDDM+ SAMSoric					
PET Flaschen	SAMSoric	HDDM HDDM+					
Folien		SAMSoric	HDDM HDDM+				
GVK			HDDM HDDM+		SAMSoric		
PP			HDDM+	HDDM SAMSoric			
PET Tray	SAMSoric	HDDM	HDDM+				
PE			HDDM+	HDDM SAMSoric			
Flakes		HDDM HDDM+		SAMSoric			

Aus Tabelle 25 ist ersichtlich, dass bei 300 mm Schütthöhe Sensor-Modell SAMSoric das *Wahre Volumen* für die Fraktionen *PPK*, *PET Flaschen* und *PET Tray* mit weniger als 5% Abweichung richtig detektiert. Generell ist bei dieser Schütthöhe die Abweichung vom *Sensorvolumen* zum *Wahren Volumen* für die meisten Fraktionen bei allen eingesetzten Sensoren kleiner 10 %.

Tabelle 26 - Zusammenfassung der Ergebnisse zur prozentuellen Abweichung vom mittleren *Sensorvolumen* zum Normvolumen bei 550 mm Schütthöhe.

Fraktion	Abweichung						
	Schwankt um <i>Wahres Volumen</i>	+/- 5 %	+/- 10 %	+/- 15 %	+/- 20 %	+/- 30 %	> + 30 % < - 30 %
PPK			HDDM HDDM+ SAMSoric				
RESTE			HDDM HDDM+ SAMSoric				
MG Fein		HDDM HDDM+	SAMSoric				
NE		HDDM HDDM+	SAMSoric				
MG Grob		HDDM HDDM+	SAMSoric				
PET Flaschen		SAMSoric	HDDM HDDM+				
Folien				HDDM+ SAMSoric		HDDM	
GVK					HDDM HDDM+	SAMSoric	
PP			HDDM HDDM+		SAMSoric		
PET Tray		HDDM+ SAMSoric	HDDM				

Tabelle 26 zeigt, dass alle eingesetzten Sensor-Modelle bei sämtlichen Fraktionen außer *Folien*, *GVK* und *PP* Abweichungen vom *Sensorvolumen* zum *Wahren Volumen* zwischen 5 und 15 % erzielen.

Nachfolgend werden zur besseren Vergleichbarkeit die Diagramme aus Abbildung 44, Abbildung 45 und Abbildung 46 zusammengefasst dargestellt. Darüber hinaus sollen Zusammenhänge zwischen dem detektierten Volumen und den eingesetzten Materialien und Sensoren verdeutlicht und mögliche Trends erkannt werden.

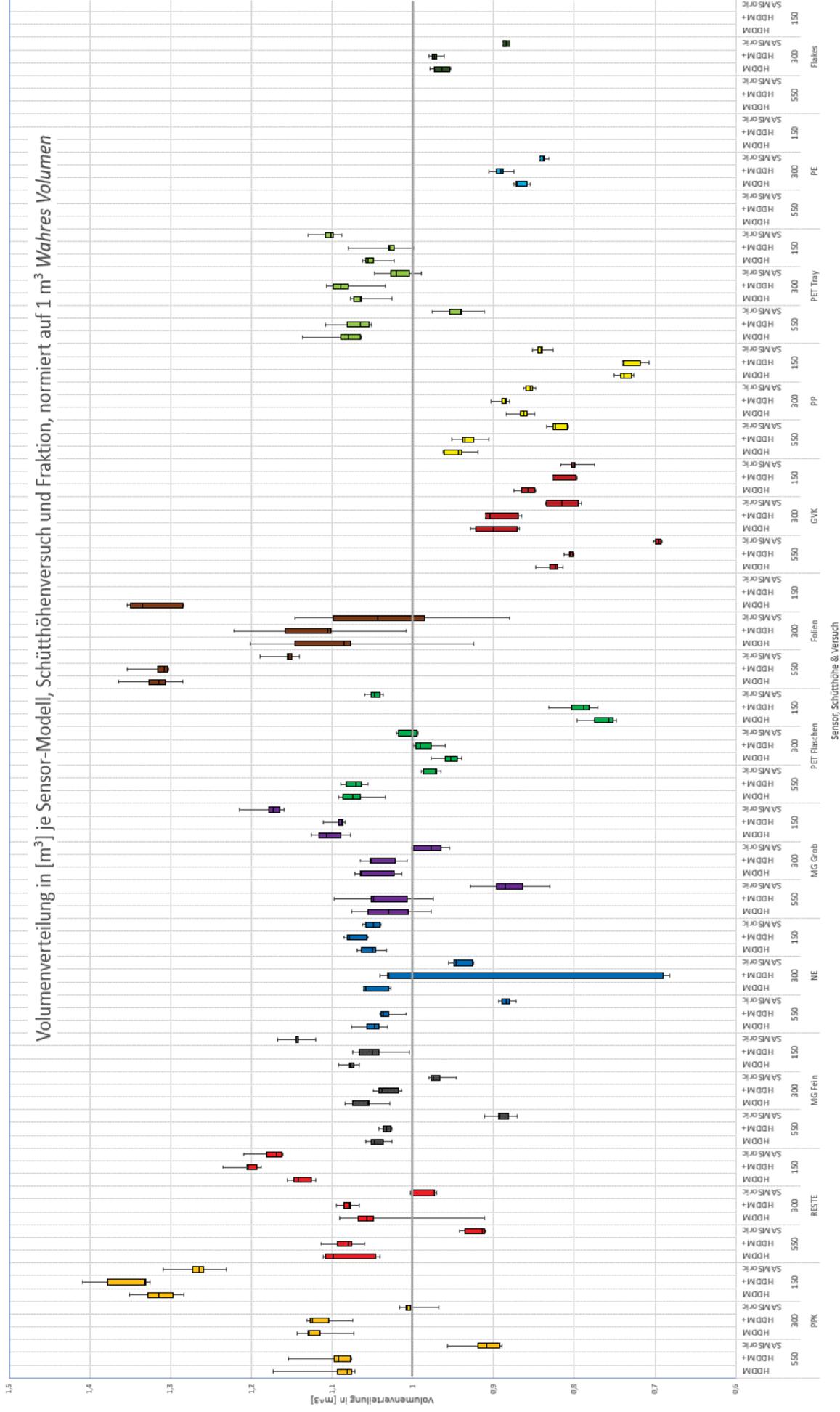


Abbildung 47 - Gegenüberstellung der Volumenverteilung aller Schütthöhenversuche als Box-Whiskers, normiert auf 1 m<sup>3</sup>.

Abbildung 47 verdeutlicht fraktionsspezifische Unterschiede, z.B. dass unabhängig von der Schütthöhe für manche Fraktionen von allen drei Sensor-Modellen geringere Abweichungen zum *Wahrem Volumen* detektiert werden. Die Fraktionen *MG Fein*, *NE*, *MG Grob*, *PET Tray* etwa streuen um das *Wahre Volumen*, während die Materialien *GVK* und *PP* in allen Versuchen unterbestimmt wurden. Die Fraktionen *PPK* und *Reste* wurden fast immer überbestimmt (etwa 10 % oder mehr). Ein möglicher Grund für stetige Überbestimmung des Volumens könnten auch Verschattungseffekte sein. Außerdem sind unabhängig von der Messrichtung Unterschiede in der Streuung je Material ersichtlich. Fraktionen wie *MG Fein*, *NE*, *PET Flaschen*, *PP*, *PE* und *Flakes* streuen im Allgemeinen weniger (< 5%) als die Fraktionen *PPK*, *MG Grob* und *PET Tray* (> 10%). Ein Grund dafür kann sein, dass Fraktionen, die sich aus steifen Materialien wie z.B. *PET Flaschen* oder *NE-Metallen* zusammensetzen kaum durch Auflockerungs- bzw. Verdichtungseffekte bei Materialaufgabe beeinflusst werden, anders als Folien-lastige Fraktionen, wie z.B. *MG Grob* oder *Folien*. Ein möglicher Grund für die kleinere Streuung der *Sensorvolumina* bei 550 mm Schütthöhe für Fraktion *Folien* verglichen mit der Streuung bei 150 und 300 mm Schütthöhe könnte auf die Versuchsdurchführung zurückzuführen ist, da zum Bilden von 500 mm hohen Materialschüttungen weniger Materialumverteilung am Band stattfand, als dies für geringere Schütthöhen notwendig war.

Fraktion *NE* wird abgesehen von den beiden stark abweichenden Werte bei 300 mm Schütthöhe von den Volumenstromsensor-Modellen HDDM und HDDM+ stets überbestimmt, diese Ergebnisse decken sich mit den Ergebnissen aus der Arbeit von Pfund (2020) und scheinen für diese Sensor-Modelle systematische Abweichungen zu sein.

Das Volumen für Fraktion *GVK* wird bei jeder Schütthöhe von allen drei eingesetzten Volumenstromsensoren unterbestimmt. Eine mögliche Begründung könnte in der Materialzusammensetzung (KS-, Metall- und *PPK*-Folien) von *GVK* liegen. Eine andere Möglichkeit ist, dass die flächigen *GVK* in einem Behältnis wie einer Mulde mehr Raum einnehmen als auf einem Gurtförderer, wo sich Einzelobjekte weniger mit Seitenwänden speißen können.

Die nachfolgende Abbildung 48 soll Trends zur Detektierbarkeit in Abhängigkeit von Material und Schütthöhe erkennbar machen.

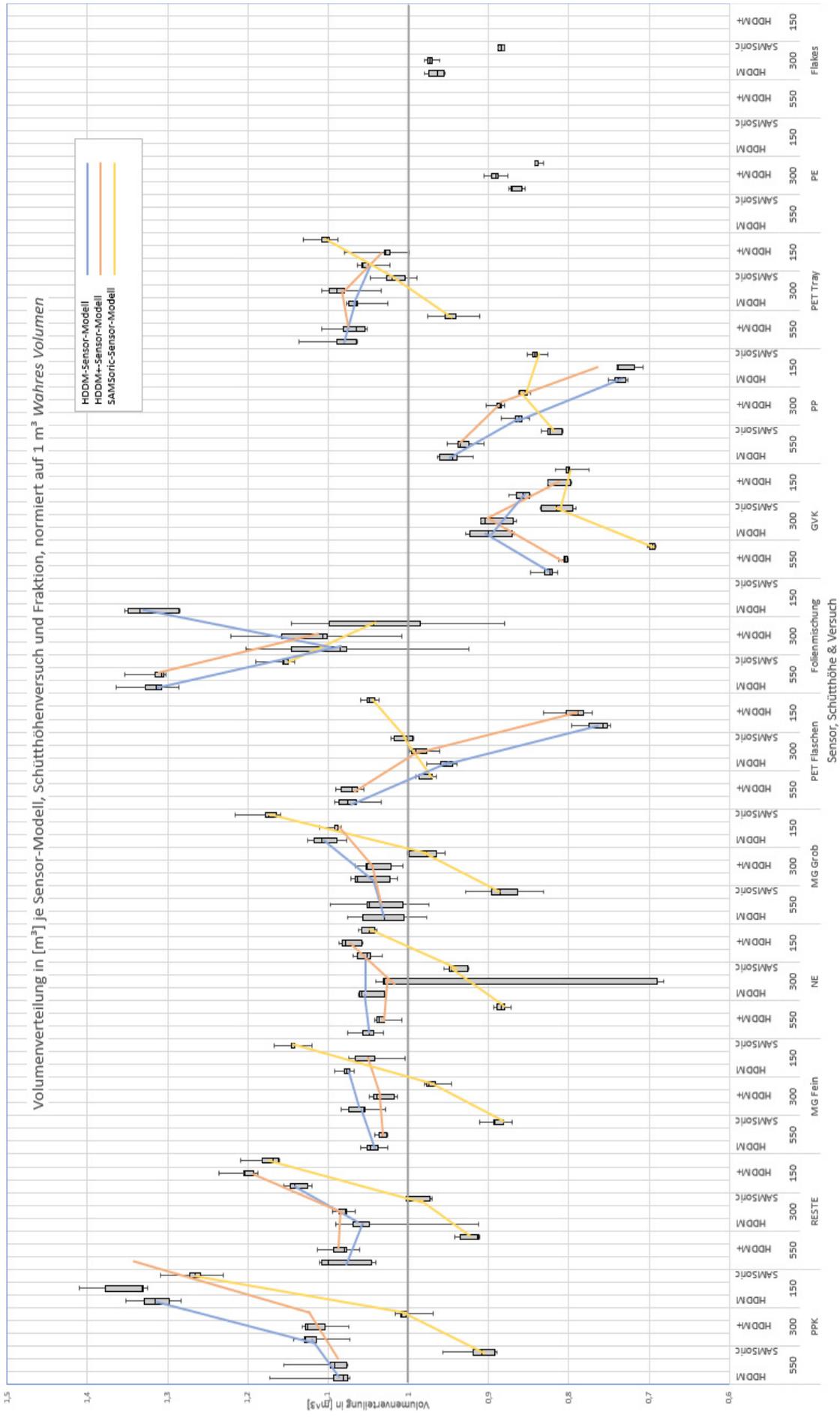


Abbildung 48 - Muster bzw. Trends bei der Volumenerkennung in Abhängigkeit von Sensor, Schütthöhe und Fraktion.

Für manche Materialien ist für die Volumenerkennung in Abhängigkeit von Material und Schüttung bei allen drei Sensoren ein, mehr oder weniger stark ausgeprägtes, gleiches Muster zu erkennen. Für die Fraktionen *PPK*, *Reste*, *MG Fein*, *NE*, *MG Grob* und *GVK* trifft zu, dass die Sensoren mit sinkender Schütthöhe mehr Volumen detektieren. Ein Grund dafür könnten bei steigender Schütthöhe zunehmende Verdichtungseffekte sein. Für die Fraktionen *PET Flaschen*, *Folien*, *PP* und *PET Tray* gilt wiederum, je geringer die Schütthöhe, desto niedriger das detektierte Volumen, jedoch auch wiederum nur für die Sensor-Modelle HDDM und HDDM+.

Ein weiterer Trend zeigt sich teilweise bei den Fraktionen *Folien*, *GVK* und *PP*: das *Sensorvolumen* nähert sich bei 300 mm Schütthöhe dem Normvolumen an, weicht jedoch sowohl bei geringerer als auch bei größerer Schütthöhe davon ab. Das könnte darauf hindeuten, dass der Richtigkeit der Messergebnisse mit den Ergebnissen bei 300 mm Schütthöhe sensor-technisch eine Grenze gesetzt ist.

Die Fraktions- und Schütthöhenspezifischen Trends in Abbildung 48 deuten darauf hin, dass entsprechende Korrekturfaktoren erstellt werden können, anhand derer systematische Messfehler neutralisiert würden.

### 4.1.5 Bandbelegungsversuche

Die folgende Abbildung 49 stellt die Ergebnisse aus den Bandbelegungsversuchen dar. Farbige Markierungen grenzen die unterschiedlichen Sensor-Modelle übersichtlich voneinander ab. Im Mittelpunkt dieser Ergebnisaufbereitung steht das unterschiedliche *Sensorvolumen* je Bandbelegung. Aus Gründen der Sensor-Verfügbarkeit konnten für Modell HDDM+ lediglich Ergebnisse aus den Versuchsreihen 200% und 400% Bandbelegung abgebildet werden. Die Ordinate zeigt die negative prozentuelle Abweichung vom *Sensorvolumen* zum *Wahren Volumen*.

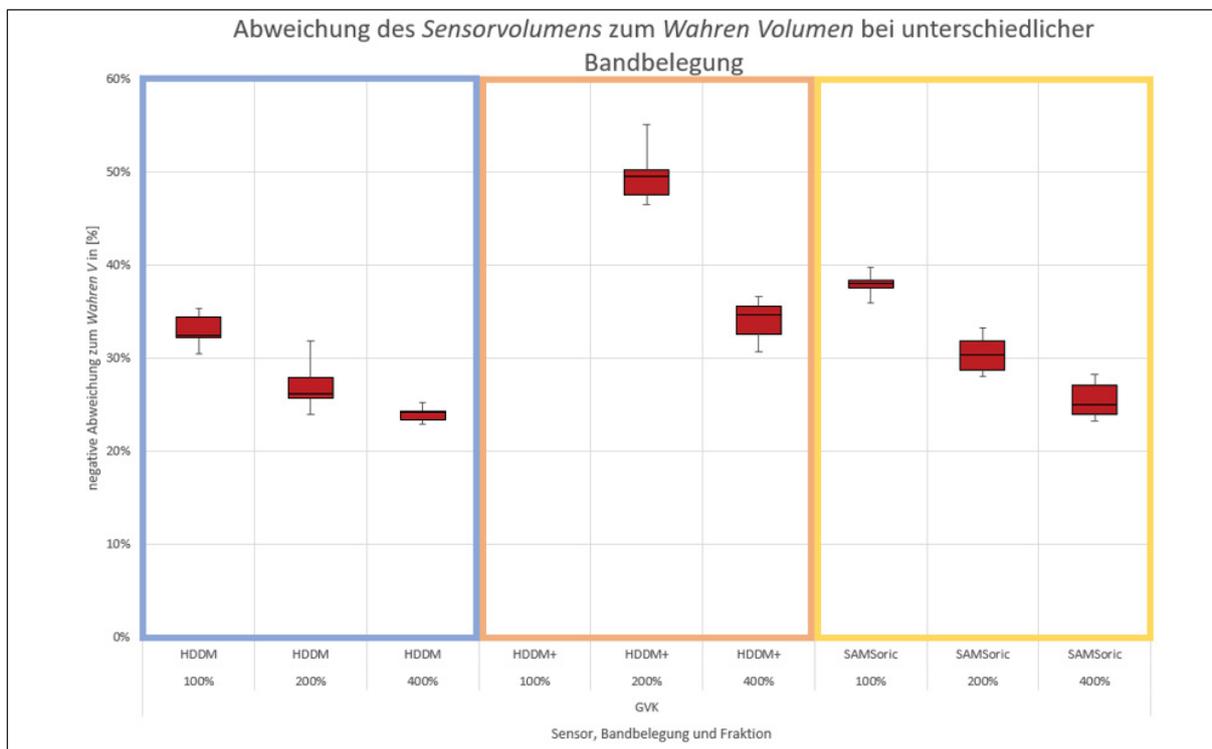


Abbildung 49 - Ergebnisse der Versuchsreihen 100%-, 200%- und 400%-Bandbelegung mit den Sensor-Modellen HDDM, HDDM+ und SAMSoric und GVK-Probenmaterial.

Aus Abbildung 49 wird ersichtlich, dass alle drei Sensor-Modelle prinzipiell zu wenig Material detektieren. Darüber hinaus zeigt sich eine Abnahme der Abweichung vom *Sensorvolumen* zum *Wahren Volumen* mit zunehmender Bandbelegung. Die gleichförmige Abstufung der Box-Whiskers für alle Sensor-Modelle und die geringe Streuung der *Sensorvolumen*-Abweichung von rund drei bis zehn Prozent lässt auf eine hohe Wiederholgenauigkeit bei den Messungen schließen. Die sinkende Abweichung des detektierten vom *Wahren Volumen* mit steigender Bandbelegung könnte darin begründet sein, dass beim Legen der zweiten (200 % Bandbelegung), dritten und vierten Schicht (400 % Bandbelegung) die Materiallücken der unterhalb befindlichen Schichten von darüber liegenden Einzelobjekten verdeckt und Teil des detektierten *Sensorvolumens* wurden. Zudem lassen die Ergebnisse der Schütthöhenversuche (Kapitel 3.4.3) die Hypothese zu, dass die Volumenstrommessung mit steigender Material-Schütthöhe akkurater wird.

### 4.1.6 Untersuchung des Lichteinflusses

Abbildung 50 zeigt die Ergebnisse aus den Lichteinflussversuchen. Zur leichten Vergleichbarkeit werden die *Sensorvolumina* nebeneinander und je nach Sensor farbig als Balken dargestellt. Darüber ist die prozentuelle Abweichung des Sensor-Ergebnisses vom *Wahren Volumen* angeführt.

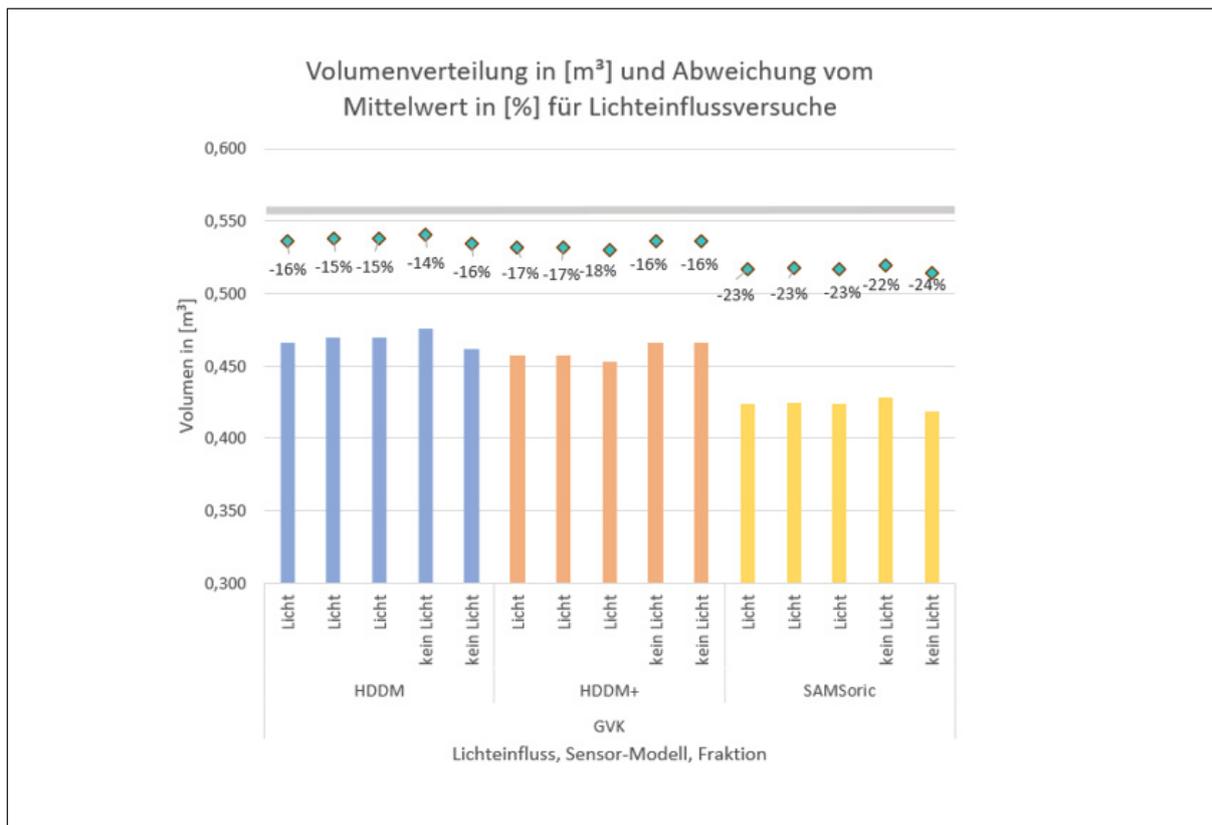


Abbildung 50 - Ergebnisse zur Untersuchung des Lichteinflusses auf das *Sensorvolumen* und prozentuelle Abweichung des mittleren *Sensorvolumens* vom *Wahren Volumen*. Vertikale Balken zeigen das *Sensorvolumen*, der grau gefärbte Querbalken das *Wahre Volumen* und farbige Quadrate die Abweichung vom mittleren *Sensorvolumen* zum *Wahren Volumen*.

Abbildung 50 zeigt für jedes Sensor-Modell ähnliche *Sensorvolumina* bei den Einzelversuchen *mit Licht*. Die Ergebnisse der Einzelversuche *ohne Licht* weichen im Gegensatz dazu stärker voneinander ab. Dabei ist jedoch der Unterschied zwischen den Ergebnissen verschiedener Sensor-Modelle größer als zwischen den Versuchen *mit* und *ohne Licht*.

Abbildung 51 zeigt die Ergebnisse aus den Lichteinflussversuchen. Die *Sensorvolumina* werden zur besseren Übersicht nebeneinander und je nach Sensor-Modell farbig als Balken dargestellt.

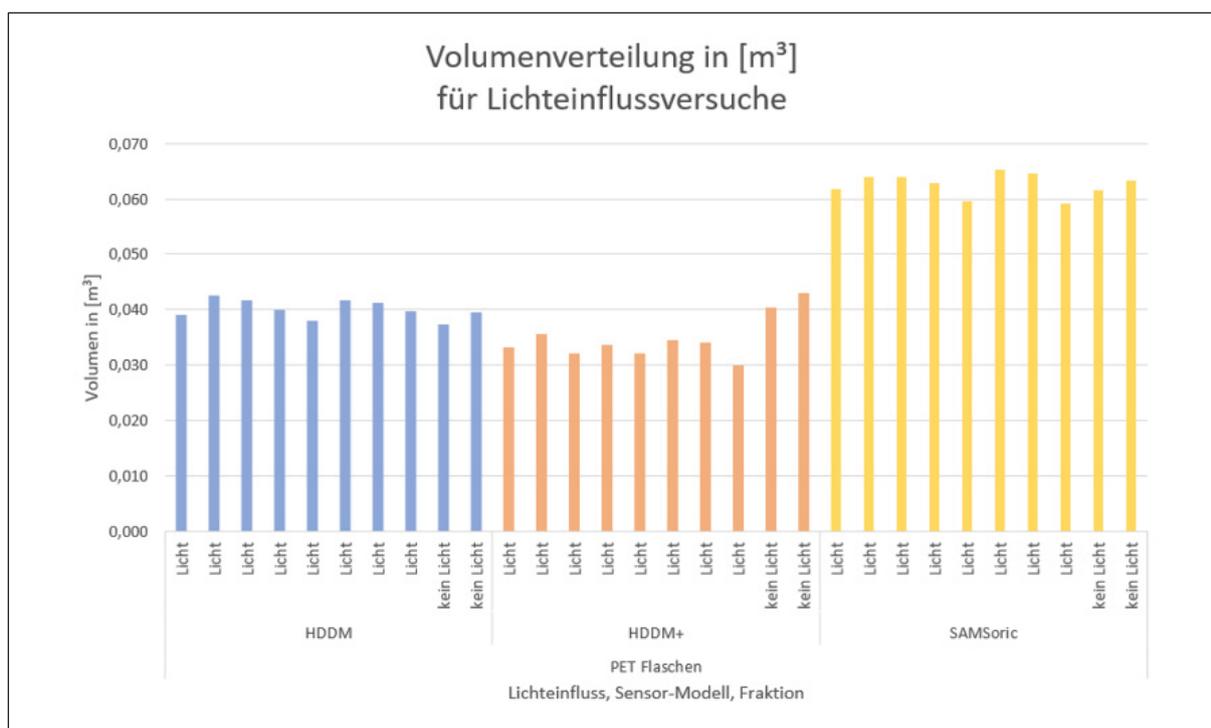


Abbildung 51 - Ergebnisse zur Untersuchung des Lichteinflusses auf das *Sensorvolumen*. Balken stellen die *Sensorvolumina* dar und unterscheiden sich je nach eingesetztem Sensor-Modell farblich voneinander.

Die Balken für Einzelversuche *mit Licht* heben sich lediglich bei Sensor-Modell HDDM+ augenscheinlich von jenen für die Einzelversuche *ohne Licht* ab. Wie in Abbildung 51 ersichtlich, ist dieses Sensor-Modell den NIR-Lampen am nächsten gelegen.

Die Ergebnisse aus Abbildung 50 und Abbildung 51 deuten tendenziell auf einen Einfluss der NIR-Sensor-Lampen auf das sensorisch gemessene Volumen hin, zu einem ähnlichen Ergebnis gelangt Pfund (2020, S. 19) bei indikativen Versuchen zum Einfluss von Fremdlicht auf die Messergebnisse.

### 4.1.7 Wasserversuche

Die folgende Abbildung zeigt eine Verteilung der *Sensorvolumina* trockener und feuchter PET-Flaschen-Proben als Box-Whiskers. Farbige Markierungen grenzen die unterschiedlichen Sensor-Modelle übersichtlich voneinander ab. Die prozentuellen Abweichungen der mittleren *Sensorvolumina* zum *Wahren Volumen* werden als Punkte dargestellt.

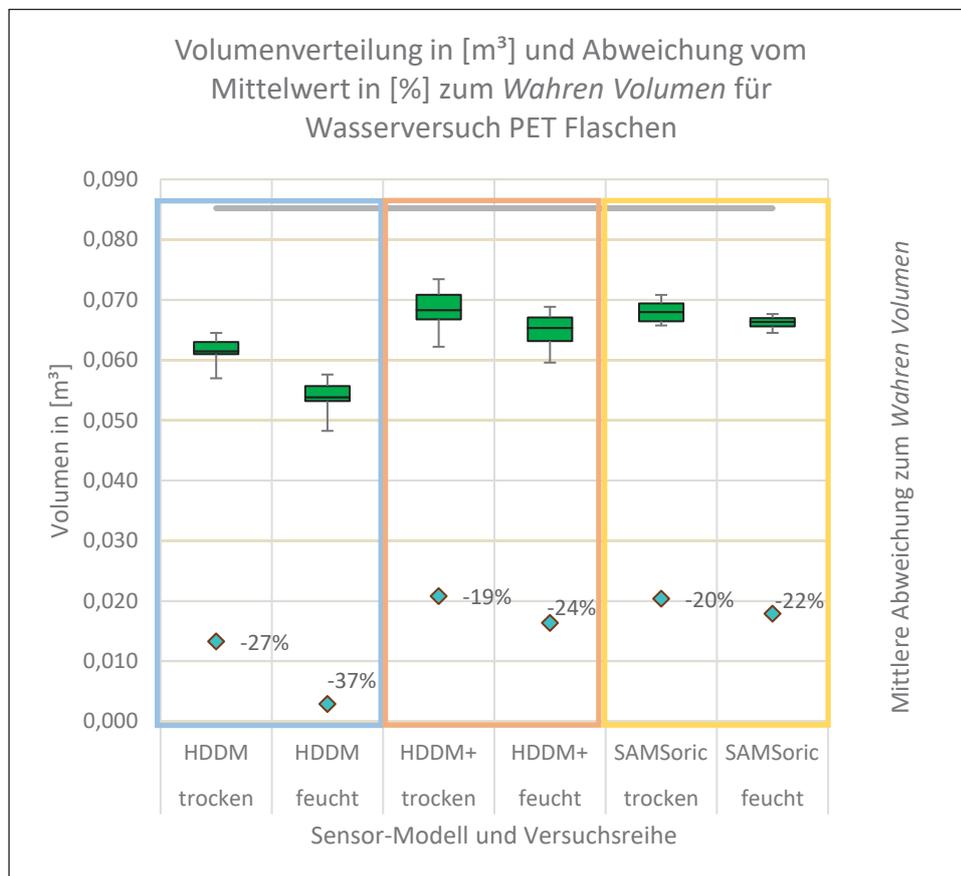


Abbildung 52 - Verteilung der *Sensorvolumina* als Box-Whiskers, mittlere Abweichung der *Sensorvolumina* vom *Wahren Volumen* als farbige Quadrate, farbige Umrandung grenzt Sensor-Modelle voneinander ab.

Das Diagramm in Abbildung 52 sagt aus, dass sämtliche Sensoren bei feuchtem Material weniger Volumen gemessen haben als bei trockenem Material. Die prozentuellen Abweichungen vom *Sensorvolumen* zum *Wahren Volumen* entspricht für die Modelle HDDM und HDDM+ etwa jenen aus den 150 mm Schütthöhenversuchen (Vgl. in Abbildung 44). Für Sensor-Modell SAMSoric trifft diese Beobachtung nicht zu.

Eine Beobachtung ist, dass Materialfeuchtigkeit die Sensorperformance beeinflusst. Sensor-Modell HDDM zeigt die größte Abweichung zum *Wahren Volumen* und scheint daher am ungeeignetsten zur Messung von feuchten Volumenströmen. Ein möglicher Grund für das vergleichsweise bessere Abschneiden von Sensor-Modell HDDM+ könnte darin liegen, dass dieser speziell zur Distanzmessung von diffus reflektierenden Objekten, wie es möglicherweise feuchte Materialien sind, ausgelegt wurde.

## 5 Zusammenfassung und Ausblick

Die Vorgaben im Rahmen des Kreislaufwirtschaftspaketes der EU erfordern eine Erhöhung der aktuellen Recyclingraten für Kunststoffverpackungsabfälle in Österreich. Eine Möglichkeit zur Erhöhung der Recyclingquoten stellt eine gesteigerte Sortiertiefe in LVP-Sortieranlagen dar. Große Heterogenität und schwankender Durchsatz von Verpackungsabfällen stellen jedoch Betreiber und Planer von Sortieranlagen vor wiederkehrende Herausforderungen und begrenzen das Potential von Materialausbringung und -Qualitäten. Denn die Sortier- und Trennleistung vieler der in den Anlagen eingesetzten Aggregate wird vom Materialdurchsatz beeinflusst.

Derzeitige Materialflussanalysen basieren zumeist auf Datenlage von Input- und Output-Mengen und sind daher erst verfügbar, nachdem das Material den Sortierprozess verlassen hat. Ein Eingreifen im Sinne einer dynamischen Stoffstromsteuerung ist dann nicht mehr möglich. Durch Neubau moderner hoch-technologisierter Anlagen bzw. Aufrüstung bestehender Sortieranlagen mit umfassender Sensortechnologie sollen in Zukunft Materialflussanalysen und -Steuerung in Echtzeit realisiert werden. Eine Möglichkeit zur Erfassung von Materialströmen stellt die Volumenstrommessung dar.

Ziel der vorliegenden Arbeit war, mögliche Volumenstrommesstechnologien und insbesondere Potentiale und Grenzen des LIDAR-Volumenstromsensors zu untersuchen. Im Grundlagenteil der Arbeit wurden die Ergebnisse der Recherche über Zusammensetzung und Beschaffenheit von LVP-Abfällen in Österreich und Deutschland dargestellt. Es wurde insbesondere auf die sehr unterschiedlichen Schüttdichten von LVP-Materialien eingegangen, welche vor allem in unterschiedlichen Sammelsystemen begründet sind. Anschließend wurden der grundsätzliche Aufbau einer LVP-Sortieranlage sowie die Funktionsweise oft eingesetzter Sortieraggregate präsentiert. In Kapitel 2.3 und 2.4 wurden die Rechercheergebnisse über mögliche Technologien zur Volumenstrommessung sowie Anwendungspotentiale des LIDAR-Sensors festgehalten. Im Rahmen vorliegender Masterarbeit wurden Technikumsversuche durchgeführt, in welchen über die Literaturrecherche hinausgehend Potentiale und Grenzen des LIDAR-Sensors untersucht wurden. Im Material- und Methoden-Teil der vorliegenden Arbeit wurden erst Herkunft und Zusammensetzung des Probenmaterials und dann der Versuchsaufbau beschrieben. Anschließend wurden in Kapitel 3.4 die Vorgehensweise bei Durchführung und Auswertung der Versuche dargestellt. Ergebnisse wurden in Kapitel 4 graphisch und tabellarisch aufbereitet, interpretiert und diskutiert. Es zeigte sich, dass Richtigkeit und Wiederholgenauigkeit der sensorisch ermittelten Messergebnisse sowohl von der Schütthöhe als auch der Materialart des Probenmaterials abhängig sind. Alle drei Sensor-Modelle erzielten bei 300 mm Schütthöhe für die meisten Materialien die geringste Abweichung zwischen detektiertem und *Wahrem Volumen* (etwa  $\pm 10\%$ ). Der Unterschied der Mess-Richtigkeit war für die meisten Fraktionen zwischen den verschiedenen Fraktionen größer als zwischen den verschiedenen Sensoren. Eine Hypothese ist, dass abweichende Messergebnisse nicht ausschließlich auf die Sensoren, sondern auch auf das Referenzvolumen zurückzuführen sind. Möglicherweise gibt es eine geeignetere Art das

*Wahre Volumen* als Referenzvolumen zu bestimmen. Darüber hinaus deuteten indikative Versuche darauf hin, dass die Materialfeuchtigkeit Einfluss auf die Sensorperformance hat. Für dasselbe Material in feuchtem Materialzustand wurde weniger Volumen detektiert als in trockenem Zustand. Es zeigte sich, dass eine den Sensoren nahe positionierte Lichtquelle tendenziell Einfluss auf das detektierte Volumen hat. Für belastbare Aussagen sollten weitere Untersuchungen diesbezüglich durchgeführt werden.

### **Ausblick**

Der nächste Schritt ist, geeignete Korrelationsfaktoren zwischen detektiertem und *Wahrem Volumen* zu finden.

Anschließend sollen die Ergebnisse der Technikumsversuche und die qualifizierten Korrelationsfaktoren verwendet werden, um die Volumenstromdaten zweier LIDAR-Sensoren aus großtechnischen Versuchen mit Produktmengen abzugleichen. Auf Basis dieser Ergebnisse soll eine Entscheidung für oder wider den umfassenden Einsatz der Sensoren in LVP-Sortieranlagen getroffen werden.

Anschließend könnte eine Anlagenweite Stoffstromüberwachung installiert und Hypothesen, wie die Möglichkeit zum Auffinden von Durchsatz-begrenzenden Stellen in Anlagen („Nadelöhre“) validiert werden. In Zukunft sollen die Volumenstromdaten nach Einführung von Maschine-zu-Maschine-Kommunikation genutzt werden, um eine dynamische Anlagensteuerung in Echtzeit zu realisieren. Indikative Versuche, wie jene zur Untersuchung des Einflusses von Material- und Fördergurtfeuchtigkeit auf die Sensorperformance könnten in größerem Umfang durchgeführt werden.

## 6 Verzeichnisse

### 6.1 Literaturverzeichnis

- Allesch, Astrid; Gabriel, Viktoria; Gloser, Silvia; Kranzinger, Lukas; Kreindl, Gernot; Meirer, Michael et al. (2020) *Recyclingziele 2025/30. Maßnahmen zur Erreichung der geplanten Recyclingziele*. [Online]  
<https://www.oewav.at/Publikationen?current=397645&mode=form> [08.03.2022]
- Altstoff Recycling Austria AG (2019) *Rohstoff Kunststoff. RESSOURCEN UND KREISLAUFWIRTSCHAFT NEU DENKEN. UND MACHEN*. [Online]  
<https://www.ara.at/muelltrennung-recycling> [08.03.2022]
- Kemnitz, Arnfried (2010) *Mathematik zum Studienbeginn. Grundlagenwissen für alle technischen, mathematisch-naturwissenschaftlichen und wirtschaftswissenschaftlichen Studiengänge*. 9. Auflage. Vieweg+Teubner-Verlag.
- Beck, Michael (2021): *Bedienungsanleitung\_SAMSoric. VOLPOWER*. [online]  
[www.samsoric.com](http://www.samsoric.com) [08.03.2022]
- Beyerer, Jürgen; Puente León, Fernando; Frese, Christian (2012) *Automatische Sichtprüfung*. Springer-Verlag. ISBN 978-3-642-23965-6.
- Bilitewski, Bernd; Härdtle, Georg (2013) *Abfallwirtschaft. Handbuch für Praxis und Lehre*. 4. Auflage. Springer Vieweg-Verlag. ISBN 978-3-540-79530-8.
- Bingöl, Ferhat; Mann, Jakob; Larsen, Gunner C. (2010) *Light detection and ranging measurements of wake dynamics part I: one-dimensional scanning*. In: *Wind Energy*. 13 (1), S. 51–61. DOI: 10.1002/we.352.
- BMK (2021) *Die Bestandsaufnahme der Abfallwirtschaft in Österreich - Statusbericht 2021. Statusbericht 2021 (Referenzjahr 2019)*. Bundesministerium für Klimaschutz, Umwelt, Energie, Mobilität, Innovation und Technologie [Online]  
<https://www.umweltbundesamt.at/umwelthemen/abfall/abfall-daten> [08.03.2022]
- BMLRT (2014) *Verordnung des Bundesministers für Land- und Forstwirtschaft, Umwelt und Wasserwirtschaft über die Vermeidung und Verwertung von Verpackungsabfällen und bestimmten Warenresten vom 23.07.2014*. In: Bundesgesetzblatt. Bundesministerium für Landwirtschaft, Regionen und Tourismus. [Online]  
<https://www.ris.bka.gv.at/GeltendeFassung.wxe?Abfrage=Bundesnormen&Gesetzesnummer=20008902> [08.03.2022]
- BMNT (2017) *Bundes-Abfallwirtschaftsplan 2017, Teil 1*. Bundesministerium für Nachhaltigkeit und Tourismus. ISBN 978-3-903129-32-0 [Online]  
[https://www.bmk.gv.at/themen/klima\\_umwelt/abfall/aws/bundes\\_awp/bawp.html](https://www.bmk.gv.at/themen/klima_umwelt/abfall/aws/bundes_awp/bawp.html) [08.03.2022]
- BMNT (2019) *Abfall Trenn-ABC*. Bundesministerium für Nachhaltigkeit und Tourismus. [Online]

- [https://www.bmk.gv.at/themen/klima\\_umwelt/abfall/Kreislaufwirtschaft/trennung/abc.html](https://www.bmk.gv.at/themen/klima_umwelt/abfall/Kreislaufwirtschaft/trennung/abc.html) [08.03.2002]
- Curtis, Alexander; Küppers, Bastian; Möllnitz, Selina; Khodier, Karim; Sarc, Renato (2021b) *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.
- Deutsche Pfandsystem GmbH (2022) *Der DPG-Einwegpfandprozess*. [Online] <https://dpg-pfandsystem.de/index.php/de/> [08.03.2022].
- EK (2019) *DURCHFÜHRUNGSBESCHLUSS (EU) 2019/ 665 DER KOMMISSION - vom 17. April 2019 - zur Änderung der Entscheidung 2005/ 270/ EG zur Festlegung der Tabellenformate für die Datenbank gemäß der Richtlinie 94/ 62/ EG des Europäischen Parlaments und des Rates über Verpackungen und Verpackungsabfälle - (Bekannt gegeben unter Aktenzeichen C(2019) 2805)*. In: *Amtsblatt der Europäischen Union*. [Online] <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/DE/TXT/?uri=celex:32019D0665> [08.03.2022]
- EUWID Recycling und Entsorgung (2021) *Prezero erhält grünes Licht für Cespa-Übernahme*. [Online] <https://www.euwid-recycling.de/news/wirtschaft/einzelansicht/Artikel/prezero-erhaelt-gruenes-licht-fuer-cespa-uebernahme.html> [08.03.2022]
- Feil, Alexander; Coskun, Erdogan; Bosling, Marcel; Kaufeld, Sebastian; Pretz, Thomas (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, Alexander; Pretz, Thomas; Vitz, Philipp; van Thoden Velzen, Eggo Ulphard (2017) *A methodical approach for the assessment of waste sorting plants*. In: *Waste management & research : the journal of the International Solid Wastes and Public Cleansing Association, ISWA* 35 (2), S. 147–154. DOI: 10.1177/0734242X16683270.
- Gesellschaft für Verpackungsmarktforschung mbH (2020) *Verpackungsaufkommen\_2020*. [Online] [https://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/384/bilder/dateien/2\\_tab\\_entwicklung-verpackungsaufkommen\\_2020-11-17.pdf](https://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/384/bilder/dateien/2_tab_entwicklung-verpackungsaufkommen_2020-11-17.pdf). [10.01.2022]
- Heckenkamp, Christoph (2008) *Das magische Auge. Grundlagen der Bildverarbeitung: Das PMD-Prinzip*. In: *INSPECT*, S. 25–28. [Online] [167066 \(wileyindustrynews.com\)](https://www.wileyindustrynews.com/167066) [08.03.2022]
- HUG (Hg.) (2022) *Umrechnungstabelle Kunststoff-Tabelle. Eigenschaften und technische Werte*. [Online] <https://www.hug-technik.com/inhalt/ta/kunststoff.html> [08.03.2022]
- Ignatowitz, Eckhard (2011) *Chemietechnik*. 10. Auflage. Verlag EUROPA-LEHRMITTEL. ISBN 978-3-8085-7050-0

- Kranert, Martin (2017) *Einführung in die Kreislaufwirtschaft. Planung -- Recht -- Verfahren*. 5. Auflage. Springer Vieweg-Verlag. ISBN 978-3-8348-1837-9
- Küppers, Bastian; Schlögl, Sabine; Friedrich, Karl; Lederle, Laura; Pichler, Celestine; Freil, Julia et al. (2021) *Influence of material alterations and machine impairment on throughput related sensor-based sorting performance*. In: *Waste management & research : the journal of the International Solid Wastes and Public Cleansing Association, ISWA* 39 (1), S. 122–129. DOI: 10.1177/0734242X20936745.
- Luetzenburg, Gregor; Kroon, Aart; Bjørk, Anders A. (2021) *Evaluation of the Apple iPhone 12 Pro LiDAR for an Application in Geosciences*. In: *Scientific reports* 11 (1), S. 22221. DOI: 10.1038/s41598-021-01763-9.
- MOLLET Füllstandtechnik GmbH (2019) Schüttgüter. Schüttdichten Schüttgewichte. [Online] <https://www.mollet.de/info/schuettedichte-und-schuettgewicht.html> [08.03.2022]
- Möllnitz, Selina; Küppers, Bastian; Curtis, Alex; Khodier, Karim; Sarc, Renato (2021) *Influence of pre-screening 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, Christian; Stoifl, Barbara; Tesar, Maria; Thaler, Peter (2021) *SORTIERUNG UND RECYCLING VON KUNSTSTOFFABFÄLLEN IN ÖSTERREICH: STATUS 2019*. [Online] [https://www.umweltbundesamt.at/fileadmin/site/publikationen/rep0744\\_hauptteil.pdf](https://www.umweltbundesamt.at/fileadmin/site/publikationen/rep0744_hauptteil.pdf) [08.03.2022]
- Pepperl+Fuchs Group (2020) *LiDAR Sensoren*. [Online] [https://files.pepperl-fuchs.com/webcat/navi/productInfo/doct/tdoct6563a\\_ger.pdf?v=20201214161111](https://files.pepperl-fuchs.com/webcat/navi/productInfo/doct/tdoct6563a_ger.pdf?v=20201214161111) [08.03.2022]
- Pfund, Elias (2020) *Entwicklung einer Messmethodik zur Volumenstrommessung inhomogener Stoffströme unter Berücksichtigung der Beurteilung der Gleichmäßigkeit*. Masterarbeit der Universität Ravensburg-Weingarten. Ravensburg.
- Pomberger, Roland (2018) *Was kann die Trenntechnik?* [Online] [https://www.avaw-unileoben.at/media/Modul\\_9\\_OeWAV\\_JT\\_2018\\_Was\\_kann\\_die\\_Trenntechnik\\_Text.pdf](https://www.avaw-unileoben.at/media/Modul_9_OeWAV_JT_2018_Was_kann_die_Trenntechnik_Text.pdf) [08.03.2022]
- Pomberger, Roland (2021) *RECYCLINGFÄHIGKEIT VON VERPACKUNGEN. Technische Möglichkeiten und Praxisbeispiele*. ISBN 978-903309-21-0.
- Pretz, Thomas; Julius, Jörg (2008) *Stand der Technik und Entwicklung bei der berührungslosen Sortierung von Abfällen*. In: *Österr Wasser- und Abfallw* 60 (7-8), S. 105–112. DOI: 10.1007/s00506-008-0005-0.
- PreZero Recycling Süd GmbH (2021) Informationen Sammelsystem, 2021. Email von PreZero-Mitarbeiter an Martina Schwarzenbacher.

- Ratzinger, Erwin (2011) *Kontinuierliche Messung und Dosierung von Schüttgütern*. In: *Berg Huettenmaenn Monatsh* 156 (6), S. 209–214. DOI: 10.1007/s00501-011-0653-4.
- Rauch, Winfrid (2020) *Schubbodentechnik*. Wiesbaden. Springer Vieweg-Verlag. ISBN 978-3-658-31502-3.
- Reif, Konrad (2012) *Sensoren im Kraftfahrzeug*. 2. Auflage. Springer Vieweg-Verlag, ISBN 978-3-8348-1778-5.
- Reutebuch, Stephen E.; Andersen, Hans-Erik; McGaughey, Robert J. (2005) *Light Detection and Ranging (LIDAR): An Emerging Tool for Multiple Resource Inventory*. In: *Journal of Forestry*. [Online] <https://www.fs.usda.gov/treearch/pubs/25534> [08.03.2022]
- Sarc, Renato; Curtis, Alexander; Kandlbauer, Lisa; Khodier, Karim; Lorber, Karl E.; Pomberger, Roland (2019) *Digitalisation and intelligent robotics in value chain of circular economy oriented waste management - A review*. In: *Waste management (New York, N. Y.)* 95, S. 476–492. DOI: 10.1016/j.wasman.2019.06.035.
- Schlögl, Sabine (2021) *Stand der Technik von Kunststoffsortieranlagen und Potentiale durch sensorische Stoffstromüberwachung*. Masterarbeit. Montanuniversität, Leoben.
- Senshu, Hiroki; Mizuno, Takahide; Umetani, Kazuhiro; Nakura, Toru; Konishi, Akihiro; Ogawa, Akihiko et al. (2021) *Light detection and ranging (LIDAR) laser altimeter for the Martian Moons Exploration (MMX) spacecraft*. In: *Earth Planets Space* 73 (1). DOI: 10.1186/s40623-021-01537-7. [Online] <https://earth-planet-space.springeropen.com/articles/10.1186/s40623-021-01537-7> [08.03.2022]
- SICK (2017) *HDDM+ – Innovative Technologie von SICK für die -Distanzmessung*. [Online] [https://cdn.sick.com/media/docs/0/10/510/whitepaper\\_hddm\\_innovative\\_technology\\_or\\_distance\\_measurement\\_from\\_sick\\_de\\_im0076510.pdf](https://cdn.sick.com/media/docs/0/10/510/whitepaper_hddm_innovative_technology_or_distance_measurement_from_sick_de_im0076510.pdf) [08.03.2022]
- SICK (2018) *LiDAR sensor functionality and variants*. [Online] [https://cdn.sick.com/media/docs/3/63/963/whitepaper\\_lidar\\_en\\_im0079963.pdf](https://cdn.sick.com/media/docs/3/63/963/whitepaper_lidar_en_im0079963.pdf) [08.03.2022]
- SICK AG (2015): *Operating instructions TiM55x/56x/57x*. [Online] <https://usermanual.wiki/m/5e4add056445555a8b100aacd64c31a2e09e12276f6915d28cddae206ec2dd9d.pdf> [08.03.2022]
- Statistisches Landesamt Baden-Württemberg (2018) *Umrechnungsfaktoren für die Abfallstatistiken*. [Online] [https://www.statistik-bw.de/DatenMelden/Formularservice/33\\_A\\_Umrechnungsfaktoren.pdf](https://www.statistik-bw.de/DatenMelden/Formularservice/33_A_Umrechnungsfaktoren.pdf) [08.03.2022]
- Thome-Kozmiensky, Karl, J (1992) *Materialrecycling durch Abfallaufbereitung. Grundkursus*. EF-Verlag für Energie- und Umwelttechnik GmbH. ISBN 3-924511-53-5
- Vecoplan AG (2018) *Sackaufreißer mit extrem hohem Durchsatz*. [Online] [https://vecoplan.com/fileadmin/pdf/focus/F\\_VSA\\_2500\\_DE\\_01.pdf](https://vecoplan.com/fileadmin/pdf/focus/F_VSA_2500_DE_01.pdf) [08.03.2022]

- VÖEB (2022) *Umrechnungsfaktoren zu einzelnen Abfallfraktionen*. [Online]  
<https://www.wien.gv.at/umweltschutz/abfall/pdf/umrechnungsfaktoren.pdf>  
 [08.03.2022]
- Wagner, Jörg; Günther, Marko; Meyer, Peter; Rhein, Hans-Bernhard (2018) *Analyse der Effizienz und Vorschläge zur Optimierung von Sammelsystemen der haushaltsnahen Erfassung von Leichtverpackungen und stoffgleichen Nichtverpackungen auf der Grundlage vorhandener Daten*. [Online]  
<https://www.umweltbundesamt.de/publikationen/analyse-der-effizienz-vorschlaege-zur-optimierung> [08.03.2022]
- Wehrli, Iris (Hg.) (2015) *Erfassung der Struktur und ökologische Bewertung von Waldrändern mit LiDAR- und anderen räumlichen Daten: Entwicklung eines Schlüssels zur ökologischen Waldrandbewertung mit Geodaten für den Kanton Aargau*. [Online]  
<https://www.research-collection.ethz.ch/handle/20.500.11850/113938?locale-attribute=de> [08.03.2022]
- Wellacher, Martin; Aldrian, Alexia; Pomberger, Roland (2016) *Neue Methode zur Beprobung von Abfällen in Ballen*. [Online] <https://www.ibwellacher.at/wp-content/uploads/2015/02/Neue-Methode-zur-Beprobung-von-Abfaellen-in-Ballen-2016.pdf> [08.03.2022]

## 6.2 Abkürzungsverzeichnis

€ <i>Euro</i>	m <sup>3</sup> <i>Kubikmeter</i>
2D <i>zweidimensional</i>	Mio. <i>Millionen</i>
3D <i>dreidimensional</i>	mm <i>Millimeter</i>
ASZ <i>Altstoffsammelzentrum</i>	NE <i>Nicht-Eisen Metalle</i>
bzgl. <i>bezüglich</i>	NIR <i>Nahinfrarot</i>
bzw. <i>beziehungsweise</i>	nm <i>Nanometer</i>
ca. <i>circa</i>	NV <i>Nicht-Verpackung</i>
EPS <i>Expandiertes Polystyrol</i>	NVP <i>Nicht-Verpackung</i>
etc. <i>et cetera</i>	PE <i>Polyethylen</i>
evtl. <i>eventuell</i>	PET-Flaschen <i>Polyethylenterephthalat-Flaschen</i>
FE <i>Eisenmetalle</i>	PP <i>Polypropylen</i>
GF <i>Gurttörderer</i>	PPK <i>Papier-Pappe-Karton</i>
GVK <i>Getränkeverbundkarton</i>	PS <i>Polystyrol</i>
h <i>Stunde</i>	PVC <i>Polyvinylchlorid</i>
HDPE <i>High Density Polyethylen</i>	s <i>Sekunde</i>
inkl. <i>inklusive</i>	SN <i>Schlüsselnummer, Schlüsselnummer</i>
KF <i>Kornform</i>	SPS <i>Speicherprogrammierbare Steuerung</i>
KG <i>Korngröße</i>	SÜ <i>Siebüberlauf</i>
KS <i>Kunststoff</i>	SU 1 <i>Siebunterlauf 1</i>
LDPE <i>Low Density Polyethylen</i>	SU 2 <i>Siebunterlauf 2</i>
LIDAR <i>Light detection and ranging oder Ligth imaging detection and ranging</i>	t/m <sup>3</sup> <i>Tonne pro Kubikmeter</i>
LKW <i>Lastkraftwagen</i>	u.a. <i>unter anderem</i>
LVP <i>Leichtverpackung</i>	u.ä. <i>und ähnliches</i>
m <i>Meter, Minute</i>	Vol. -% <i>Volumesprozent</i>

### 6.3 Tabellen

Tabelle 1 - Zusammensetzung des 2018 in Österreich und in Deutschland angefallenen Verpackungsabfalls (BMK 2021; Gesellschaft für Verpackungsmarktforschung mbH 2020).....	6
Tabelle 2 – Unterschiedliche Sammelsysteme in Österreich und Deutschland (Bundesministerium für Nachhaltigkeit und Tourismus 2019; Gesellschaft für Verpackungsmarktforschung mbH 2020; Wagner et al. 2018).....	7
Tabelle 3 - Material- und Schüttdichten unterschiedlicher Fraktionen in Tonne pro Kubikmeter ( $t/m^3$ ), sowie deren Platzbedarf in $m^3/t$ Material (Statistisches Landesamt Baden-Württemberg 2018; VÖEB 2022; Rauch 2020; Wellacher et al.; MOLLET Füllstandtechnik GmbH 2019; HUG 2022) .....	11
Tabelle 4 - <i>Wesentliche Input- und Outputströme bei Kunststoffsortieranlagen 2019</i> (BMK 2021).....	13
Tabelle 5 – Mögliche zugrundeliegende Messprinzipien zur Volumenstrommessung.....	27
Tabelle 6 - Gängige Aggregate in einer LVP-Sortieranlage, Volumenstrom als Einflussfaktor auf die Funktionstüchtigkeit und Einsatzmöglichkeiten von Volumenstromsensoren. ....	32
Tabelle 7 – Überblick über durchgeführte Versuche mit verschiedenen Fraktionen und dabei eingesetzten Sensor-Modellen. ....	36
Tabelle 8 - Darstellung der Unterschiede in den gesammelten Materialien im Rahmen der Sammelsysteme <i>LVP, Flach, Rund</i> und <i>Wertstoff</i> (Wagner et al. 2018).....	37
Tabelle 9 - Output-Fraktionen der LVP-Sortieranlage.....	38
Tabelle 10 – Beschreibung des Probenmaterials: Angeführt werden für die Probenfraktion typische Charakteristika und Beschaffenheit wie Korngröße und Kornform, enthaltene Objekte und Fremdstoffe sowie das Probengewicht. ....	44
Tabelle 11 - Technische Daten LIDAR-Sensor-Modell TiM561 (SICK AG 2015). ....	45
Tabelle 12 - Abgrenzung verwendeter Volumen-Begriffe: Begriffe in grün eingefärbten Zellen beschreiben „wahre“ Werte, welche als Referenz für sensorisch gemessene Volumina (orange eingefärbte Zelle) herangezogen werden. ....	53
Tabelle 13 - Ausschnitt aus dem Versuchsplan mit Angabe eingesetzter Sensor-Modelle, Datum und fortlaufender Versuchsnummer. ....	55
Tabelle 14 - Ausschnitt aus dem Versuchsplan, der das verwendete Probenmaterial, die eingesetzten Sensoren, Datum und fortlaufende Versuchsnummern für die 150 mm Schütthöhenversuche zeigt. ....	58

Tabelle 15 - Ausschnitt aus dem Versuchsplan, der das verwendete Probenmaterial, die eingesetzten Sensoren, Datum und fortlaufende Versuchsnummern für die 300 mm Schütthöhenversuche zeigt. ....	62
Tabelle 16 - Ausschnitt aus dem Versuchsplan, der das verwendete Probenmaterial, die eingesetzten Sensoren, Datum und fortlaufende Versuchsnummern für die 550 mm Schütthöhenversuche zeigt. ....	64
Tabelle 17 - Ausschnitt aus dem Versuchsplan, der das verwendete Probenmaterial, die eingesetzten Sensoren, Datum und fortlaufende Versuchsnummern für die Bandbelegungsversuche zeigt. ....	67
Tabelle 18 - Ausschnitt aus dem Versuchsplan, der das verwendete Probenmaterial, die eingesetzten Sensoren, Datum und fortlaufende Versuchsnummer für die Licht-Einfluss-Versuche zeigt. Jene Versuchsnummern sind mit einem Stern* gekennzeichnet, wenn die Lampen während des Versuchs eingeschaltet waren. ....	69
Tabelle 19 - Ausschnitt aus dem Versuchsplan, der das verwendete Probenmaterial, die eingesetzten Sensoren, Datum und fortlaufende Versuchsnummern für die Wasser-Einfluss-Versuche zeigt. ....	72
Tabelle 20 - Ergebnis aus der Berechnung des mittleren Volumenstromes über die Grundrauschwerte sämtlicher Versuchstage, je Sensor-Modell. ....	81
Tabelle 21 - Ergebnisse aus den Berechnungen der mittleren Volumenströme über die Grundrauschwerte je Versuchstag und Sensor-Modell. ....	82
Tabelle 22 - <i>Wahres Volumen</i> sämtlicher Materialproben. ....	83
Tabelle 23 - <i>Wahres Wannenvolumen</i> . ....	83
Tabelle 24 - Zusammenfassung der Ergebnisse zur prozentuellen Abweichung vom mittleren <i>Sensorvolumen</i> zum Normvolumen bei 150 mm Schütthöhe. ....	91
Tabelle 25 - Zusammenfassung der Ergebnisse zur prozentuellen Abweichung vom mittleren <i>Sensorvolumen</i> zum Normvolumen bei 300 mm Schütthöhe. ....	92
Tabelle 26 - Zusammenfassung der Ergebnisse zur prozentuellen Abweichung vom mittleren <i>Sensorvolumen</i> zum Normvolumen bei 550 mm Schütthöhe. ....	93

## 6.4 Abbildungen

Abbildung 1 - Gegenüberstellung der Zusammensetzung von Verpackungsabfällen in Österreich und Deutschland; erstellt auf Basis von (BMK 2021; Gesellschaft für Verpackungsmarktforschung mbH 2020). ....	8
Abbildung 2 - Materialzusammensetzung von Leichtverpackungsabfällen aus unterschiedlichen Sammelsystemen und Einzugsgebieten in Deutschland; erstellt auf Basis von (Wagner et al. 2018). ....	9
Abbildung 3 - Gegenüberstellung unterschiedlicher PE-Mengen und Volumina zur Verdeutlichung der "Volumenproblematik"; erstellt auf Basis von (Statistisches	

Landesamt Baden-Württemberg 2018; VÖEB 2022; Rauch 2020; Wellacher et al.; MOLLET Füllstandtechnik GmbH 2019; HUG 2022).	12
Abbildung 4 - Beispielbild eines Sackaufreißers (Vecoplan AG 2018).	15
Abbildung 5 – Seitenansicht: Nach Materialaufgabe (A) erfolgt die Sortierung von Materialien nach KG in Siebunterlauf (SU) und Siebüberlauf (SÜ). Vorderansicht: Auf Laufrädern gelagerter Trommelkörper und Laufstege für Umrüstungs- und Wartungsarbeiten.....	16
Abbildung 6 - Veranschaulichung der Funktionsweise eines Trommelsiebes mit progressiver Lochung: zu klassierendes Material wird aufgegeben (A) und in die unterschiedlichen Kornklassen Siebunterlauf 1 (SU 1), Siebunterlauf 2 (SU 2) und Siebüberlauf (SÜ) getrennt; erstellt auf Basis von (Kranert 2017).....	16
Abbildung 7 - Funktionsprinzip eines Windsichters; erstellt auf Basis von (Kranert 2017).....	17
Abbildung 8 – Überbandmagnet zur Abtrennung von FE-Metallen aus Materialströmen (Bilitewski und Härdtle 2013).....	18
Abbildung 9 - Wirbestromscheider zur Abtrennung von NE-Metallen (Kranert 2017).....	18
Abbildung 10 - Veranschaulichung des Trennprinzips eines Ballistikseparators (Bilitewski und Härdtle 2013, 501).....	19
Abbildung 11 - Veranschaulichung von Aufbau und Funktionsweise eines Bandsortierers (Kranert 2017, 242).	20
Abbildung 12 - Schema eines möglichen Verfahrensbildes zur Sortierung von LVP-Material; erstellt auf Basis von (Bilitewski und Härdtle 2013, S. 500–501; Thome-Kozmiensky, Karl, J 1992, S. 29; Wagner et al. 2018).....	22
Abbildung 13 - Funktionsweise Lasertriangulation; erstellt auf Basis von (Beyerer et al. 2012).....	25
Abbildung 14 - Funktionsweise Lichtschnittverfahren; erstellt auf Basis von (Beyerer et al. 2012).....	25
Abbildung 15 - Funktionsweise Lichtlaufzeitmessung; erstellt auf Basis von (Beyerer et al. 2012).....	26
Abbildung 16 - Funktionsprinzip der Volumenstrommessung mittels LIDAR-Technologie; erstellt auf Basis von (Pfund 2020).....	28
Abbildung 17 - Verschattungseffekte: z.B. durch gestapeltes, hohes oder eingeklemmtes Material; erstellt auf Basis von (Pfund 2020).	30
Abbildung 18 - Vereinfachtes Fließbild der PreZero Sortieranlage. Materialströme der KG < 50 und > 220 mm sind für die weitere Arbeit irrelevant und werden daher nicht näher ausgeführt. Abkürzung NIR-GVK wird für einen NIR-Sensor mit GVK als Eject verwendet. An zwei Stellen (markiert durch gelb gefärbte Ringe) wurde Probenmaterial vom bewegten Band genommen. Die eckigen gelb gefärbten Umrandungen markieren die Entnahmestellen der restlichen Probenfraktionen. Zusätzlich angebrachte	

Volumenstrom- und NIR-Sensoren sind mit gelb und orange gefärbten gekreuzten Balken markiert; erstellt auf Basis von PreZero (2021).....	39
Abbildung 19 – Die Probenahme für die Fraktionen NE, PE, PET Flaschen, PET Tray, PP, PPK, GVK und Reste erfolgte über Probenahmetrichter zwischen Handsortierkabine und Ballenpresse. ....	41
Abbildung 20 - Probenmaterial: 1) <i>Folien</i> , 2) <i>MG Grob</i> , 3) <i>MG Fein</i> , 4) <i>NE</i> , 5) <i>PE</i> , 6) <i>PET Flaschen</i> , 7) <i>PET Tray</i> , 8) <i>PP</i> , 9) <i>PPK</i> , 10) <i>Reste</i> und 11) <i>GVK</i> . ....	42
Abbildung 21 - Reichweiten-Diagramm inklusive Winkelauflösung und Öffnungswinkel; erstellt auf Basis von SICK AG (2015).....	46
Abbildung 22 - Funktionsweise SAMsoric-Sensor; erstellt auf Basis von (Beck 2021).....	48
Abbildung 23 - Skizze vom allgemeinen Aufbau des Versuchsstandes (Ansicht, Bemaßt). ...	49
Abbildung 24 - Skizze vom allgemeinen Aufbau des Versuchsstandes (Draufsicht, Bemaßt mit Legende). ....	50
Abbildung 25 - Foto vom allgemeinen Versuchsstand inklusive den Volumenstrom-Sensor-Modellen HDDM (1), SAMsoric (2) und HDDM+ (3), dem NIR-Sensor (4) inklusive zweier Lampen (4.1 & 4.2) sowie den dazugehörigen Schaltkästen (1.1, 3.1 & 4.3) sowie dem portablen Rechner (2.1) und den Gurtförderern GF 1 und G F2 (Ansicht, Nummeriert). ....	51
Abbildung 26 - 1) Mulde und 2) KS-Wanne zur Bestimmung des Probenvolumens sowie Beispielbilder vom Schüttvolumen der Fraktionen 3) PET Tray, 4) PP-, 5) Folien vor einem Einzelversuch & 6) Folien nach demselben Einzelversuch. ....	54
Abbildung 27 - Materialaufgabe Flakes-Referenzversuch (Schütthöhenversuch). Mittels Meterstab wurde das Erreichen der angepeilten Schütthöhe kontrolliert. ....	56
Abbildung 28 - Aufbau Adaptierter Versuchsstand: Holzkonstruktion mit Abstreifer dient als Art „Höhenkontrolle“ für die 150 mm Schütthöhenversuche.....	59
Abbildung 29 - – Um eine Materialverstopfung unter der 150 mm hohen „Höhenkontrolle“ durch nachschiebendes Material zu vermeiden, wurde zur Materialaufgabe ein Teil der Probe als Materialbett auf dem stehenden Band verteilt und ein Teil aus den Wannen auf das freiwerdende fahrende Band geleert. 1) Materialaufgabe der Folien-lastigen Mittelgut Grob-Fraktion, 2) Materialaufgabe Mittelgut Fein-Fraktion und 3) Materialaufgabe NE-Fraktion.....	60
Abbildung 30 – Herausforderungen in der Materialaufgabe beim 150 mm Schütthöhenversuch. 1) Insbesondere Folien-lastiges Material türmte sich vor dem Abstreifer, 2) Versuche, das Material am laufenden Band aufzulockern, blieben erfolglos und 3) Der Abstreifer wurde abmontiert und die Folienfraktion als 150 mm hohes Schütthbett auf dem stehenden Band verteilt, wofür aufgrund der geringen Materialdichte mehrere Bandlängen notwendig waren. ....	61

- Abbildung 31 – Materialaufgabe beim 300 mm Schütthöhenversuch. Beispielfotos für die Fraktionen: 1) *Reste*, 2) *PPK*, 3) *PE*, 4) *PP*, 5) *NE*, 6) *MG Grob*, 7) *MG Fein* und 8) *Folien*. .....63
- Abbildung 32 - Materialaufgabe beim 550 mm Schütthöhenversuch, unterhalb der NIR-Sensor-Lampen ist das Malerband als Orientierungshilfe und Höhenkontrolle zu sehen. Zusätzlich wurde das Erreichen von 550 mm Schütthöhe mit einem Meterstab kontrolliert. Beispielfotos für die Fraktionen 1) *Folien*, 2) *PET-Flaschen*, 3) *PP*, 4) *GVK*, 5) *Reste*, 6) *NE*, 7) *MG Fein* und 8) *MG Grob*. .....66
- Abbildung 33 – Materialaufgabe von GVK als 1) *Monoschicht*, 2) *200%-Bandbelegung* (zwei Einzelobjekte GVK liegen übereinander) und 3) *400%-Bandbelegung* (vier Einzelobjekte GVK liegen übereinander) bei den Bandbelegungsversuchen.....68
- Abbildung 34 - Materialaufgabe durch zweimaliges Kippen der Mulde und seitlichem Räumen der GVKs zwischen die beiden Haufen zur Untersuchung es Lichteinflusses. 70
- Abbildung 35 – Fotos vom Lichteinfluss-Versuch: 1) Wanne bekannten Volumens bis zum Rand mit PET-Flaschen gefüllt und 2) Materialaufgabe als Monoschicht. ....71
- Abbildung 36 – Fotos von Wasserversuchen: 1) Wanne voll trockener PET-Flaschen, 2) Trockene Probe als Materialhaufen am stehenden Band, 3) Materialaufgabe trockene Probe, 4) Wanne voll PET-Flaschen mit wenig Flüssigkeit gefüllt und 5) Materialaufgabe feuchte PET-Flaschen.....73
- Abbildung 37 – Zur Validierung der Messwerte erfolgt ein Abgleich der Zeitstempel der Sensorsysteme mit vor und nach den Versuchen notierten Start- und Endzeiten. Die rot umrandeten Peaks zeigen Materialströme an, dazwischen läuft das Band leer. Oberhalb der roten Markierungen sind die fortlaufenden Versuchsnummern angeführt. ....74
- Abbildung 38 - (1) Skizze der Mulde: jene Stellen, an denen Abmaße a – d zur Berechnung des fraktionsspezifischen *Wahren Volumens* genommen wurden sind rot gefärbt markiert und (2) Skizze der KS-Wanne inklusive Abmaße zur Berechnung des *Wahren Wannenvolumens*.....76
- Abbildung 39 - Aufbau eines Box-Whiskers: innerhalb der Box liegen 50 % aller Werte, der Median wird durch einen Querbalken dargestellt; von der Box aus nach oben und unten gehen zwei Antennen, welche mit dem Maximal- bzw. dem Minimalwert abschließen. .79
- Abbildung 40 - Verteilung des detektierten Volumens und prozentuelle Abweichung vom mittleren *Sensorvolumen* zum *Wahren Volumen* für Fraktion Flakes, je Sensor-Modell. ....84
- Abbildung 41 - Ergebnisse der 150 mm Schütthöhenversuche. Die *Sensorvolumina* werden als Box-Whiskers dargestellt. Farbige Querbalken zeigen das *Wahre Volumen*. .....85
- Abbildung 42 - Ergebnisse der 300 mm Schütthöhenversuche: Verteilung der *Sensorvolumina* als Box-Whiskers, das *Wahre Volumen* als farbiger Querbalken.....86

Abbildung 43 - Ergebnisse der 550 mm Schütthöhenversuche. Die <i>Sensorvolumina</i> werden als Box-Whiskers dargestellt. Farbige Querbalken zeigen das <i>Wahre Volumen</i> für jede Fraktion. ....	87
Abbildung 44 - Darstellung der Verteilung normierter <i>Sensorvolumina</i> als Box-Whiskers und der prozentuellen Abweichung vom mittleren <i>Sensorvolumen</i> zum Normvolumen als gefärbte quadratische Markierung. ....	88
Abbildung 45 - Darstellung der Verteilung normierter <i>Sensorvolumina</i> als Box-Whiskers und der prozentuellen Abweichung vom mittleren <i>Sensorvolumen</i> zum Normvolumen als gefärbte quadratische Markierung. ....	89
Abbildung 46 - Darstellung der Verteilung normierter <i>Sensorvolumina</i> als Box-Whiskers und der prozentuellen Abweichung vom mittleren <i>Sensorvolumen</i> zum Normvolumen als gefärbte quadratische Markierung. ....	90
Abbildung 47 - Gegenüberstellung der Volumenverteilung aller Schütthöhenversuche als Box-Whiskers, normiert auf 1 m <sup>3</sup> . ....	94
Abbildung 48 - Muster bzw. Trends bei der Volumenerkennung in Abhängigkeit von Sensor, Schütthöhe und Fraktion. ....	96
Abbildung 49 - Ergebnisse der Versuchsreihen 100%-, 200%- und 400%-Bandbelegung mit den Sensor-Modellen HDDM, HDDM+ und SAMSoric und GVK-Probenmaterial. ....	98
Abbildung 50 - Ergebnisse zur Untersuchung des Lichteinflusses auf das <i>Sensorvolumen</i> und prozentuelle Abweichung des mittleren <i>Sensorvolumens</i> vom <i>Wahren Volumen</i> . Vertikale Balken zeigen das <i>Sensorvolumen</i> , der grau gefärbte Querbalken das <i>Wahre Volumen</i> und farbige Quadrate die Abweichung vom mittleren <i>Sensorvolumen</i> zum <i>Wahren Volumen</i> . ....	99
Abbildung 51 - Ergebnisse zur Untersuchung des Lichteinflusses auf das <i>Sensorvolumen</i> . Balken stellen die <i>Sensorvolumina</i> dar und unterscheiden sich je nach eingesetztem Sensor-Modell farblich voneinander. ....	100
Abbildung 52 - Verteilung der <i>Sensorvolumina</i> als Box-Whiskers, mittlere Abweichung der <i>Sensorvolumina</i> vom <i>Wahren Volumen</i> als farbige Quadrate, farbige Umrandung grenzt Sensor-Modelle voneinander ab. ....	101
Abbildung 53 – Teil 1 des Versuchsplanes mit Angabe von Materialart des Probengutes, Versuchsbezeichnung, verwendeten Sensoren, Versuchstag und fortlaufender Versuchsnummer. ....	I
Abbildung 54 - Teil 2 des Versuchsplanes mit Angabe von Materialart des Probengutes, Versuchsbezeichnung, verwendeten Sensoren, Versuchstag und fortlaufender Versuchsnummer. ....	II

# Anhang

MATERIAL	VERSUCH	SENSOR	TAG	VERSUCHSNUMMER		
GVK	Vorversuch	HDDM	05.08.2021	1	2	3
		HDDM+		1	2	3
	Vorversuch	HDDM	05.08.2021	4	5	6
		HDDM+		5	6	6
	Vorversuch	HDDM	06.08.2021	7	8	9
		HDDM+		10	11	12
		Samsoric		8	9	10
	Vorversuch	NIR	06.08.2021	7	8	9
		HDDM		10	11	12
	Vorversuch	HDDM	06.08.2021	13	14	14
HDDM+		13		14	14	
Samsoric		13		14	14	
Bandbelegung 100%	HDDM	09.08.2021	15	16	17	
	Samsoric		18	19	20	
	NIR		21	22	23	
Monoschicht	HDDM	09.08.2021	15	16	17	
	NIR		18	19	20	
Bandbelegung 200%	HDDM	09.08.2021	24	25	26	
	HDDM+		27	28	29	
	Samsoric		30	30	30	
Bandbelegung 400%	HDDM	10.08.2021	24	25	26	
	HDDM+		27	28	29	
	Samsoric		30	30	30	
Haufen	HDDM	10.08.2021	31	32	33	
	HDDM+		34	35	36	
	Samsoric		37	37	37	
150 mm Schütthöhe	HDDM	10.08.2021	31	32	33	
	HDDM+		34	35	36	
	Samsoric		37	37	37	
300 mm Schütthöhe	HDDM	10.08.2021	38	39	40	
	HDDM+		41	42	42	
	Samsoric		43	44	44	
150 mm Schütthöhe	HDDM	16.08.2021	100	101	103	
	HDDM+		104	105	105	
	Samsoric		106	106	106	
300 mm Schütthöhe	HDDM	10.08.2021	41	42	42	
	HDDM+		43	44	44	
	Samsoric		45	46	46	
300 mm Schütthöhe	HDDM	12.08.2021	83	84	85	
	HDDM+		86	87	87	
	Samsoric		88	89	89	

MATERIAL	VERSUCH	SENSOR	TAG	VERSUCHSNUMMER		
GVK	550 mm Schütthöhe	HDDM	17.08.2021	137	138	139
		HDDM+		140	141	141
	RESTE	Samsoric	24.08.2021	137	138	139
		HDDM		222	223	224
	RESTE	HDDM	24.08.2021	222	223	224
		HDDM+		225	225	226
		Samsoric		226	226	226
	300 mm Schütthöhe	HDDM	24.08.2021	217	218	219
		HDDM+		220	221	221
	550 mm Schütthöhe	HDDM	24.08.2021	217	218	219
HDDM+		220		221	221	
550 mm Schütthöhe	Samsoric	24.08.2021	217	218	219	
	HDDM		212	213	214	
	HDDM+		215	215	216	
150 mm Schütthöhe	HDDM	24.08.2021	197	198	199	
	HDDM+		200	201	201	
	Samsoric		202	203	204	
300 mm Schütthöhe	HDDM	24.08.2021	202	203	204	
	HDDM+		205	205	206	
	Samsoric		206	206	206	
550 mm Schütthöhe	HDDM	24.08.2021	202	203	204	
	HDDM+		205	205	206	
	Samsoric		206	206	206	
150 mm Schütthöhe	HDDM	16.08.2021	110	111	112	
	HDDM+		113	113	114	
	Samsoric		114	114	114	
300 mm Schütthöhe	HDDM	11.08.2021	73	74	75	
	HDDM+		76	76	77	
	Samsoric		77	77	77	
550 mm Schütthöhe	HDDM	17.08.2021	142	143	144	
	HDDM+		145	145	146	
	Samsoric		146	146	146	
150 mm Schütthöhe	HDDM	16.08.2021	116	117	118	
	HDDM+		119	120	120	
	Samsoric		121	121	121	
300 mm Schütthöhe	HDDM	11.08.2021	63	64	65	
	HDDM+		66	66	67	
	Samsoric		67	67	67	

Abbildung 53 – Teil 1 des Versuchsplanes mit Angabe von Materialart des Probengutes, Versuchsbezeichnung, verwendeten Sensoren, Versuchstag und fortlaufender Versuchsnummer.

MATERIAL	VERSUCH	SENSOR	TAG	VERSUCHSNUMMER			MATERIAL	VERSUCH	SENSOR	TAG	VERSUCHSNUMMER				
PET Tray	550 mm Schütthöhe	HDDM	17.08.2021	147	148	149	NE	550 mm Schütthöhe	HDDM	23.08.2021	182	183	184		
		HDDM+		147	148	149			150	151	HDDM+		182	183	184
	Wannen	Samsoric		147	148	149		MG Grob	150 mm Schütthöhe	Samsoric		20.08.2021	182	183	184
		HDDM+		227						HDDM+		20.08.2021	162	163	164
150 mm Schütthöhe	HDDM+					MG Fein	300 mm Schütthöhe		Samsoric			162	163	164	
	Samsoric								HDDM	20.08.2021	157	158	159		
150 mm Schütthöhe	HDDM	13.08.2021	88	89	90		Folienmischung	550 mm Schütthöhe	HDDM+			157	158	159	
	HDDM+		88	89	90				Samsoric			157	158	159	
300 mm Schütthöhe	Samsoric		88	89	90	LDPE		150 mm Schütthöhe	HDDM	20.08.2021		233	234	235	
	HDDM	16.08.2021	91	92					HDDM+		233	234	235		
300 mm Schütthöhe	HDDM+		91	92			Vorversuch	300 mm Schütthöhe	Samsoric		26.08.2021	240	241		
	Samsoric		91	92					HDDM		240	241			
550 mm Schütthöhe	HDDM	10.08.2021	43	44	45	Vorversuch		300 mm Schütthöhe	HDDM+			240	241		
	HDDM+		43	44	45				Samsoric			240	241		
550 mm Schütthöhe	Samsoric		43	44	45		Vorversuch	550 mm Schütthöhe	HDDM	20.08.2021		167	168	169	
	HDDM	17.08.2021	127	128	129				HDDM+		167	168	169		
Wannen/ Bandbelegung	HDDM+		127	128	129	Vorversuch		300 mm Schütthöhe	Samsoric		23.08.2021	172	173	174	
	Samsoric		127	128	129				HDDM+		23.08.2021	172	173	174	
Wannen/Schütthöhe	HDDM	10.08.2021	53	54	55		Vorversuch	550 mm Schütthöhe	Samsoric			177	178	179	
	HDDM+		53	54	55				HDDM	23.08.2021	177	178	179		
Wannen/Schütthöhe	Samsoric		53	54	55	Vorversuch		150 mm Schütthöhe	Samsoric			177	178	179	
	HDDM	13.08.2021	86	87					HDDM+		177	178	179		
Wasser Versuch	HDDM+		86	87			Vorversuch	300 mm Schütthöhe	HDDM	16.08.2021		121	122	123	
	Samsoric		86	87					HDDM+		121	122	123		
300 mm Schütthöhe	HDDM	26.08.2021	238	239		Vorversuch		550 mm Schütthöhe	Samsoric			121	122	123	
	HDDM+		238	239					HDDM	12.08.2021	78	79	80		
300 mm Schütthöhe	Samsoric		238	239			Vorversuch	150 mm Schütthöhe	HDDM+			78	79	80	
	HDDM	11.08.2021	68	69	70				Samsoric		78	79	80		
150 mm Schütthöhe	HDDM+		68	69	70	Vorversuch		300 mm Schütthöhe	HDDM	17.08.2021		132	133	134	
	Samsoric		68	69	70				HDDM+		132	133	134		
150 mm Schütthöhe	HDDM	23.08.2021	192	193	194		Vorversuch	Flakes-Referenzversuch Schütthöhenversuch	Samsoric			132	133	134	
	HDDM+		192	193	194				HDDM	25.08.2021	228	229	230		
300 mm Schütthöhe	Samsoric		192	193	194	Vorversuch		Flakes-Referenzversuch Haufenversuch	HDDM+			228	229	230	
	HDDM	23.08.2021	187	188	189				Samsoric		228	229	230		
300 mm Schütthöhe	HDDM+		187	188	189		Vorversuch	Vorversuch	HDDM	25.08.2021		233	234	235	
	Samsoric		187	188	189				HDDM+		233	234	235		
300 mm Schütthöhe	HDDM	23.08.2021	187	188	189	Vorversuch		Vorversuch	Samsoric			233	234	235	
	HDDM+		187	188	189				HDDM	26.08.2021	240	241			
300 mm Schütthöhe	Samsoric		187	188	189		Vorversuch	Vorversuch	HDDM+			240	241		
	HDDM	23.08.2021	187	188	189				Samsoric		240	241			

Abbildung 54 - Teil 2 des Versuchsplanes mit Angabe von Materialart des Probengutes, Versuchsbezeichnung, verwendeten Sensoren, Versuchstag und fortlaufender Versuchsnummer.