

Schlussbericht vom 30.06.2024

zu IGF-Vorhaben Nr. 21332N

Thema

Untersuchung der Zerkleinerungswirkung unterschiedlicher Fahrzeugtypen für die pneumatische Auslieferung von Holzpellets

Berichtszeitraum

01.11.2020 - 31.10.2023

Forschungsvereinigung

Deutsche Vereinigung für Verbrennungsforschung e.V. (DVV)

Forschungseinrichtung(en)

Lehrstuhl für Energieanlagen und Energieprozesstechnik (LEAT)

Ruhr-Universität Bochum



Gefördert durch:



Bundesministerium
für Wirtschaft
und Klimaschutz

aufgrund eines Beschlusses
des Deutschen Bundestages

Inhaltsverzeichnis

Thema	1
Berichtszeitraum.....	1
Forschungsvereinigung	1
Forschungseinrichtung(en).....	1
1. Forschungsthema	3
2. Forschungsziel	4
3. Zielerreichung und wesentliche Ergebnisse	4
4. Wissenschaftlich-technische und wirtschaftliche Problemstellung	9
5. Lösungsweg und Ergebnisse	10
Arbeitspaket 1: Entwicklung und Erprobung einer materialschonenden Auffangeinrichtung.....	10
Arbeitspaket 2: Charakterisierung der Lieferfahrzeuge und Festlegung der Prozessparameter.....	12
Arbeitspaket 3: Ausrüstung der Fahrzeuge mit der jeweils erforderlichen Messtechnik	13
Arbeitspaket 4: Erprobung der Messtechnik und initiale Charakterisierung der Zerkleinerungswirkung der unterschiedlichen Fahrzeugtypen	17
Untersuchte Holzpellet-Typen	19
Arbeitspaket 5: Analyse der Zerkleinerungswirkung der einzelnen Komponenten der unterschiedlichen Lieferfahrzeuge	20
Arbeitspaket 6: Messung der Zerkleinerungswirkung bei Parametervariation.....	30
Arbeitspaket 7: Durchführung von Feldversuchen	52
Arbeitspaket 8: Maßnahmenkatalog zur Reduzierung der Pelletzerkleinerung innerhalb der Lieferfahrzeuge und Abschlussbericht	53
6. Verwendung der Zuwendung	54
7. Notwendigkeit und Angemessenheit der geleisteten Arbeit	57
8. Wissenschaftlich-technischer und wirtschaftlicher Nutzen der erzielten Ergebnisse für KMU	57
9. Plan zum Ergebnistransfer in die Wirtschaft	58
10. Umsetzung des Transferkonzeptes.....	59
11. Gewerbliche Schutzrechte	60
12. Förderhinweis.....	60
13. Literatur.....	61
Verwendete Publikationen	61

1. Forschungsthema

Untersuchung der Zerkleinerungswirkung unterschiedlicher Fahrzeugtypen für die pneumatische Auslieferung von Holzpellets

Das IGF-Vorhaben 21332 N der Forschungsvereinigung DVV wurde über die AiF im Rahmen des Programms zur Förderung der Industriellen Gemeinschaftsforschung (IGF) vom Bundesministerium für Wirtschaft und Klimaschutz aufgrund eines Beschlusses des Deutschen Bundestages gefördert.

2. Forschungsziel

Entlang der Lieferkette von Produktion bis zur Beschickung in den Brennraum wirken mechanische Belastungen auf die Holzpelletschüttung ein. Hierbei kommt es zu Pelletbruch sowie der Bildung von Feinanteil. Als Folge kommt es zu der Bildung von Staubnestern in Pelletlagern, die eine Entnahme von Pellets über die installierten Beschickungssysteme zum Brennraum verhindern. Zudem sammeln sich kleinere Bruchstücke von Pellets in manchen Szenarien sogenannten Totzonen bei Transportschnecken an, wodurch es zu einer Blockade der Förderschnecke kommen kann.

Ein hierbei relevanter und bisher hinsichtlich seines Aufmaßes unbekannter Abschnitt der Zerkleinerungskette sind die pneumatisch fördernden Lieferfahrzeuge. Ziel des Vorhabens war es deshalb, die Zerkleinerungswirkung der Lieferfahrzeuge für Holzpellets zu bewerten. Hier gibt es verschiedene Transportsysteme, die im Einsatz sind. Diese Systeme sollten untersucht werden, indem zum einen mehrere am Projekt teilnehmende Fahrzeuge mit Messtechnik ausgerüstet werden mussten, damit die Erfassung von Messdaten während der im Antrag vorgesehenen Fahrzeugversuche unter Parametervariationen möglich waren. Zum andern sollten die wichtigsten Komponenten, die sogenannten Austragssysteme, in Versuchsständen abgebildet werden, sodass eine detaillierte Betrachtung der Einzelkomponenten möglich war. Aus den gewonnenen Erkenntnissen sollten Aussagen auf die Unterschiede bei der Betriebsweise der verschiedenen untersuchten Fahrzeugsysteme hinsichtlich der Zerkleinerung getroffen werden. Diese Informationen sind hilfreich für die meist mittelständischen Unternehmen, die die Lieferfahrzeuge produzieren, sowie die Pelletlieferanten. Zudem sollten innerhalb der Fahrzeugtypen Parametervariationen durchgeführt werden, um den Einfluss der verschiedenen Parameter, die während der Auslieferung am Fahrzeug eingestellt werden können, auf die Zerkleinerung zu bewerten. Diese Informationen sind für Fahrerschulungen relevant, um in der Praxis eine gute Qualität bei der Auslieferung zu erzielen. Die Ergebnisse werden ebenfalls an den Deutschen Energieholz- und Pellet-Verband (DEPV) herausgegeben.

3. Zielerreichung und wesentliche Ergebnisse

In Summe wurden die Projektziele erreicht. Die Ausrüstung der Lieferfahrzeuge mit Messtechnik sowie die Entwicklung eines Messwerterfassungssystems wurde erfolgreich durchgeführt. In den Modellstandsversuchen und in den Fahrzeugversuchen konnten die Effekte der Zerkleinerung quantitativ und qualitativ bestimmt und beurteilt werden. In den Modellstandsversuchen, in denen sowohl eine Längenmessung als auch eine Feinanteilbestimmung als Kriterium für die Zerkleinerung durchgeführt wurden, konnte mit beiden Kriterien eine höhere Zerkleinerungswirkung beim nachgewiesen werden. In den Fahrzeugversuchen wurde primär das Kriterium Feinanteil untersucht, da mit diesem Kriterium eine Untersuchung der Zerkleinerung in vereinbar Zeit möglich war. Hier kam es in den Ergebnissen zu der zunächst überraschenden Erkenntnis, dass das Zellradsystem in manchen Parametereinstellungen besser als das Silofahrzeugsystem abschneidet. Eine weitere Auswertung der Messdaten zeigte, dass der Einfluss des Verhältnisses von Kompressor-Luftstrom zu Pelletmassenstrom eine große Rolle spielt. Höhere Partikelgeschwindigkeiten führen bei Umlenkung und Aufprall zu einer stärkeren Feinanteildung durch Abrieb und Bruch. Generell ließ sich in den Versuchen zeigen,

dass eine hohe Beladung in der pneumatischen Förderleitung, also eine größerer Pelletmassenstrom bei gleicher Kompressorleistung eine schonendere Auslieferung also geringere Feinanteilbildung ermöglicht. Bei den Silofahrzeugen kann dies über einen größeren Öffnungswinkel der Materialklappe bei mittlerer Kompressorleistung (700 m³/h Kompressorluft) erzielt werden. Bei den Zellradschleusen gibt es mehrere Aspekte die beachtet werden müssen. Hier müssen die Drehzahl der Schleuse sowie die Sperrschieberöffnung oberhalb der Schleuse abgestimmt werden, um eine schonende Auslieferung zu ermöglichen. Eine Drehzahl von 50 U/min bei halb geöffneten Sperrschieber hat hier einen großen Pelletmassenstrom bei geringer Zerkleinerung erzielen können. Die Querförderschnecke, die in Fahrzeugen mit Zellradschleuse verbaut wird, verursacht eine starke Zerkleinerung und sollte lediglich zur Restentleerung eingesetzt werden. Auf Basis dieser Erkenntnisse konnten Vorschläge für Anpassungen bei der Auslegung sowie Bedienung der Fahrzeuge formuliert werden.

Im Folgende sind die wesentlichen Ergebnisse der Arbeitspakete zusammengefasst. Abbildung 1 zeigt nochmals die Struktur der Arbeitspakete und deren Verknüpfung.

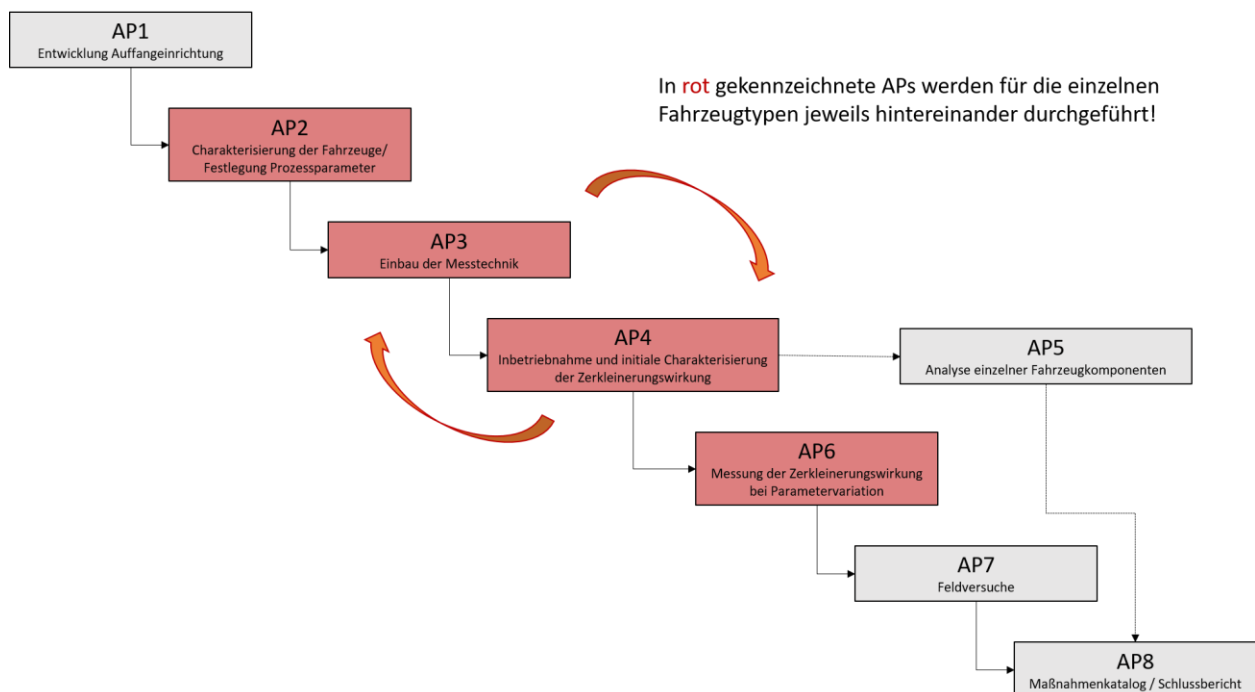


Abbildung 1: Schematische Verknüpfung der Arbeitspakete

AP1 Entwicklung und Erprobung einer materialschonenden Auffangeinrichtung

Ziel des Forschungsprojekts war es, die Zerkleinerung innerhalb der pneumatisch fördernden Lieferfahrzeuge zu ermitteln. Hierzu zählen die Abschnitte der Materialzugabe innerhalb der Fahrzeuge auf die Förderleitung (Austragskomponenten), die internen Leitungen sowie die Förderleitung außerhalb der Fahrzeuge. Für einen Vergleich der verschiedenen Systeme unter diversen Betriebsparametern war es daher erforderlich, eine Auffangeinrichtung zu entwickeln, die eine möglichst materialschonende Einsammlung der Proben ermöglicht. In Anbetracht des umgesetzten Probenumfangs von je 250 kg Holzpellets musste die Auffangeinrichtung belastbar und gut zu entleeren sein.

In Zusammenarbeit mit der Firma Silotec GmbH, die Teilnehmer im projektbegleitenden Ausschuss ist, konnte ein Fangsack entwickelt werden, der die Anforderung an Tragfähigkeit, Druckbeständigkeit und Bedienbarkeit erfüllt. Bei dem verwendeten Material handelt es sich um ein robustes und UV-geschütztes Gewebe, das in sogenannten Sacksilos für Holzpellets eingesetzt wird. Der über 4 m lange Fangsack ist in Abbildung 2 zu sehen. Das Konzept zeigte sich als sehr gut geeignet für das Einfangen der Proben, je nach Förderluftleistung konnte ein „sanftes“ Einfangen der Proben ohne Pelletbruch ermöglicht werden.



Abbildung 2: Auffangeinrichtung für materialschonendes Einsammeln der Proben

AP2: Charakterisierung der Lieferfahrzeuge und Festlegung der Prozessparameter

In Summe wurden im Rahmen des Projekts vier Lieferfahrzeuge (3 Silofahrzeuge, 1 Kombikipper) unterschiedlicher Hersteller ausgerüstet. Im Wesentlichen lassen sich zwei Bauweisen unterscheiden: die sogenannten Silofahrzeuge, die über drei bis vier Druckbehälter verfügen, die jeweils bis zu fünf Tonnen Pellets enthalten können. Es ist eine Druckbeaufschlagung von bis zu 0,7 bzw. 1 bar je nach Fahrzeugtyp möglich. Am konisch zulaufenden Boden jeder zylindrischen Silokammer befindet sich eine runde Materialklappe mit einem Durchmesser von 125 bzw. 200 mm. Unterhalb der Materialklappe befindet sich die pneumatische Förderleitung, die Richtung Fahrzeugende verlegt ist. In den Silofahrzeugen liefert ein Kompressor die nötige Silozuluft sowie die Treibluft in der Förderleitung. An welchen Stellen nach dem Kompressor eine Aufteilung der Luftmenge in Silo- und Treibluft stattfindet variiert von Hersteller zu Hersteller. Für eine Ermittlung der Volumenströme ist es hier entscheidend die optimale Einbauposition für die Messeinrichtungen zu wählen. Alle drei teilnehmenden Silofahrzeuge konnten erfolgreich für die Ausrüstung mit Messtechnik analysiert werden. Beim zweiten Fahrzeugtyp handelt es sich um sogenannte Kombikipper. Am Ende der Kippladefläche befindet sich eine Querförderschnecke entlang der gesamten Fahrzeugbreite. Diese kann Material bis zur Fahrzeugmitte befördern, dort befindet sich ein Schacht, durch den das Material in eine Zellradschleuse gelangt. Diese dosiert die Pellets durch Rotation auf eine pneumatische Förderleitung. Das teilnehmende Fahrzeug dieses Bautyps konnte ebenfalls erfolgreich für die Verwendung von Messtechnik vorbereitet werden.

AP3: Ausrüstung der Fahrzeuge mit der jeweils erforderlichen Messtechnik

Aufgrund der großen Unterschiede der Leitungskonzepte und Ventilpositionen innerhalb der Fahrzeuge war es erforderlich, für jede Umrüstung die Einbaupositionen der Messtechnik schon vor der Montage der Silofahrzeuge an die Fahrzeughersteller zu kommunizieren. Die Umrüstung für zwei der Silofahrzeuge erfolgte direkt in den Montagehallen der Hersteller. Eines der Silofahrzeuge war in Teilen bereits ausgerüstet, der Kombikipper mit Zellradschleuse wurde vor Ort beim Inhaber und Pelletlieferanten mit Messtechnik ausgestattet. Die Erfassung der Messwerte sowie die Weiterverarbeitung der Daten erforderte die Neuentwicklung eines Messwerterfassungssystems. Für die Umrüstungstermine wurde im Vorfeld eine Koordination mit den Inhabern der Fahrzeuge sowie den Herstellern durchgeführt. Insbesondere für die Verlegung von Datenleitungen und Spannungsversorgung musste zudem auch mit dem Werkstattpersonal der LKW Rücksprache gehalten werden. Vor den Umrüstungsterminen wurden Schaltpläne, Einbauhinweise und Bauteile vorbereitet und den Werkstätten zur Verfügung gestellt. Vor Ort wurde dann in Zusammenarbeit mit dem jeweiligen Werkstatt-Team die Verkabelung der Leitungen und der Einbau der Messtechnik durchgeführt.

AP4: Erprobung der Messtechnik und initiale Charakterisierung der Zerkleinerungswirkung der unterschiedlichen Fahrzeugtypen

Die in den Fahrzeugen verbaute Messtechnik wird über das Bordsystem der LKWs mit Spannung versorgt. Zudem verfügt das in AP3 entwickelte Messwerterfassungssystem über ein Energiemanagementsystem, damit eine Entladung der Bordbatterie bei längeren Standzeiten ausgeschlossen werden kann. Messungen findet ausschließlich während einer Auslieferung statt, dieser Zustand kann über das Vorhandensein eines Steuersignals, das an den Zustand des Kompressors im Fahrzeug gekoppelt ist, identifiziert werden. Es wurden sogenannte Hitzedrahtanemometer zur Durchflussmessung des Luftvolumenstromes verbaut, diese müssen nach der Installation in der Leitung kalibriert werden. Auf den drei Silofahrzeugen ist eine Waage verbaut, die in 20 kg Schritten auflöst. Die seriellen Ausgangssignale der Waagen werden von dem Messsystem verarbeitet, für eine zuverlässige Erfassung mussten jedoch während der Inbetriebnahme noch Anpassungen erfolgen.

AP5: Analyse der Zerkleinerungswirkung der einzelnen Komponenten der unterschiedlichen Lieferfahrzeuge

Für eine Untersuchung der beiden Austragssysteme Materialklappe (Silofahrzeuge) und Zellradschleuse (Kombikipper) wurden Versuchsstände errichtet, um diese Komponenten im Detail zu untersuchen. Hierfür wurden durch die am Projekt teilnehmenden Hersteller (Mitglieder des projektbegleitenden Ausschusses) Originalbauteile zur Verfügung gestellt. Mit den Komponenten wurden dann Versuchsstände konstruiert, die mit Behältern angelehnt an die korrespondierenden Bauweisen unter Einsatz von transparentem Acrylglas ausgestattet sind. In der Versuchshalle wurde dann eine pneumatische Förderstrecke errichtet, um Förderversuche durchführen zu können. Die Versuchsstände verfügen über eine Kapazität von 200-250 kg, womit auch Pelletchargen in derselben Größenordnung der in AP6 durchgeführten Fahrzeugversuche untersucht werden können. In den Modellstandsversuchen konnte eine erhöhte Zunahme von Feinanteil und Pelletbruch für das Zellradssystem nachgewiesen werden. Der Chargenumfang betrug hier 90 kg pro Versuch.

Insgesamt wurden an den Versuchsständen ca. 15 Versuche durchgeführt, die Proben wurden mit einer optischen Messanlage zur Bestimmung der Partikelgrößenverteilung vermessen.

AP6: Messung der Zerkleinerungswirkung bei Parametervariation

Während die in AP5 durchgeführten Experimente ein Hauptaugenmerk auf die Einzelkomponenten legen, sind in AP6 die Erkenntnisse bezüglich der Zerkleinerung in den Gesamtsystemen von Interesse. Als zusätzliche Einflussgrößen kommen hier der Silodruck in Fahrzeugen mit Druckbehälter, ggf. interne Leitungswege, sowie die in den Fahrzeugen tatsächlich eingesetzte Förderluftmenge hinzu. Über eine Vielzahl von unterschiedlichen Klappenstellungen und Zellraddrehzahlen wurde zudem auch der Pelletmassenstrom variiert. Eine wesentliche Erkenntnis in diesen Versuchen war, dass der Förderluftvolumenstrom bei den Silofahrzeugen aufgrund des leistungsfähigeren Kompressors im Vergleich zum Überdruckgebläse auf dem Kombikipper (Zellrad) meistens höher war. Höhere Partikelgeschwindigkeiten verursachen bei Umlenkung und Aufprall mehr Zerkleinerung. Eine zielgerichtete und präzise Einstellung des Massenstromes war bei den Silofahrzeugen über das System Materialklappe einfacher und intuitiver. Das Zellradschleusensystem lieferte im Trend höhere Pelletmassenströme, die Variation des Massenstromes ist jedoch von mehreren Stellgrößen im System abhängig, wodurch eine zielgenaue Materialabgabe schwer möglich ist. Falls bei Kombikippern eine Waage verbaut ist kann die im gekippten Zustand nicht ausgelesen werden. Im Falle einer Auslieferung an einen Privatkunden mit kleinem Silo kann dies ein Nachteil sein.

AP7: Durchführung von Feldversuchen

Auslieferungsversuche in Kundenlagern, wie im Antrag zunächst vorgesehen, wurde in Rücksprache mit den Teilnehmern des PA verworfen, da die Zugänglichkeit zu den Kundensilos nur eingeschränkt möglich und eine repräsentative Probennahme ebenfalls nicht umsetzbar wäre. Als Ersatzmaßnahme wurde eine grafische Oberfläche für die Auswertung von Auslieferungsversuchen entwickelt: Damit ist sichergestellt, dass Auslieferungsversuche nach Projektende durch die Fahrzeugeigentümer durchgeführt und Messungen ausgewertet werden können.

AP8: Maßnahmenkatalog zur Reduzierung der Pelletzerkleinerung innerhalb der Lieferfahrzeuge und Abschlussbericht

Es werden konkrete Handlungsempfehlungen für die beiden Fahrzeugtypen Silofahrzeug und Fahrzeug mit Zellradschleuse ausgesprochen, wie durch die geeignete Wahl von Betriebsparametern und Schlauchverlegung eine Auslieferung mit geringerer Pelletzerkleinerung gewährleistet werden kann. Die Empfehlungen werden dem DEPV in Form von Schulungsunterlagen für Fahrern von Lieferfahrzeugen bereitgestellt.

4. Wissenschaftlich-technische und wirtschaftliche Problemstellung

Es ist bekannt, dass pneumatische und mechanische Fördersysteme zu einer ungewollten, letztlich nicht vollständig vermeidbaren Materialzerkleinerung führen [1, 2]. Dies wurde bisher vor allem für Rundholz sowie für Holzhackschnitzel in Studien untersucht [3–5]. Erhöhter Feinanteil wirkt sich negativ auf die Betriebssicherheit und Zuverlässigkeit automatisierter Systeme im privaten Heizungssektor aus [6, 7].

Da die pneumatische Förderung zu den etablierten Transportverfahren gehört (sowohl im industriellen als auch privaten Sektor), war die Untersuchung des mechanischen Einflusses und damit der Zerkleinerungswirkung dieses Transportschrittes auf Holzpellets Ziel einiger Arbeiten. So wurden pneumatische Förderversuche mit Holzpellets von Abdulmumini et al. durchgeführt [8]. Der Fokus ihrer Arbeit lag auf dem Vergleich verschiedener Typen von Festigkeitsprüfgeräten und der Analyse, ob diese Geräte die Entstehung von Feinanteil während realer pneumatischer Förderprozesse hinreichend genau beschreiben. Bei diesen Versuchen wurde jedoch deutlich, dass der Typ des eingesetzten Lieferfahrzeugs bzw. der untersuchte Förderprozess einen erheblichen Anstieg des Feinanteils zur Folge haben. Kotzur et al. [9] stellten eine verstärkte Partikelzerkleinerung mit zunehmender Pelletlänge und Aufprallgeschwindigkeit bei der pneumatischen Förderung fest. Dies erfolgte jedoch im Labormaßstab mit sehr geringen Probengrößen von lediglich 100 Partikeln. Auch wurden an dieser Stelle keine Rohrkomponenten variiert. Dass, je nach Art und Ausführung der Leitungskomponenten, deren Zerkleinerungswirkung auf pneumatisch geförderte Partikel variiert, haben Aarseth et al. untersucht [10]. Sie analysierten dies bei pneumatisch geförderten Futtermittelpellets in Abhängigkeit der Partikelgeschwindigkeit und der Bogenradien.

Vor allem die im Fahrzeug verbauten Austragssysteme (z.B. Zellradschleuse, Förderschnecke oder pneumatische Ventile) verstärken die Entstehung von Feinanteil durch die mechanische Belastung der Pellets. Diesen Schluss lassen Untersuchungen zur Zerkleinerungswirkung solcher Austragssysteme auf die geförderten Partikel zu. So haben beispielsweise Yao et al. [11] und Zhang et al. [12] den mechanischen Einfluss von Zellradschleusen auf die geförderten granularen Medien experimentell analysiert und eine erhebliche Zerkleinerungswirkung schon bei lediglich einer Drehung der Schleuse aufgezeigt. Cleary [13] analysierte das Bewegungsverhalten von Partikeln in Förderschnecken anhand von DEM-Simulationen und konnte auf diese Weise detaillierten Einblick in die mechanischen Belastungen der geförderten Partikel gewinnen.

Bisher sind jedoch keinerlei Studien bekannt, die sich mit der fahrzeuginternen Zerkleinerung der Holzpellets und der damit einhergehenden Erhöhung des Feinanteils befassen; genau dieses ist Inhalt des vorliegenden Projektberichtes.

5. Lösungsweg und Ergebnisse

Arbeitspaket 1: Entwicklung und Erprobung einer materialschonenden Auffangeinrichtung

Vor der Entwicklung des Prototyps für die Auffangeinrichtung wurden die wichtigsten Eigenschaften und Anforderungen definiert.

Funktionalität: Materialschonendes Einfangen der Probe

Die Hauptanforderung war die Eigenschaft eines möglichst materialschonenden Auffangens der Proben. Die Partikelgeschwindigkeit der Pellets erreicht im Zustand der pneumatischen Flugförderung ca. 20 m/s (72 km/h). Ein Aufprall der Pellets auf festes Material wie Stahl oder Acrylglas führt insbesondere bei Pellets oberhalb einer Länge von 15 mm zu Pelletbruch und der Bildung von Feinanteil. (Paper Prallversuche) Aus diesem Grunde ist ein Abbremsen der Partikel erforderlich. Hierfür wurden im Antrag zwei Konzepte vorgeschlagen: ein vertikales Konzept, bei dem die Pellets ähnlich einer Fontäne senkrecht nach oben geleitet werden, und anschließend durch die Gravitation entschleunigt werden, sowie ein horizontales Konzept, ggf. mit Gegenstromgebläse, um die Pellets aerodynamisch abzubremesen. Da das vertikale Konzept mit einer zusätzlichen Umlenkung arbeiten müsste (horizontaler Leitungsausstritt aus Fahrzeugen), wodurch selbst bei größeren Krümmerradien zusätzliche Zerkleinerung und Feinanteilbildung verursacht wird (Paper Pelletbruch) wurde dieses Konzept verworfen. Da im Falle des horizontalen Konzepts keine Beschleunigung entgegen der Partikelflugrichtung wirkt, gibt es zwei Möglichkeiten. Zum einen besteht die Option, mit einem Gegenstromgebläse den in die Auffangeinrichtung eintretenden Feststoff abzubremesen, zum anderen kann mit einer ausreichend großen Dimensionierung des Behältnisses ein Absinken der Partikel auf den Behälterboden erreicht werden, sofern ab dem Zeitpunkt des Eintritts in die Auffangeinrichtung keine weitere Beschleunigung durch die Förderluft aus der pneumatischen Leitung auf die Pellets einwirkt. Da der Feinanteil, der sich in der Schüttung befindet, ein wesentlicher Teil der Probe ist, muss dieser ebenfalls eingefangen werden. Im Falle eines Gegenstromgebläses würde sich die zu filternde Luftmenge im System jedoch weiter erhöhen und der Druck im Auffangabschnitt zusätzlich steigen. Aus diesem Grund wurde das horizontale Konzept ohne Gegenstromgebläse ausgewählt. Für ein vollständiges Einfangen der Pellets sowie des Feinanteils wurde hierfür in Kooperation mit der Fa. Silotec GmbH (Teilnehmer des Projektbegleitenden Ausschusses) ein zylindrischer Fangsack mit einer Abmessung von 4,3 m Länge und einem Durchmesser von 55 cm entworfen. Als Material wurde ein Hochleistungsgewebe ausgewählt, das auch Anwendung in sogenannten Sacksilos für Holzpellets findet. Das Gewebe besitzt eine Vielzahl von Eigenschaften, die für den Anwendungszweck ideal sind: Während des Einblasvorgangs bläst sich der Fangsack auf, sodass ein Freiraum entsteht, in dem die Pellets schonend absinken können. Das Gewebe ist luftdurchlässig, sodass nur ein geringer Druckanstieg innerhalb des Fangsacks entsteht. Die Förderluft tritt gleichmäßig über die gesamte Länge aus, eine weitere Beschleunigung der Pellets findet somit nicht mehr statt. Gleichzeitig ist das Gewebe dicht genug verwebt, um den Feinanteil innerhalb des Systems zu halten. Der Fangsack kann aufgrund der robusten Eigenschaften mehrere hundert Kilo Pellets beinhalten und mit einem Kran oder Gabelstapler angehoben werden. An den beiden Stirnseiten des Fangsacks befindet sich eine

Verjüngung von 55 cm auf 30 cm, sowie eine Kordel, die ein Verschließen des Gewebesacks ermöglicht.

Funktionalität: Handhabung der Probenchargen

Da in AP5 und AP6 Probenchargen von bis zu 250 kg eingefangen werden und mehrere Versuche in kurzen Zeitabständen hintereinander stattfinden sollten, war es erforderlich, die Abläufe für das Ein- und Aushängen der Probensäcke möglichst einfach zu gestalten. Hierfür wurde ein Gerüst bestehend aus Profilstangen konstruiert, das eine modulare Aufbauweise besitzt, sodass eine Teildemontage für eine einfachere Transportierbarkeit möglich ist. Der Fangsack besitzt zwei Reihen mit ca. 15 Ösen, die parallel zueinander entlang der gesamten Länge des zylindrischen Sacks in das Material eingebracht sind. Korrespondierend dazu befinden sich im Haltegerüst zwei Reihen mit über die gesamte Länge verteilten Bolzen, in die die Ösen eingehängt werden können. Für die Erfassung der Masse ist die gesamte Apparatur auf zwei Wiegebalken montiert (s. Abbildung 3), das Wiegesystem kann in 100 g Schritten bis zu 2 t erfassen.

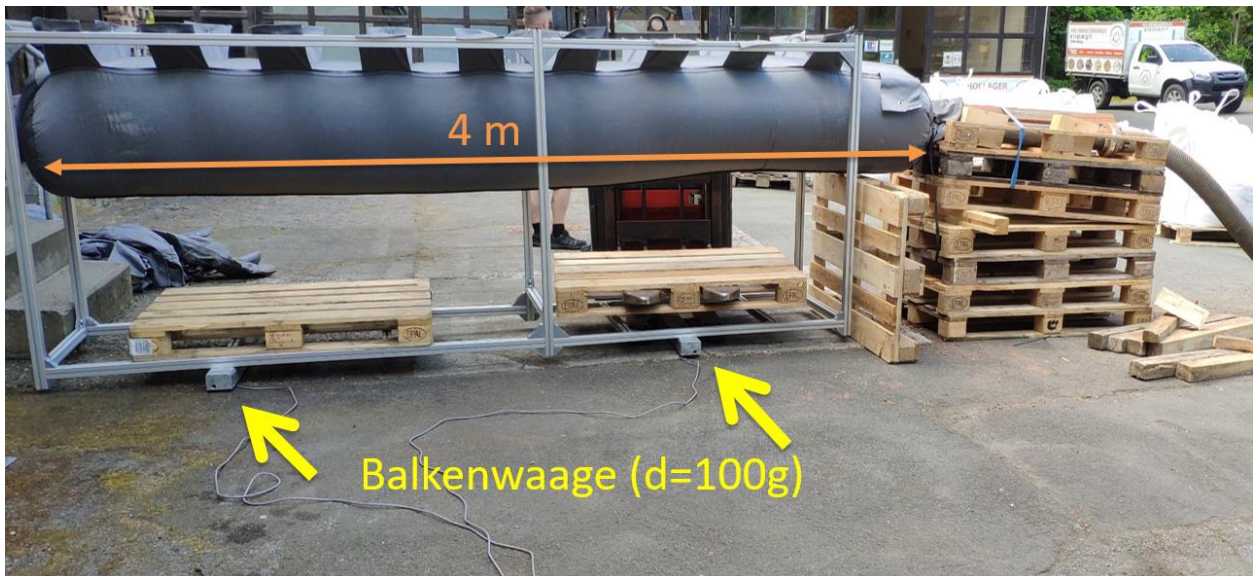


Abbildung 3: Fangsack auf Balkenwaage

Zudem wird das aktuell erfasste Gewicht im Sekundentakt an einen Computer weitergeleitet, über den Zeitstempel kann dann der Pelletmassenstrom ermittelt werden. Die Software für die Weiterverarbeitung des Waagen-Signals wurde ebenfalls in Rahmen des Projekts erstellt. Die Daten können während der Erfassung in Echtzeit angezeigt werden, zusätzlich wird eine Datei mit Gewicht und Zeitstempel für die Auswertung erstellt. Sobald der Versuch abgeschlossen ist, muss der Fangsack ausgehängt werden. Dies erfolgt abhängig von den verfügbaren Hebevorrichtungen entweder über einen Kran in Kombination mit Rundschlingen, die um den Gewebesack gewickelt werden, oder im Falle eines Gabelstaplers über ein Anheben des Fangsacks. Anschließend werden die Proben in ein luftdichtes Big Bag umgefüllt, sodass während der Zwischenlagerung bis zu Auswertung der Proben keine Veränderung durch Einflüsse wie die Umgebungsfeuchte möglich sind.

Arbeitspaket 2: Charakterisierung der Lieferfahrzeuge und Festlegung der Prozessparameter

An dem Forschungsprojekt nahmen insgesamt vier Fahrzeuge unterschiedlicher Bautypen und Hersteller teil. Ziel des AP2 war es, vorbereitend für AP3 (Ausrüstung der Fahrzeuge mit Messtechnik) eine Übersicht über die konstruktive Umsetzung der Fahrzeuge zu erhalten. Hauptaugenmerk war hier die Fragestellung, an welchen Positionen Messtechnik verbaut werden sollte, um eine Beurteilung der Zerkleinerung bei relevanten Betriebsbedingungen zu ermöglichen.

Erfassung des Massenstroms

Für die Erfassung des Massenstroms war es erforderlich, die vorhandenen Daten aus der verbauten Fahrzeugwaage auszulesen. In den Silofahrzeugen wird zur Dokumentation und als Beleg für den Kunden das Gewicht der ausgeblasenen Pelletschüttung erfasst. Hierfür ist das gesamte Silokammersystem über Wägezellen mit dem tragenden Rahmen des LKW verbunden. Dieses Messsystem unterliegt zudem der Eichpflicht, die Auflösung beträgt $d = 20 \text{ kg}$. Das Gewicht wird dann je nach Ausführung des Fahrzeugs über den Bordcomputer und zusätzlich über eine Funkfernbedienung ausgegeben. Bei zwei der teilnehmenden Hersteller der Siloaufbauten war ein Anschluss für eine serielle Datenkommunikation vorhanden, bzw. ein Anschluss wurde zusätzlich durch die Hersteller bereitgestellt. Die Waage des dritten Silofahrzeugs konnte in Rücksprache mit dem Hersteller ebenfalls durch eine Anpassung verfügbar gemacht werden. Auf dem teilnehmenden Kombikipper mit Zellradschleuse ist keine Waage vorhanden. Hier werden separate Kammern in der Ladefläche auf dem Betriebshof befüllt. Über eine Fahrzeugwaage kann dann das Gewicht in der Kammer bestimmt werden, bei Auslieferung an einen Kunden wird dann die gesamte Kammer entleert. Für die in AP6 durchgeführten Versuche wurde daher in AP1 eine Balkenwaage beschafft, die es ermöglicht, den Massenstrom über das Wiegen der eingefangenen Probe zu realisieren. Dies liefert zudem eine höhere Genauigkeit, da die Balkenwaage in $d=100 \text{ g}$ Schritten auflöst und eine schnellere Abtastrate besitzt als die LKW-Waagen.

Erfassung des Volumenstromes der Förderluft

Eine gängige Methode für die Bestimmung des Volumenstromes von Gasen ist das sogenannte Differenzdruckverfahren. Die Anwendung dieses Messprinzips findet sich in Form von Blendenmessstrecken in verschiedenen industriellen Anlagen wieder. Aufgrund der robusten Bauweise, die zudem ohne bewegliche und somit stoßanfällige Bauteile funktioniert, wurden Messblenden für die Erfassung des Förderluftvolumenstroms ausgewählt. Das Verfahren ist in DIN 5167-2 geregelt. Zusätzlich zu der Messblende müssen noch die Stoffdaten der Förderluft bekannt sein; diese werden über zusätzlich zu verbauende Thermoelemente (Temperatur) und Drucksensoren im Vorlauf der Blendenmessstrecke bestimmt. Die in DIN 5167-2 definierten Standards sehen vor, dass im Falle der in den Fahrzeugen vorliegenden Leitungsquerschnitte für die Blende eine gerade Vorlaufstrecke von 150 cm und ein Nachlauf von 30 cm bis zur nächsten Umlenkung der Leitung eingehalten wird. Diese Vorgaben wurden bei der Montage der

Komponenten im Vorfeld zu AP3, dem Einbau der Messtechnik, mit den Herstellern der Siloaufbauten kommuniziert. Es wurden Lösungen in der Leitungsführung eingeplant, um den Vorgaben der Norm zu entsprechen.

Für die Abschnitte, in denen der Einbau von auf dem Differenzdruckverfahren basierenden Messmethoden aufgrund der kompakt gestalteten Leitungssysteme nicht möglich war, wurde eine alternative Messeinrichtung entwickelt. Eine weitere Möglichkeit den Massen- und Volumendurchfluss in einer Rohrleitung zu ermitteln, ist die sogenannte Konstant-Temperatur-Anemometrie (CTA = Constant Temperature Anemometry). Dieses Messprinzip kombiniert ein Heizelement mit einem Temperatursensor, um über die von dem Fluid (z.B. Förderluft) abgeführte Wärme ein Maß für die Strömungsgeschwindigkeit zu erhalten. Aufgrund der Anforderungen an die Temperaturbeständigkeit (bis 150 C), die Signalkompatibilität (Ausgabe des Messwerts als Spannungssignal für Weiterverarbeitung der Daten) und die Einbausituation (Einführung als Sonde in bestehendes Rohrleitungssystem) wurde im Rahmen des Projekts ein passender Sensor entwickelt. Ein Nachteil der CTA-Methode ist die Tatsache, dass eine Kalibrierung im Anschluss an den Einbau zwingend erforderlich ist, da das Strömungsfeld am Sensormesspunkt abhängig von dem Volumenstrom und der Geometrie im Messbereich abhängt. Die erforderlichen Messungen hierfür wurden in AP4, der Erprobung der Messtechnik durchgeführt.

Erfassung der Drehzahl der Zellradschleuse

Einer der in AP5 und AP6 variierten Betriebsparameter ist die Drehzahl der Zellradschleuse. Diese Komponente ist in dem am Projekt teilnehmenden Kombikipper verbaut. Um die vom Fahrzeugbediener gewählten Einstellungen zu ermitteln, und für einen Vergleich der Ergebnisse aus AP5 den Modellversuchen mit den Fahrzeugversuchen in AP6, war es erforderlich die Drehzahl am Bauteil zu messen. Hierfür wurde ein sogenannter Hall-Sensor, der kapazitiv über eine Magnetfeldänderung die Drehzahl ermittelt, ausgewählt. Diese Messtechnik lässt sich einfach direkt am Bauteil anwenden und liefert eine genügende Genauigkeit ($\pm 5\%$), insbesondere da die Drehzahl des Zellrads während des Betriebs konstant bleibt.

Erfassung der Drehzahl der Zellradschleuse

Eines der in AP5 und AP6 variierten Betriebsparameter ist die Drehzahl der Zellradschleuse. Diese Komponente ist in dem am Projekt teilnehmenden Kombikipper verbaut. Um die real vom Fahrzeugbediener gewählten Einstellungen zu ermitteln, und für einen Vergleich der Ergebnisse aus AP5 den Modellversuchen mit den Fahrzeugversuchen in AP6, war es erforderlich die Drehzahl am Bauteil zu messen. Hierfür wurde ein sogenannter Hall-Sensor, der kapazitiv über eine Magnetfeldänderung die Drehzahl ermittelt, ausgewählt. Diese Messtechnik lässt sich einfach direkt am Bauteil anwenden und liefert eine geeignete Genauigkeit, insbesondere da die Drehzahl des Zellrads während des Betriebs konstant bleibt.

Arbeitspaket 3: Ausrüstung der Fahrzeuge mit der jeweils erforderlichen Messtechnik

Das Arbeitspaket lässt sich in drei Abschnitte Unterteilen: Entwicklung des Messwerterfassungssystems, Arbeitsplanung, mechanische und elektrotechnische Umrüstung.

Für die in AP2 ausgewählten Sensoren und identifizierten Schnittstellen war es erforderlich, ein kompatibles Messwerterfassungssystem zu entwickeln, das zudem auf den Fahrzeugen verbaut werden kann, um im Alltagsbetrieb kontinuierlich Messungen durchzuführen. Ursprünglich war laut Antrag geplant ein Messwerterfassungssystem aus einem vorhergehenden Projekt zu verwenden, dieses war aber sowohl hardwaretechnisch als auch softwareseitig stark veraltet. Aus diesem Grunde war eine Neuentwicklung basierend erforderlich. Die Messreihen sollten automatisch bei einer Auslieferung gestartet, um in Anschluss an einen Datenserver zwecks Auswertung übertragen werden. Aufgrund der unterschiedlichen Sensoren, die auf den Fahrzeugen verbaut sind, muss das System eine modulare Bauweise aufweisen, damit Anpassungen für den Einsatz auf unterschiedlichen Fahrzeugtypen möglich sind. Aufgrund der über die Jahreszeit schwankenden Temperaturen und des Einsatzgebietes auf dem LKW muss das Messsystem eine robuste Bauweise besitzen, die auch Stößen und Vibrationen im Betrieb widerstehen kann. Um unerwünschte Einflüsse auf die empfindliche Messelektronik präventiv abzuwenden, wurde die gesamte Messtechnik in einem Schutzkoffer installiert. In den folgenden Abschnitten wird das Gesamtsystem daher als „Messkoffer“ bezeichnet und ist in Abbildung 4 dargestellt.

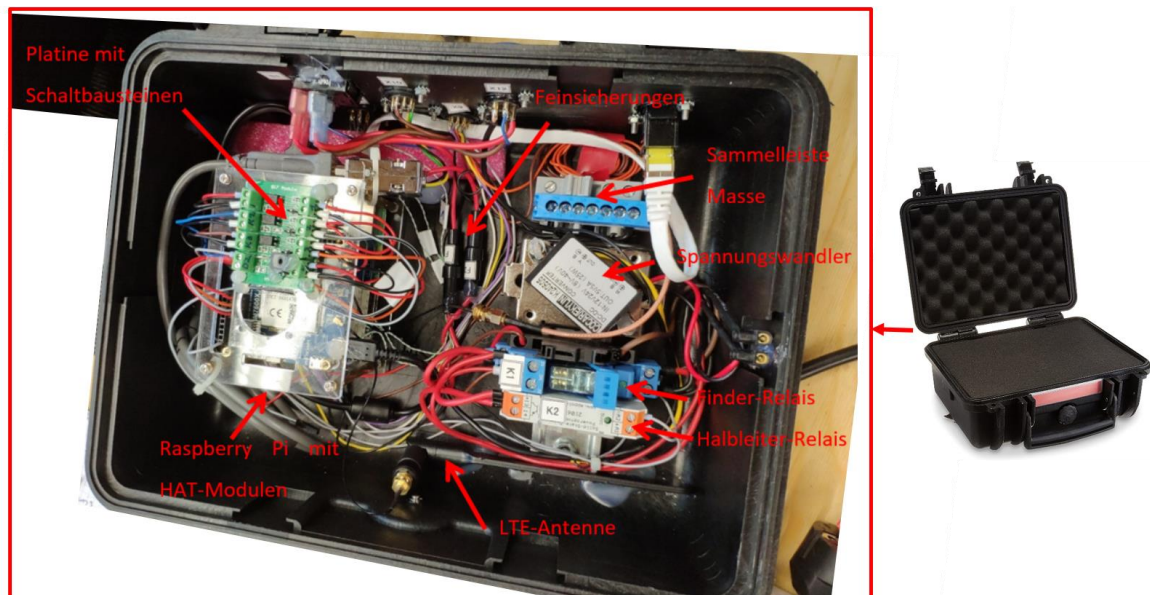


Abbildung 4: Messwerterfassungssystem für die Datenverarbeitung der Sensoren, verbaut in einem Schutzkoffer (Messkoffer)

Als Basis für die Messwerterfassung wird ein Raspberry Pi 3B+, ein kompakter Einplatinencomputer verwendet. Dieses Computersystem zeichnet sich durch eine geringe Leistungsaufnahme (15 Watt) aus, wodurch eine passive Kühlung eingesetzt werden kann. Dies ist aus mehreren Gründen vorteilhaft, da zum einen ein für mechanische Belastungen wie Stöße anfälliger Lüfter entfällt und zum anderen nur ein geringer Temperaturanstieg im Inneren des Messkoffers aufgrund der Abwärme zu erwarten ist. Dies ist auch aufgrund der zulässigen Betriebstemperaturen von maximal 80 °C, bedingt durch die elektronischen Bausteine, von Vorteil. Zudem wird das Bordnetz des LKWs kaum belastet, wodurch eine Überbeanspruchung der Batterie ausgeschlossen werden kann. Über Aufsteckmodule kann das Computersystem mit

zusätzlichen analogen Signaleingängen und Funktionen erweitert werden. Für das Auslesen der Drucksensoren, Strömungsmesstechnik und Thermoelemente sowie für die Kommunikation mit dem Datenserver über Mobilfunk (LTE) wurden drei Module auf das Einplatinensystem aufgesteckt. Für die erforderliche Spannungsversorgung des Computers über das Bordnetz wurde ein Gleichspannungswandler verbaut, um die Versorgungsspannung des LKW von 24V auf 5V umzusetzen. Der Anschluss des Messkoffers mit dem Fahrzeug verfügt zudem über eine Schmelzsicherung, damit im Falle eines Defekts kein Schaden am Fahrzeug entstehen kann. Eine GPS-Antenne ermöglicht es, optional den Standort zur Zeit der Auslieferung zu erfassen, wodurch ein Abgleich der Messdaten mit den Stammdaten (vom Fahrer vermerkte Leitungslänge) des Lieferorts möglich ist. Die Erfassung des Betriebszustands des Fahrzeugs, wie etwa die Information, ob das Fahrzeug abgeschaltet wurde, oder ob eine Auslieferung beginnt, erfolgt über Spannungssignale. Eine Messung wird gestartet, sobald ein Signal vom Kompressor, der vor Beginn der Auslieferung eingeschaltet wird, erkannt wird. Der vollständige Ablauf einer Messung ist in Abbildung 5 dargestellt.

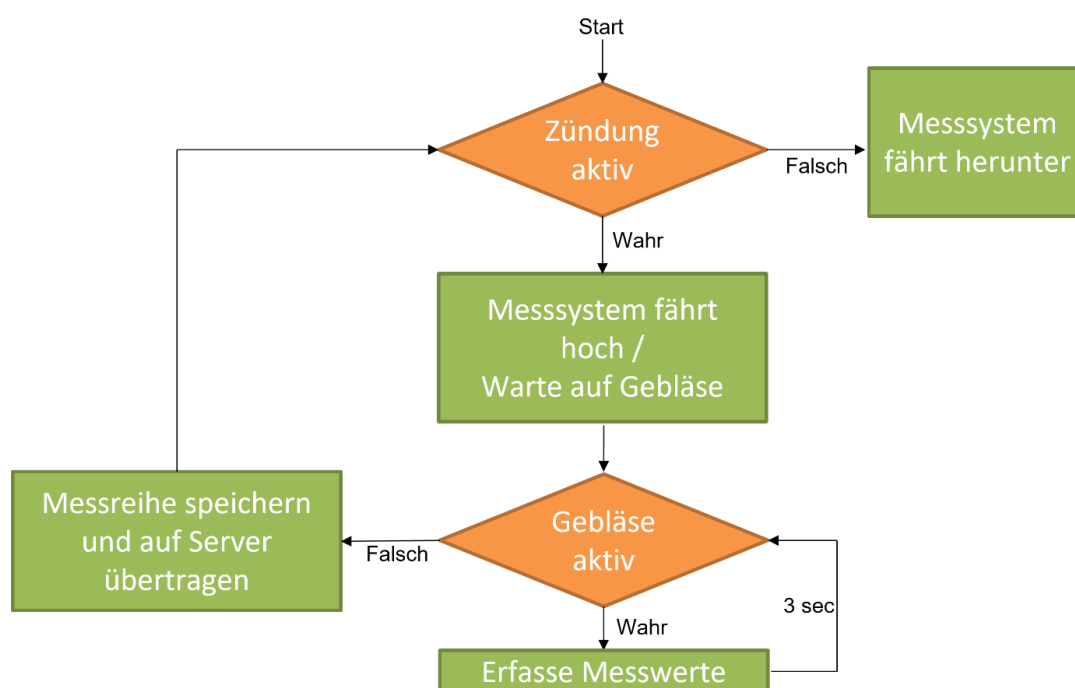


Abbildung 5: Ablauf einer Messung und Schaltlogik des Messsystems

Arbeitsplanung der Umrüstungen

Zwei der teilnehmenden Silofahrzeuge wurden direkt durch die Hersteller der Siloaufbauten in der Werkshalle mit Messtechnik ausgerüstet, da diese Fahrzeuge während der Projektlaufzeit produziert wurden. So konnte die Messtechnik direkt während des Neubaus in den Fahrzeugen integriert werden. Hierfür wurden durch die Forschungsstelle Installationspläne, Kabelbäume, Messtechnik und Material für den Einbau der Komponenten an die Hersteller gesandt. Für jedes Fahrzeug wurden Installationsschemas zur Begleitung der Umrüstung erstellt wie in Abbildung 6 dargestellt.

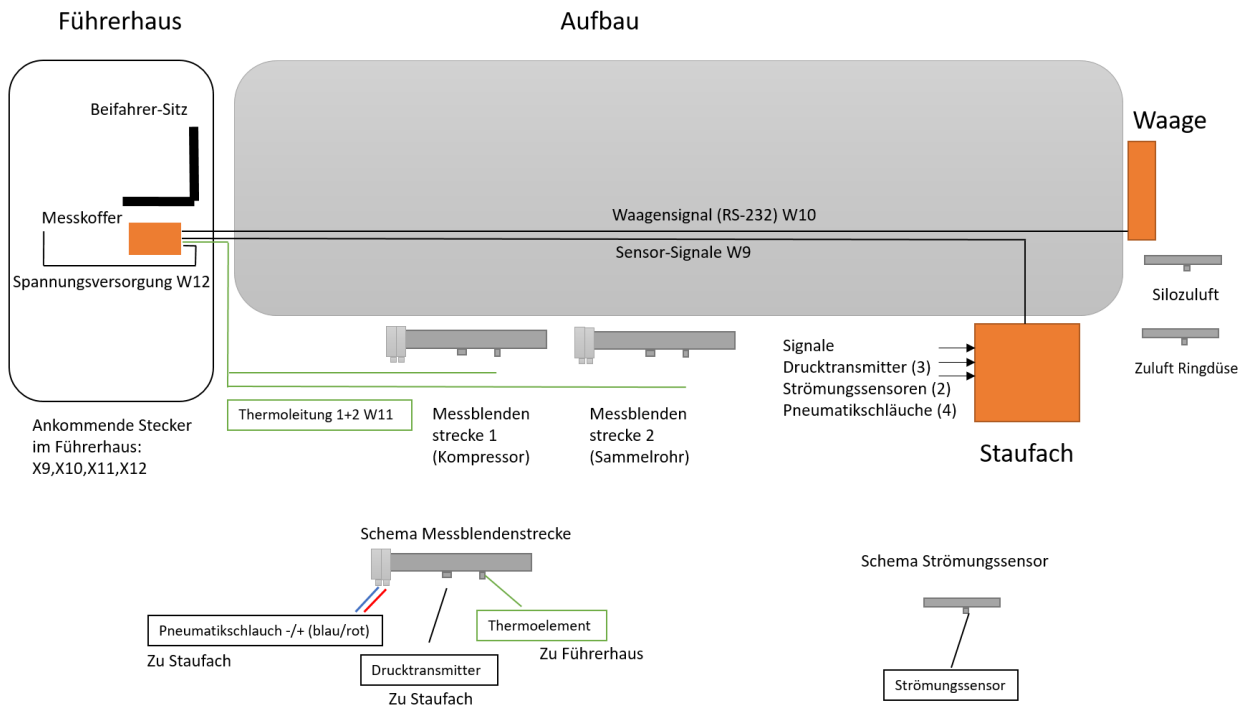


Abbildung 6: Installationsschema der Messtechnik für ein Silofahrzeug

Zudem war es wichtig, Anschlussleitungen wie die Spannungsversorgung sowie die Fahrzeugsignale als Information über den Betriebszustand und das Signal der Fahrzeugwaage vorzubereiten. Die Messblenden für die Luftvolumenstromerfassung wurden im Vorfeld passend zu den Leistungsdaten der verbauten Kompressoren ausgelegt und produziert. Der Einbau der Komponenten erfolgte dann primär durch das Personal der Silohersteller, in Anwesenheit und mit Rücksprache durch das Personal der Forschungsstelle.

Mechanische und Elektrotechnische Umrüstung der Fahrzeuge

Die in AP2 ausgewählten Komponenten wurden in den Fahrzeugen an den vorbereiteten Leitungspositionen eingebaut. Messblendenstrecken benötigen neben der Messblende zusätzlich eine Temperaturmessung sowie eine Druckmessung im Abschnitt vor der Hauptkomponente. Die Leitungsführung wurde nach den Vorgaben der DIN 5167-2 eingehalten, der Einbau einer Messstrecke ist in Abbildung 7 dargestellt.

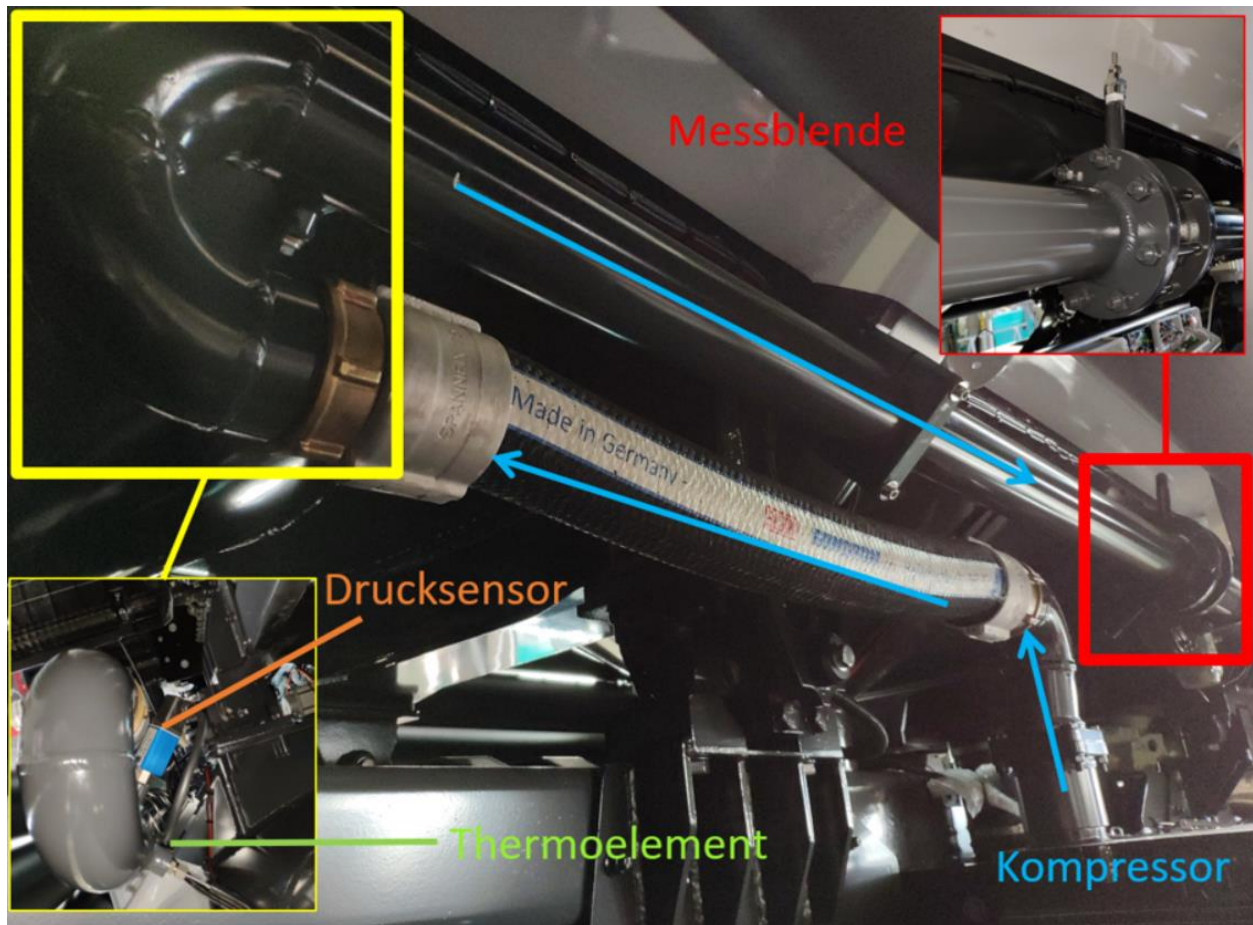


Abbildung 7: Messstrecke für Erfassung des Luftvolumenstroms in der Kompressorleitung eines Silofahrzeugs

Arbeitspaket 4: Erprobung der Messtechnik und initiale Charakterisierung der Zerkleinerungswirkung der unterschiedlichen Fahrzeugtypen

Nach dem Einbau der Messtechnik war es erforderlich die Messtechnik auf Betriebsbereitschaft zu prüfen. Eine wichtige Funktion ist hierbei das Schaltverhalten der Spannungsversorgung des Messsystems, wie in Abbildung 5 dargestellt, zu testen. Neben einer zuverlässigen Aufzeichnung der Messdaten ist auch das vollständige Abschalten des Computersystems wichtig. Im Falle einer Fehlfunktion würde andernfalls bei längeren Standzeiten eines Lieferfahrzeugs die Entladung der Bordbatterie eintreten. Bei korrekter Erkennung einer ausgeschalteten Zündung fährt das Messsystem vollständig herunter und trennt dann mit einem Relais vollständig die Verbindung zum Stromkreis der Bordbatterie. Nach erneutem Betätigen der Zündung startet das System wieder. Zudem wurde überprüft ob die Datenkommunikation mit dem Messsystem geprüft. Diese erlaubt es Messdaten auf einen verschlüsselten Datenserver zu übertragen, zudem können Updates bei Systemstart aufgespielt und eine Fernwartung durchgeführt werden. Zusätzlich war es erforderlich die Sensoren anhand der analogen Signalausgänge zu prüfen. Hierfür wurden bei einem ausgestatteten Silofahrzeug die Rohdaten bei Parametervariation ausgelesen. Wie in Abbildung 8 dargestellt. Über die Öffnung verschiedener Luftklappen innerhalb des Silofahrzeugs wurden gezielt die Abschnitte, in denen Sensoren verbaut waren durchströmt. Über eine

Erhöhung des Spannungssignals, im Falle der Messblende und der Strömungssensoren bei mehr Durchfluss ansteigt konnte die Funktionalität der Sensoren bestätigt werden. Drucksensoren wurden über das Aufbauen von Druck in dem Einbauabschnitt getestet.



Abbildung 8: Ausgelesene Rohdaten (Spannungssignal) aus den auf einem Silofahrzeug verbauten Sensoren



Für eine Erprobung des Waagen-Signals, wurde eine Last an die Fahrzeugleiter am Heck angehängt, sodass eine Veränderung des Waagen-Ausgabewerts möglich war. Da die Fahrzeuge während entweder im Werk bei der Endmontage oder auf dem Abstellplatz umgerüstet wurden waren keine Pellets in den Behältern zwecks Prüfung der initialen Zerkleinerungswirkung vorhanden, jedoch wurden erste Tests mit den Komponenten zeitgleich in den Modellversuchsständen (AP5) durchgeführt.

Untersuchte Holzpellet-Typen

Im Rahmen des Forschungsvorhabens wurden zwei unterschiedliche Holzpelletarten, hier als Typ A und Typ B bezeichnet, untersucht (Tabelle 1).

In den Modellversuchen AP5 wurden Pellets Typ A verwendet, in den Fahrzeugversuchen Pellets Typ B.

Tabelle 1: Eigenschaften der Holzpellets Typ A und Typ B im Auslieferungszustand.

		Typ A	Typ B
			
Unternehmen		Power Pellets Vertriebs GmbH & Co.KG	Plospan Bio-Energy B.V.
Zertifikat		ENplusA1	ENplusA1
Durchmesser	[mm]	6 ± 0.1	6,2 ± 0.1
Länge	[mm]	10 - 40	5 - 35
Holzspäne $x_{50,3}$	[mm]	1,072	0,872
Wassergehalt	[wt.-%]	5,95 ± 0,18	6,66 ± 0,04
Pelletdichte $\rho_{app.}$	[g/cm ³]	1,242 ± 0,03	1,162 ± 0,02
Mechanische Festigkeit DU	[%]	98,84	98,10

Arbeitspaket 5: Analyse der Zerkleinerungswirkung der einzelnen Komponenten der unterschiedlichen Lieferfahrzeuge

Ziel des Arbeitspakets 5 war es, die individuelle Zerkleinerungswirkung der Einzelaggregate in den Lieferfahrzeugen zu charakterisieren. Hierfür wurden zwei Versuchsstände errichtet, um eine gezielte Untersuchung der verschiedenen Parameter zu ermöglichen.

Versuchsstand Silofahrzeuge

Silofahrzeuge sind spezialisierte Transportfahrzeuge, die für den effizienten Transport von Schüttgütern wie Holzpellets ausgelegt sind (s. Abbildung 9). Die Hauptkomponenten dieser Fahrzeuge arbeiten zusammen, um die Pellets sicher und mit möglichst geringer Qualitätsminderung zu ihrem Zielort zu befördern. Der zentrale Bestandteil ist ein zylindrischer Drucktank mit einem konusförmigen Boden, der die Pellets durch Schwerkraft zur Entladestelle führt. Dieser Tank kann zusätzlich unter Druck gesetzt werden, was den Entladevorgang unterstützt.



Abbildung 9: Seitenansicht eines Silofahrzeugs mit vier Silokammern

Unmittelbar am konischen Boden und mittig positioniert, befindet sich eine Materialklappe, die den Tank nach unten hin abschließt. Diese Klappe kann im Winkel verstellt werden und ist entscheidend für die Dosierung der Holzpellets, die in die darunterliegende pneumatische Förderleitung gelangen. Durch das Verstellen des Winkels der Materialklappe kann die Menge der austretenden Pellets präzise geregelt werden, was eine kontrollierte und gleichmäßige Förderung ermöglicht. Die Klappe kann je nach Fahrzeug händisch über einen Hebel oder pneumatisch über eine Steuerung eingestellt werden.

Die Silofahrzeuge verfügen über die Möglichkeit, Silozuluft, auch Oberluft genannt, von oben in den Behälter einzuleiten, um den Austrag der Holzpellets durch die Materialklappe zu erleichtern. Zusätzlich sind in manchen Fahrzeugen am Fahrzeugboden Auflockerungsdüsen angebracht, die im Bereich der Materialklappe für

ein verbessertes Ausströmen der Schüttung sorgen. Der Kompressor, ein weiterer wichtiger Bestandteil, erzeugt den benötigten Luftdruck. Der Luftstrom vom Kompressor wird in zwei Hauptwege aufgeteilt: Silozuluft und Treibluft. Die Silozuluft wird in den Tank geleitet, um den Druck aufrechtzuerhalten und den Austrag der Pellets zu unterstützen, während die Treibluft in die pneumatische Förderleitung unterhalb der Klappen und Tanks eingespeist wird, um die Pellets in der Förderleitung zum Zielort zu transportieren. Der Druck im Tank kann über die Silozuluft variiert werden, um den Austrag der Pellets zu steuern. Durch Anpassen des Drucks kann die Fließgeschwindigkeit der Pellets indirekt reguliert werden. Die Parameter Klappenöffnung und Silozuluft interagieren und definieren letztendlich den Pelletmassenstrom. Die schematische Skizze ist in Abbildung 10 dargestellt. Zusätzlich verbauen manche Hersteller in Silofahrzeugen noch zwei weitere Luftleitungen. Im Abschnitt innerhalb des Silos unmittelbar oberhalb der Materialklappe werden Düsen für die Zugabe von Auflockerungsluft verbaut. Die Luftzugabe in diesem Abschnitt führt dazu, dass die Pellets in diesem Bereich besser fließen, wodurch ein Austrag auch bei flacheren Bodenschrägen möglich ist. Desweiteren werden an der Austrittsleitung mancher Fahrzeuge zusätzliche Ringdüsen, die Luft durch einen Ringspalt, der die Materialleitung umgibt zuführen, eingebaut. Hierdurch können Materialschläuche freigeblasen, oder eine weitere Beschleunigung der Pellets ermöglicht werden.

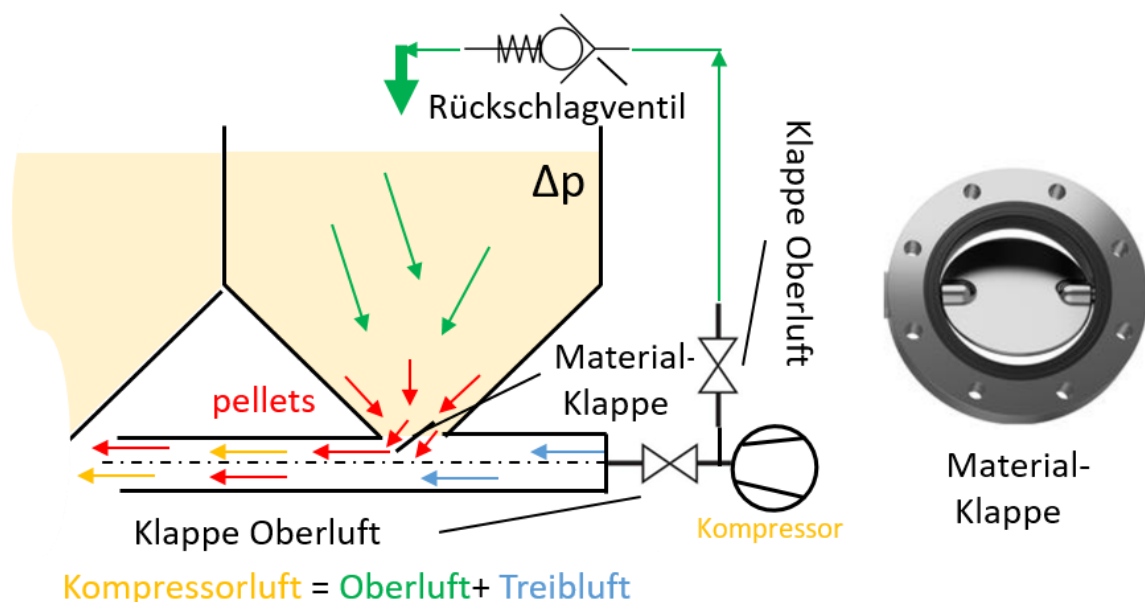


Abbildung 10: Schematische Darstellung des Aufbaus eines Silofahrzeugs

Dieses technische System wurde in den errichteten Modellversuchsständen abgebildet, um Detailuntersuchungen am Siloausfluss und Parametervariationen durchführen zu können. Die Versuchsstände ermöglichen es, die Funktionsweise und die Auswirkungen der einzelnen Komponenten auf die Zerkleinerung der Schüttung genauer zu beobachten. Abbildung 11 zeigt die 3D-Ansicht des CAD-Modells des konstruierten

Versuchsstands. Das Modellsilo verfügt über keine Auflockerungsluft, es kann nur über die Oberluft und Treibluft gearbeitet werden.

Die Realisierung des Modellversuchsstands wird im folgenden Abschnitt vorgestellt. Der Versuchsstand lässt sich in drei Abschnitte Unterteilen: Silobehälter, Siloboden mit Klappe und Materialleitung.

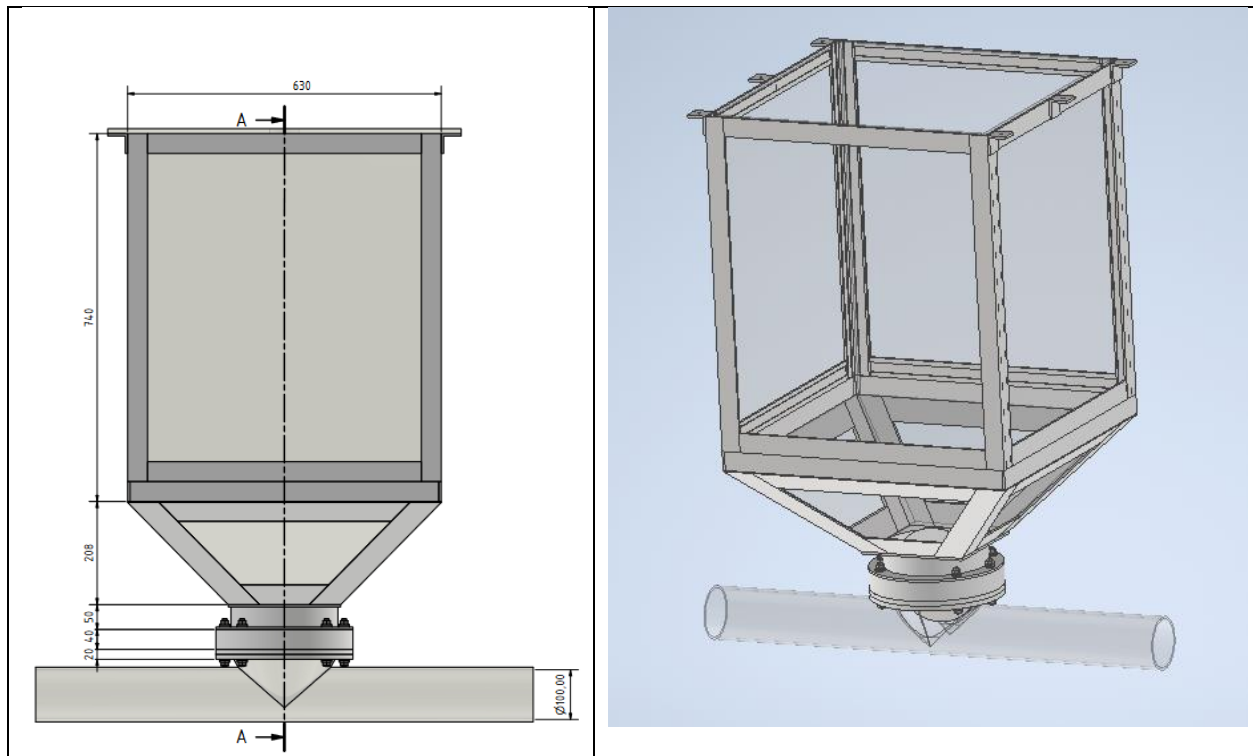


Abbildung 11: Skizze der Seitenansicht des Modellversuchsstands (links), CAD-Modell des konstruierten Modellversuchsstands für Silofahrzeuge (rechts)

Der obere, quaderförmige Siloabschnitt der Konstruktion bietet Volumen für ca. 200 kg Holzpellets (Schüttdichte 650 kg/m^3). Die gesamte Konstruktion besteht aus 5 mm dicken Flachstahlprofilen. Das Stahlgerüst dient als Rahmen für die 10 mm starken transparenten Acrylglascheiben, die zum Zwecke der optischen Zugänglichkeit, druckdicht eingeklebt werden.

Der konusförmige Boden, an dessen Mitte in den Fahrzeugen die Materialklappe montiert wird, wurde im Versuchsstand über einen Trichterboden bestehend aus vier Trapezen approximiert. Diese sind in einem Winkel vom 45° verbaut, sodass ein zuverlässiges Abfließen der Pellets bei geöffneter Klappe gewährleistet werden kann. Unterhalb des Plexiglastrichters ist an dem Gerüst ein Flansch angeschweißt, an diesen ist eine Materialklappe (Originalbauteil) montiert. Die Ansteuerung der Klappe erfolgt pneumatisch über Druckluft. Hierfür ist ein 5/3-Wege-Magnetventil verbaut, das über einen Drehschalter oder alternativ über einen Computer angesteuert werden kann. Über einen vorgeschalteten Druckminderer kann zudem die Geschwindigkeit der Klappe bei Ventilbetätigung voreingestellt werden. Für den Durchmesserübergang von Materialklappe (200 mm) auf Förderleitung (100 mm) wurde eine

Sondergeometrie, ebenfalls aus Acrylglas, angefertigt. Diese Geometrie ist ebenfalls der der Silofahrzeuge nachempfunden und erlaubt Einblicke in den Abschnitt, in denen das Material in die Förderleitung eintritt und durch die Förderluft beschleunigt wird.

Der Deckel des Siloversuchstands verfügt über eine druckdichte Acrylglascheibe, die zum Befüllen demontiert werden kann. In die Scheibe ist eine Anschlussleitung integriert, über diese kann Silozuluft in den Behälter eingeleitet werden. Ein Rückschlagventil verhindert die Rückströmung von Förderluft, sodass Druck im Silo aufgebaut werden kann.

Zur Durchführung eines Versuches wird zunächst die pneumatische Klappe geschlossen und der Deckel demontiert. Anschließend können Pellets durch die Öffnung mit einem Durchmesser von 300 mm eingefüllt werden. Sobald das Silo gefüllt ist, wird der Deckel erneut montiert sowie die Silozuluftleitung im Deckel über ein Rückschlagventil mit dem Kompressor verbunden. Die Materialleitung verfügt ebenfalls über einen Anschluss an den Kompressor, sodass ein Förderluftstrom unterhalb der Klappe vorliegt, um die Pellets bei Eintritt in die Leitung zu beschleunigen. Der fertiggestellte Versuchsstand ist in Abbildung 12 dargestellt.

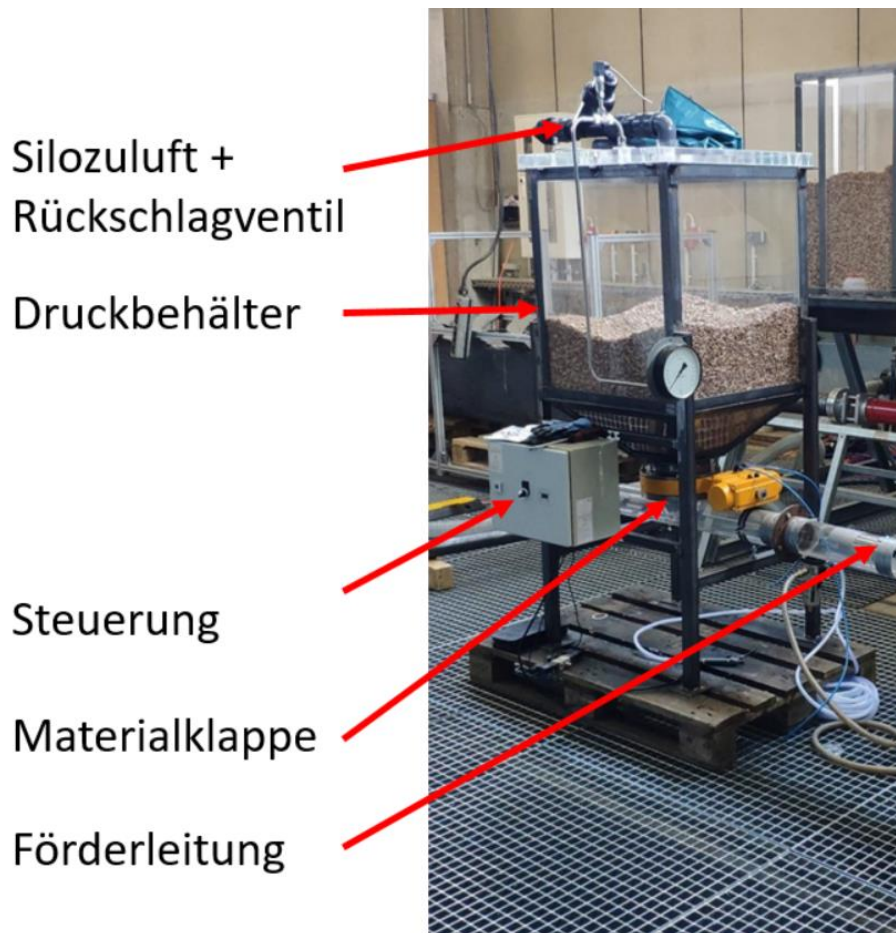


Abbildung 12: Versuchsstand zur Untersuchung des Austragssystems der Silofahrzeuge

Versuchsstand Kombikipper (Zellradschleuse)

Der Versuchstand Zellradschleuse baut auf einem Austragssystem geeignet für Schüttgüter wie Getreide, Tierfutter aber auch Holzpellets auf. Verbaut werden diese Systeme am Fahrzeugheck, im Boden des Behälters eines Kombikippers. Diese Fahrzeuge verfügen über eine Kippvorrichtung, die es ermöglicht, die Ladefläche einseitig anzuheben, sodass das Schüttgut Richtung Fahrzeugheck rieselt. Am tiefsten Punkten befindet sich ein Trog, der eine Querförderschnecke enthält. Diese ist orthogonal zur Fahrriichtung montiert und die Abmessungen entsprechen der Behälterbreite. Die Schnecke ist so gefertigt, dass über zwei gegenläufig gestaltete Schneckenwendeln ein Materialtransport von den Seiten zur Mitte des Trogs erfolgt. Mittig befindet sich eine rechteckige Öffnung, die zu einem Schacht führt. Über einen Sperrschieber kann die Schachtöffnungsweite variiert werden. Pellets, die in den Schacht rieseln, gelangen in den Eintritt einer Zellradschleuse. Für die im späteren Verlauf erläuterten Ergebnisse ist es an dieser Stelle wichtig, den genauen Aufbau und die Funktionsweise dieser Komponente besser zu verstehen.

Eine Zellradschleuse ist ein Gerät zur dosierten Zuführung und Förderung von Schüttgütern wie Holzpellets. Sie besteht aus einem zylindrischen Gehäuse mit einem rotierenden Zellenrad (Rotor), das mehrere Kammern oder Zellen enthält. Diese Zellen werden von oben durch einen Schacht befüllt, wobei die Holzpellets durch die Schwerkraft in die offenen Zellen des rotierenden Zellenrads gelangen.

Der Antrieb des Zellenrads erfolgt auf den LKWs in der Praxis durch hydraulische Antriebe, im Falle des Versuchstands wurde ein Elektromotor genutzt, der das Rad kontinuierlich oder in festgelegten Intervallen dreht. Durch diese Drehbewegung werden die gefüllten Zellen von der Einlassposition oben zur Auslassposition unten transportiert. In diesem Fall ist die pneumatische Förderleitung in der untersten Zelle integriert. Sobald eine Zelle diese Position erreicht, wird sie durch einen Druckluft- oder Gasstrom entleert, der die Holzpellets aus der geöffneten Zelle erfasst und durch das angeschlossene Rohrleitungssystem weitertransportiert. Die Konstruktion der Zellen ermöglicht bei ausreichender Gebläseleistung eine vollständige Entleerung, bevor sie weiterdrehen und erneut befüllt werden. Hier wird Förderluft in die Förderleitung eingespeist, welche die Holzpellets in der Zelle erfasst und durch das angeschlossene Rohrleitungssystem weitertransportiert.

Neben der Förderfunktion erfüllt die Zellradschleuse auch eine Dichtungsfunktion zwischen zwei Bereichen mit unterschiedlichen Drücken. Sie verhindert das Entweichen des Luftstroms aus der pneumatischen Förderleitung in den Schacht durch präzise gefertigte Toleranzen und zusätzliche Dichtungselemente zwischen den Zellen und dem Gehäuse. Im Gegensatz zu den Silofahrzeugen steht der Behälter bei diesem System nicht unter Überdruck.

Insgesamt ermöglicht die Zellradschleuse eine gleichmäßige und dosierte Übergabe der Holzpellets von der Befüllstation zur pneumatischen Förderleitung und fungiert gleichzeitig als Schleuse zwischen zwei drucktechnisch unterschiedlichen Systemen, wodurch ein kontinuierlicher Förderprozess gewährleistet wird. Eine schematische Skizze sowie Fotos der relevanten Komponenten sind in Abbildung 13 zu sehen.

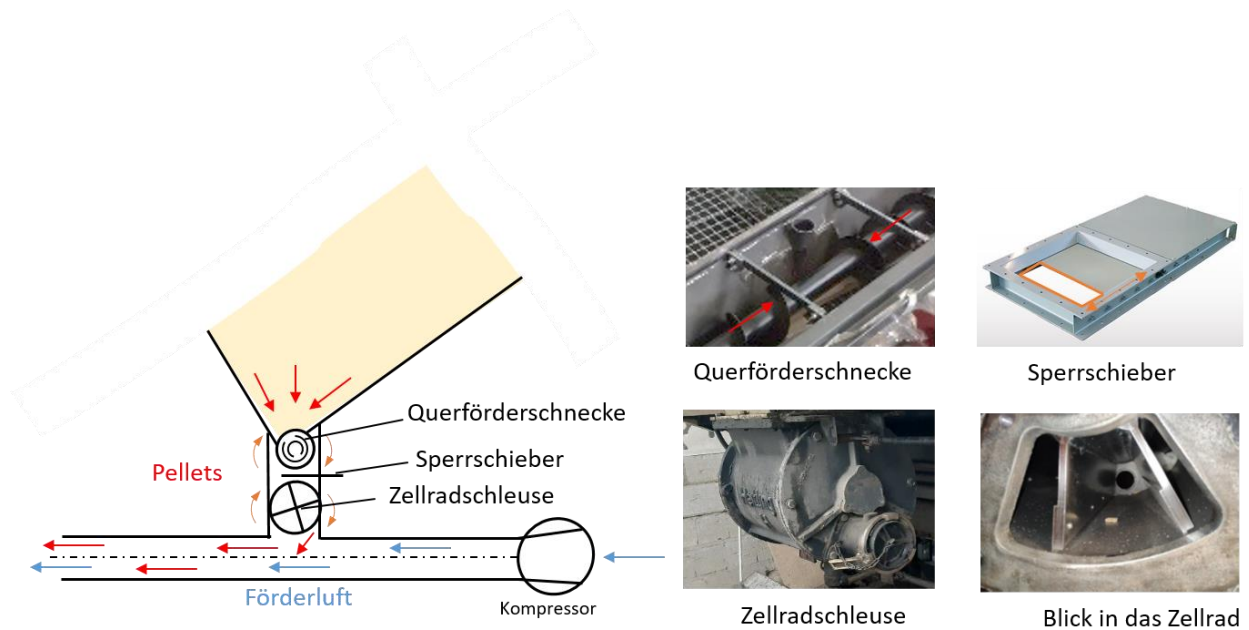


Abbildung 13: Schematische Darstellung eines Lieferfahrzeugs mit Zellradschleuse (links, Kombikipper), Komponenten des Systems (rechts)

Bei den im Versuchsstand verbauten Komponenten handelt es sich um Originalbauteile, die durch einen Fahrzeughersteller (Mitglied des Projektbegleitenden Ausschusses) zur Verfügung gestellt wurden. Für die Durchführung von Versuchen mit Parametervariationen wie beispielsweise der Drehzahl der Querförderschnecke oder des Zellrads waren umfangreiche Anpassungen erforderlich, die Umsetzung dieser wird im folgenden Abschnitt erläutert. Der Versuchsstand ist in Abbildung 14 dargestellt.

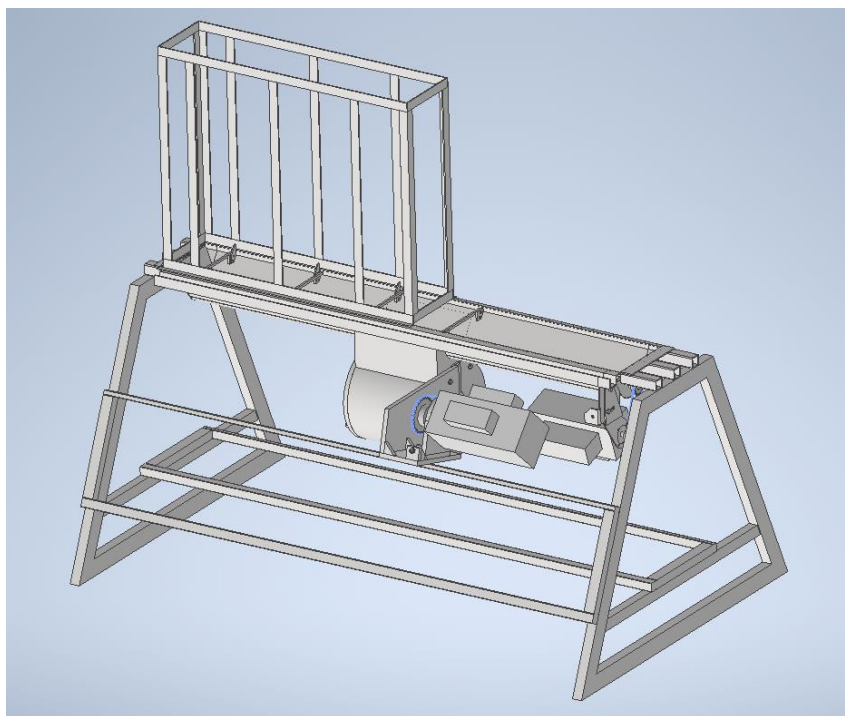


Abbildung 14: Versuchsstand zur Untersuchung der Zellradschleuse

Zunächst war es erforderlich, die Bauteile auf ein stabiles Gerüst zu montieren, das sowohl die Komponenten als auch ca. 250 kg Holzpellets sowie das Gewicht der Elektromotoren trägt. Hierfür wurden trapezförmige Grundgerüste an beiden Seiten als Standfüße verbaut. An den Oberseiten der Trapeze sind sechs Vierkanthrohre angeschweißt, die den Trog mit der Förderschnecke halten. Über dem Trog wurde ein Behälter konstruiert. Aufgrund der Symmetrie wurde in Absprache mit dem Projektbegleitenden Ausschuss lediglich eine Seite der Querförderschnecke betrieben, um den Umfang der Pelletcharge pro Versuch im Rahmen zu halten. Der Behälter besteht aus einem Stahlgestell, das aus 5 mm Stahlblech zusammenschweißt ist. Die untere Seite ist an die unterschiedlichen Höhen der Kante der Rinne angepasst und liegt dort auf. In das Stahlgerüst werden Plexiglasscheiben eingeklebt, sodass die Entleerung des Behälters während der Versuche beobachtet werden kann.

Das Zellrad und die Förderschnecke verfügen auf den Fahrzeugen über hydraulische Antriebe. Aus technischen Gründen wurde für den Versuchsstand ein Antrieb über Motoren mit Frequenzumrichter gewählt. Diese ermöglichen eine präzise Einstellung der Drehzahl. Die Kraftübertragung der Motoren erfolgt über Ketten. Der Versuchsstand sowie die Teilkomponenten sind in Abbildung 15 dargestellt.

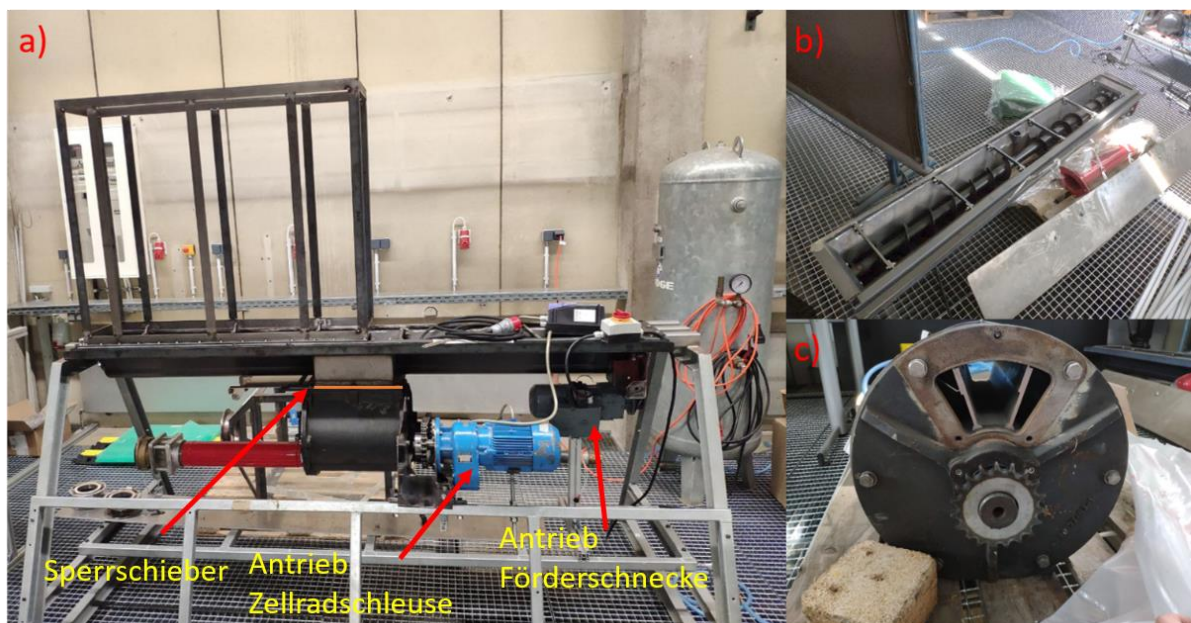


Abbildung 15: Umsetzung des Modellversuchsstands Zellradschleuse a), Querförderschnecke b), Zellradschleuse c)

Auswertung und Ergebnisse

Zur Beurteilung der Zerkleinerungswirkung lassen sich mehrere Kennwerte heranziehen. Dazu gehört die Bildung von Feinanteil, die Veränderung der Häufigkeitsverteilung der Pelletlänge sowie daraus abgeleitet, die mittlere arithmetische Länge. Bei den in den Modellversuchen verwendeten Pellets handelt es sich um Sackware (je 15 kg) einer einzelnen Produktionscharge, wobei das Material in den Gebinden im Werk gesiebt wurde, so dass initial kein Feinanteil in den Proben zu erwarten ist. Nach einem Versuch erfolgt zunächst ein Sieben der Probe über ein Rundlochblech mit 5 mm Durchmesser, gefolgt von einem 3,15 mm Rundlochsieb nach ISO 17225. Die Ermittlung der Längenhäufigkeitsverteilung erfolgt durch eine optische Längenmessung. Über das Verhältnis der ursprünglichen mittleren Länge \bar{l}_0 bezogen auf die

mittlere Länge \bar{l}_1 nach dem Fördervorgang lässt sich dann die *Crushing Ratio CR* (Zerkleinerungsrate) bestimmen (1).

$$CR = \bar{l}_0 / \bar{l}_1 \quad (1)$$

Für die Versuchsreihe wurden Probenchargen von je 45 kg Pellets pro Versuch verwendet.

Die in Abbildung 16 dargestellten Versuche mit dem Klappensilo wurden mit einer Klappenstellung von 60 ° bei einem Förderluftvolumenstrom von 530 m³/h durchgeführt. Es wurde keine zusätzliche Silozuluft hinzugeschaltet. Für die Zellradversuche wurde hingegen eine Förderluftmenge von ca. 400 m³/h benutzt, der Materialschieber im Zellradversuchsstand wurde zu einem Viertel geöffnet. Dies ist eine typische Öffnungsweite, die im unteren Bereich der in der Praxis gängigen Einstellungen gewählt wurde, da der derzeit eingesetzte Förderluftvolumenstrom mit 400 m³/h unterhalb der in der Praxis anliegenden ca. 650-900 m³/h lag. Das Auffangen der Schüttung durch den 4 m langen Gewebefangsack (AP1) ist materialschonend, in allen Versuchen sinkt die Schüttung innerhalb des Fangsacks nach 2-3 m zu Boden, ein Aufprallen von Pellets gegen das Ende des Sack, und eine dadurch möglicherweise auftretende Zerkleinerung findet bei den derzeit eingesetzten Förderluftmengen zwischen 100-530 m³/h nicht statt. Aus diesem Grunde kann Vergleichbarkeit von Versuchen hinsichtlich der Zerkleinerung mit geringfügig unterschiedlichen Förderluftvolumenströmen angenommen werden, an dieser Stelle sei jedoch erneut darauf hingewiesen, dass ein abweichender Luftvolumenstrom in Abbildung 16 wie gekennzeichnet vorliegt.

Die Pelletschüttung wird im Falle von reinen Zellrad-Versuchen direkt oberhalb der Öffnung zum Zellrad im Silo eingebracht, im Falle des Versuchs mit Querförderschnecke wurde die Schüttung bewusst am Rand des Schneckenotrgs aufgegeben, sodass zunächst eine Förderung über die gesamte Schneckenwendel bis zur Mitte (ca. 1 m) erfolgte, und die Pellets anschließend in das Zellrad fielen. Der verbleibende Feinanteil im Schneckenotrog wurde in der Probe berücksichtigt.

Unter Betrachtung der reinen Zellradversuche (Schnecke nicht in Betrieb) in Abbildung 16 bei Drehzahlen von 20 – 48 rpm fällt auf, dass die Feinanteilbildung mit zunehmender Drehzahl ansteigt. Dies gilt sowohl für den groben Feinanteil (Durchgang durch 5 mm Lochsieb) als auch den Feinanteil nach ISO 17225 (Durchgang durch 3,15 mm Lochsieb). Aus den Messungen geht hervor, dass insbesondere der Sprung von 20 auf 30 rpm sowie der Sprung von 40 auf 48 rpm zu einer stärkeren Bildung von Feinanteil führt. Die Zunahme des Feinanteils bei steigender Drehzahl lässt sich durch höhere Relativgeschwindigkeiten Pellet-Zellradwand und dadurch größeren Abrieb der Schüttung innerhalb der Zellradschleuse erklären.

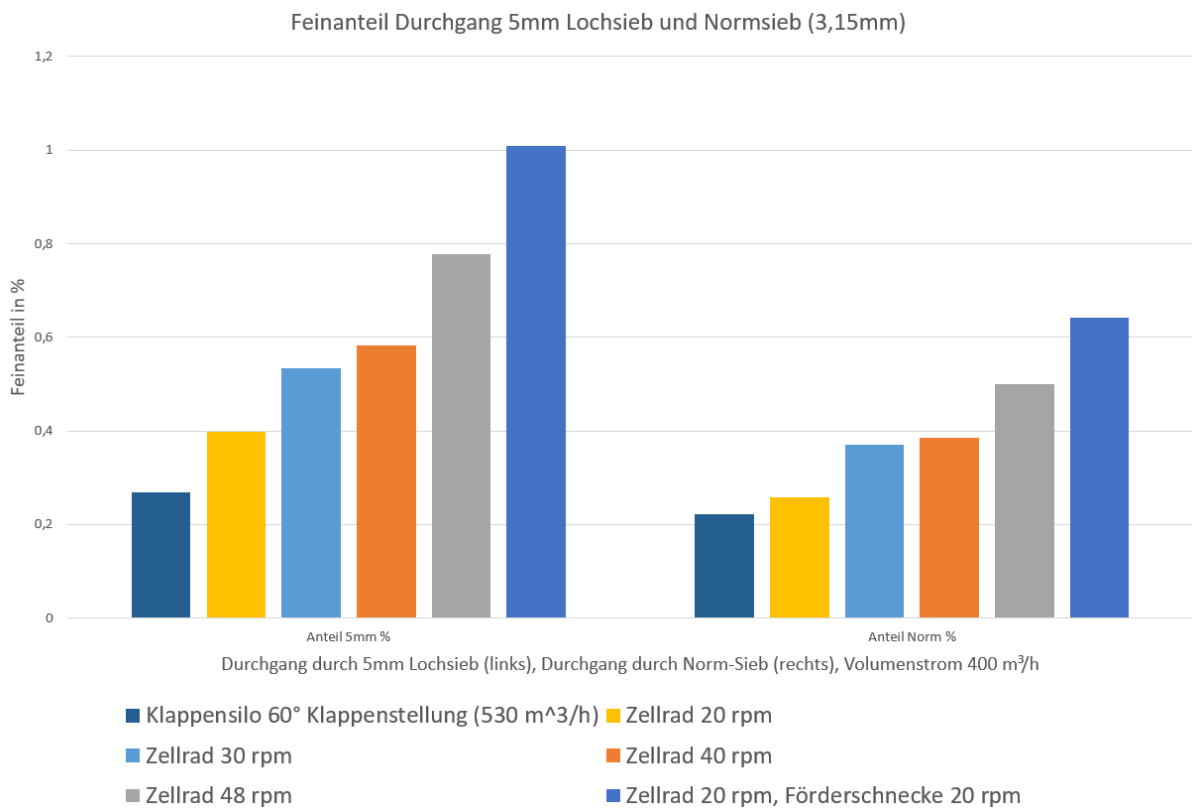


Abbildung 16: Ermittelter Feinanteil aus den durchgeführten Versuchen, Materialschieber des Zellrads zu einem Viertel geöffnet, Transport der Schüttung über die gesamte Länge der Förderschnecke

Wird die Schnecke hinzugeschaltet (vgl. Zellrad 20 rpm mit und ohne Schnecke), so ist eine 2,5-fache Zunahme des Feinanteilgehalts zu beobachten. Das Spaltmaß zwischen Schnecken Zahn und Schnecken trog liegt im Bereich von 4-10 mm, wodurch eine Zerkleinerung durch eingeklemmte Pellets auftritt. Der Vergleich der Messreihe aus dem Klappensilo bei 60 ° Klappenöffnung mit den Zellradversuchen zeigt eine deutlich geringere Bildung von groben Feinanteil (>5 mm) und eine etwas geringere Bildung von Feinanteil nach DIN 17225 (>3,15 mm). Die *Crushing Ratio CR* beträgt 1,073 für das Klappensilo, 1,1 für das Zellrad bei 20 rpm und steigt auf 1,15 bei Nutzung der Förderschnecke.

Abbildung 17 stellt die relative Häufigkeitsverteilung der Pelletlängen für die unterschiedlichen Versuche dar. In der Häufigkeitsverteilung lassen sich die Vorgänge weiter betrachten. Die Ausgangsverteilung (Sackware) liegt im Bereich der Pelletlängen von 20 – 27 mm stets 0,5-2 % oberhalb der einmal durch die Förderung belasteten Proben. Der Peak der Ausgangspellets liegt mit ca. 5,8% bei einer Länge von 14 mm. Eine Verschiebung der Verteilung und des Peaks nach links, hin zu kleineren Werten zeigt die Zerkleinerung an. Die Häufigkeit längerer Pellets (>20 mm) nimmt ab, da diese brechen, entsprechend nimmt die Häufigkeit kürzerer Pellets (>14 mm) und Pellets mittlerer Länge (14-20 mm) zu. Für die dargestellten Versuche zeigt sich, dass mit zunehmender Zerkleinerung eine Verschiebung der Verteilungskurve nach links stattfindet. In einem Vergleich der Daten des Zellrads mit und ohne Schnecke (gelber und blauer Graph) wird ersichtlich, dass durch Nutzung der Schnecke Pellets mittlerer Länge in kürzere Pellets zerbrechen. Dies ist anhand des Verlauf des blauen Graphen oberhalb des Gelben im Bereich 5-13 mm und unterhalb des gelben Graphen im Bereich 14-23 mm zu sehen.

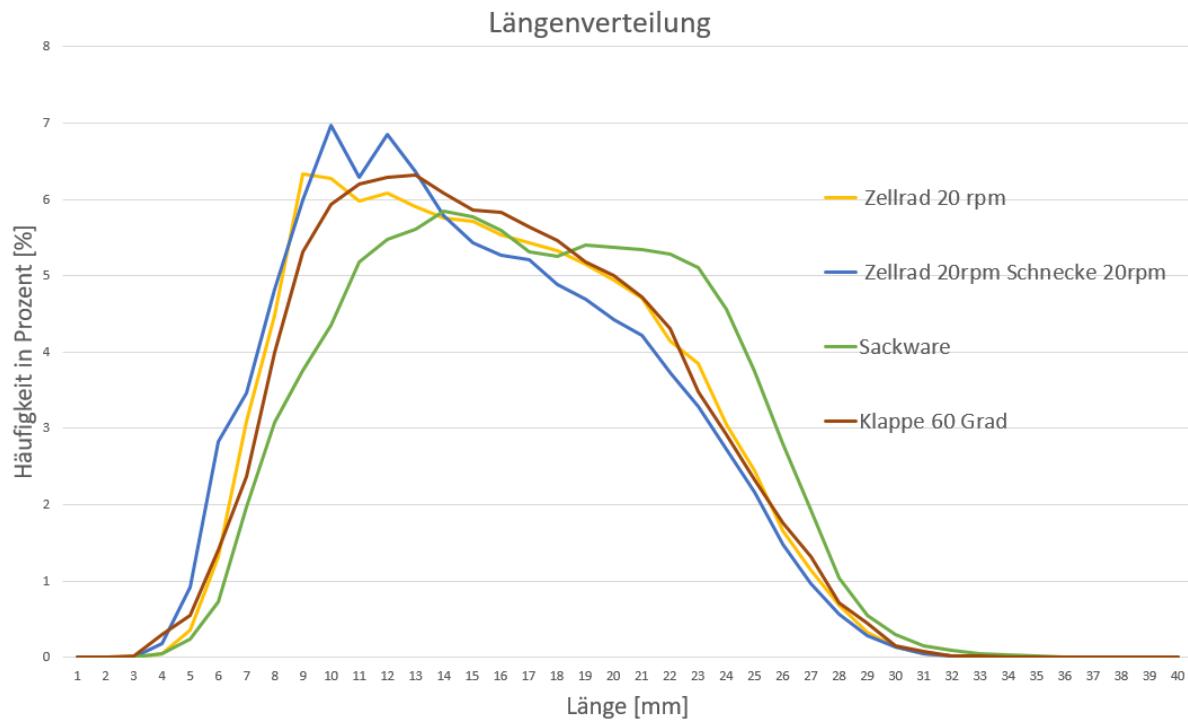


Abbildung 17: Längenverteilung der unterschiedlichen Versuche, Förderluftstrom $400\text{m}^3/\text{h}$, Sackware entspricht der ursprünglichen Verteilung, der Versucht mit der Materialklappe wurde ausschließlich mit Treibluft (keine Oberluft) durchgeführt

Neben der Zerkleinerungswirkung wurde auch der geförderte Massenstrom der Versuchsstände bei Parametervariation untersucht. Hierfür wurde die Förderluftmenge auf $530\text{ m}^3/\text{h}$ festgelegt, im Falle des Klappensilos wurde ausschließlich Förderluft, keine Silozuluft eingespeist, der Materialschieber der Zellrads wurde zur Hälfte geöffnet, so wie in der Praxis üblich. Als Probenmenge wurden je 90 kg Pellets verwendet und der Massenstrom gemittelt. Die Messung erfolgt über ein System aus zwei Waage-Balken, auf dem der gesamte Fangsack mit einem Gerüst montiert ist. Die Auflösung des Systems liegt bei $0,1\text{ kg}$, das Gewicht wird über eine serielle Schnittstelle im Sekundentakt ausgelesen. Die Ergebnisse sind in Abbildung 18 in der Einheit kg/min dargestellt. Zunächst fällt auf, dass die Förderleistung des Zellrads deutlich über der des Klappensilos liegt. Die Querschnittsfläche, durch die die Schüttung in das Zellrad strömen kann, besitzt eine Abmessung von ca. $200 \times 250\text{ cm}$ und ist damit ca. 60% größer als die der Materialklappe. Hinzu kommt, dass bei voller Öffnung der Materialklappe (90°) diese weiterhin das Ausfließen der Schüttung hemmt. Für beide Systeme ist ersichtlich, dass eine Erhöhung der jeweiligen Stellgröße auch eine Erhöhung des Massenstroms stattfindet. Die Ursache der geringen Förderleistung bei 45° Klappenstellung konnte bei genauerer Betrachtung des Abschnittes unterhalb der Klappe während der Versuchsdurchführung identifiziert werden. Bei zu kleinen Klappenstellungen ist der Spalt zwischen Klappe und Zulaufkonus in die Rohrleitung nur noch sehr schmal, sodass nur wenige Pellets auslaufen. Die typische Fördermenge in den Silofahrzeugen beträgt ca. $150\text{-}250\text{ kg}/\text{min}$. In den hier vorgestellten Versuchen wurde der Spitzenwert der Praxis nicht erreicht. Dies könnte zum einen daran liegen, dass die Versuche aus technischen Gründen ohne Silozuluft durchgeführt wurden. Hinsichtlich der Zellradschleuse lässt sich anhand des Verhältnisses von Massenstrom zu Drehzahl die Schüttgutmenge pro Umdrehung ableiten. Diese liegt im Fall des Versuchs mit 20 rpm bei ca. $12,9\text{ kg}$, bei 48 rpm bei ca. $8,3\text{ kg}$. Dies ist gleichzeitig als Maß für die Befüllung der einzelnen Zellen im Zellrad zu sehen.

Die Beladung der Zellen ist entsprechend bei gleichem Luftvolumenstrom mit zunehmender Drehzahl geringer.

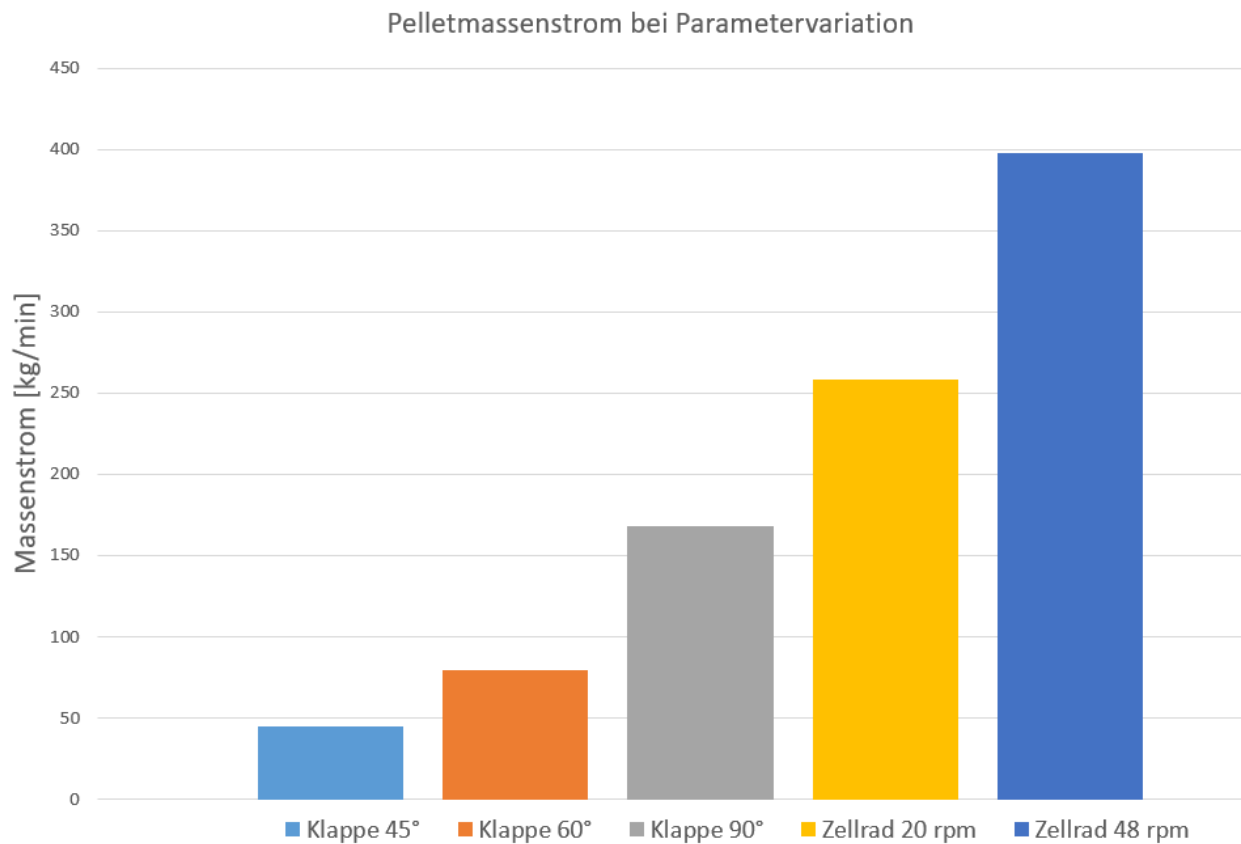


Abbildung 18: Pelletmassenstrom bei Parametervariation, Förderluftvolumenstrom: 530m³/h, Betriebsweise des Klappensilos ausschließlich über Treibluft (keine Silozuluft)

Zusammenfassung

Die Ergebnisse zeigen eine Zerkleinerung der Schüttung, die im Falle des Zellrads mit steigender Drehzahl zunimmt. Die Nutzung der Querförderschnecke verursacht weitere Zerkleinerung und sollte für Holzpellets lediglich zur Restentleerung des Fahrzeugs genutzt werden. Die in Silofahrzeugen mit Materialklappe auftretende Zerkleinerung ist geringer als jene des Zellrads, jedoch ist auch der geförderte Massenstrom geringer.

Arbeitspaket 6: Messung der Zerkleinerungswirkung bei Parametervariation

Für die Fahrzeugförderversuche wurden insgesamt ca. 15 Tonnen Holzpellets aus einer Produktionscharge zunächst mit einem 5 mm-Sieb gesiebt und dann auf die vier teilnehmenden Fahrzeuge aufgeteilt. Insgesamt wurden 50 Versuche mit Probenchargen von je ca. 250 kg, unterschiedlichen Betriebsbedingungen (Druck, Klappenöffnung, Schleusendrehzahl, Leitungslänge) durchgeführt. Die Proben wurden möglichst schonend mit dem Fangsack aus AP1 aufgefangen. In Abbildung 19 ist ein Silofahrzeug, das über eine 2 m Rohrleitung in den Fangsack fördert, zu sehen.



Abbildung 19: Versuchsaufbau für einen Silofahrzeugversuch mit einer 2m langen Rohrleitung bis zum Fangsack

Im Vorfeld der Experimente wurde eine Testmatrix erstellt, die für jede Test-ID einen Zielbetriebsparameter enthielt. Konkret wurde z.B. für die Test-ID 1 der Kompressor auf den geringsten im Alltagsbetrieb verwendeten Luftmassenstrom und die Materialzufuhr auf geringen Ausstoß eingestellt. Bei den druckbeaufschlagten Silofahrzeugen wurde die Materialklappe entsprechend auf die kleinste Öffnungsweite eingestellt, bei der noch Schüttgut ausfließt. Dies entspricht einem Öffnungswinkel von 45-60°. Unterhalb eines Öffnungswinkels von 45 ° erfolgt aufgrund der zu geringen Öffnungsweite kein Siloauslauf. Für Versuch ID 1 wurde bei den Silofahrzeugen kein Überdruck im Behälter aufgebaut. Bei der Zellenradschleuse wurde die Drehzahl auf 28 Umdrehungen pro Minute eingestellt, und der Materialschieber oberhalb der Zellenradschleuse wurde nur zu einem Viertel der vollen Öffnungsweite geöffnet. In der Praxis wird die Drehzahl des Zellrads auf 50 Umdrehungen pro Minute eingestellt, und der Schieber wird zur Hälfte oder mehr geöffnet.

Für jedes Fahrzeug wurden je sechs Versuche mit einer 2 m langen geraden Rohrleitung sowie mindestens fünf Versuche mit einer 18 m langen Materialschlauchleitung durchgeführt. Der Materialschlauch wurde aus drei Elementen mit je sechs Metern Länge zusammengesetzt, die Leitung wurde in einem Viertelkreis (90° Umlenkung) auf dem Betriebshof ausgelegt. Innerhalb der jeweiligen Leitungskonfiguration wurden wiederum die Parameter Förderluftleistung, Druck (Silofahrzeuge) und die Drehzahl der Zellenradschleuse bzw. der Öffnungswinkel der Materialklappe variiert. Zusätzlich wurden an den Fahrzeugen Sonderversuche durchgeführt, wie beispielweise eine Variation der Drehzahl der Zellenradschleuse oder die Variation von Auflockerungsluft bei Fahrzeugen mit Zusatzdüse.

Auswertung der Proben

Aufgrund der Probenmenge von ca. 15 t Pellets war es erforderlich, eine Sieb-Anlage Auswertung zu konstruieren, die einen geeigneten Durchsatz bei gleichzeitig zuverlässiger Trennleistung

erzielt. Die erstellte Anlage ist auf Abbildung 20 dargestellt. Über einen Trichter mit einem internen Materialschieber kann die Durchflussmenge dosiert werden. Die Befüllung der Anlage erfolgt über einen Kran. Die Pellets rutschen aus dem Trichter auf ein 5 mm Rundlochblech (0,5 x 1 m), das einen Neigungswinkel von 10 ° aufweist. Über einen Vibrationsmotor wird das Blech in Schwingung versetzt, sodass die Pellets trotz des geringen Gefälles langsam entlang des Lochblechs transportiert werden. Die Verweilzeit auf dem Sieb kann durch die Dosiermenge am Trichter, sowie die Frequenz des Motors erhöht, und die Trennleistung somit optimiert werden. Die Schwindungsamplitude ist zugunsten eines schonenden Siebvorgangs gering eingestellt.



Abbildung 20: Siebanlage für die Auswertung der Fahrzeugversuche, Durchsatz ca. 250 kg/h

Unterhalb des Lochblechs befindet sich eine zugeschnittene Plane, die als Materialrutsche für den Siebdurchgang fungiert. Dieser gelangt über die Plane vollständig in einen Behälter unterhalb der Siebanlage. Der Behälter kann nach Abschluss aus der Anlage entnommen werden, der 5 mm Lochsiebdurchgang wird im Anschluss von Hand über ein Rundlochsieb nach DIN 17225 (3,15 mm Durchmesser) gesiebt.

Die in AP5 verwendete Anlage, die zur Bestimmung der Längenverteilung der Probe verwendet wurde, besitzt einen Durchsatz von ca. 10 kg/h und war damit nicht ausreichend für eine Auswertung der Proben aus den Fahrzeugversuchen (AP6) in angemessener Zeit. Aus diesem Grund war es hier ebenfalls erforderlich eine optische Längenmessung mit einem höheren Durchsatz zu verwenden. Grundlage hierfür war eine bereits vorhandene, jedoch zum Projektstart hardware- und softwaretechnisch nicht mehr funktionstüchtige Messanlage. Im Rahmen des Projekts wurde die Anlage umfassend erneuert sowie eine neue Software für die Bildauswertung programmiert. Die Funktionsweise der Messanlage basiert auf einer Bilderkennung, die einzelne Holzpellets aus Kontrastbildern erfasst, und aufgrund von Kalibrierparametern eine Umrechnung

von Pixeln zu mm die Länge der erkannten Partikel erfassen kann. Realisiert wird die zunächst erforderliche Vereinzelung der Pellets in den Proben durch die Kombination eines Vibrationsmotors, eines Trapezblechs und einer rotierenden Gummibürste. Letztere sorgt dafür, dass jeweils nur ein Pellet pro Rille in den nächsten Abschnitt gelangt. Dort befindet sich eine Plexiglasplatte, in die mit einer CNC-Maschine mehrere parallel verlaufende Bahnen gefräst wurden. Ein LED-Panel unterhalb der Platte ermöglicht es, mit dem oberhalb der Platte installierten Kamerasystem bestehend aus vier Kameras, scharfe Kontrastbilder aufzuzeichnen. Kontrastbilder bieten den Vorteil, dass keine Reflektionen auftreten, die Umrisse der Holzpellets sind gut zu erkennen, was eine wichtige Grundlage für eine präzise digitale Erfassung ist. Der beschriebene Abschnitt des Versuchsstands ist in Abbildung 21 dargestellt.

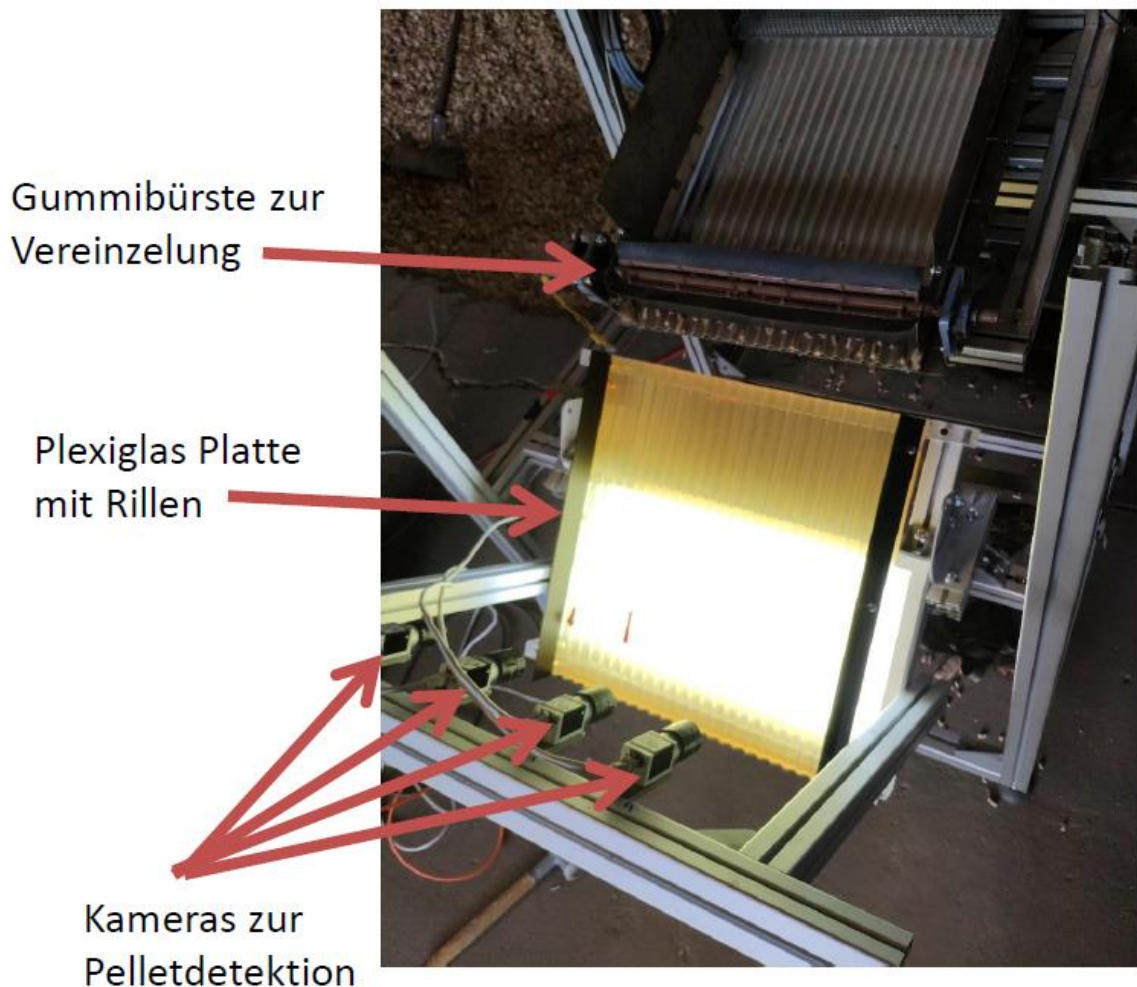


Abbildung 21: Versuchsstand zur Ermittlung der Längenverteilung der Pelletschüttung

Die Software, die die Bilddaten der Kameras auswertet, verwendet eine Kombination mehrerer Algorithmen, wodurch auch Pellets, die nahe beieinander liegen, zuverlässig als einzelne Partikel erkannt werden. Unförmige Bruchstücke werden von der Software erkannt und in einer separaten Liste aufgeführt. Eine korrekte Detektion der realen Länge in mm kann über eine zuvor für jede Kamera erstellte Kalibrierung gewährleistet werden. Optische Fehler wie Verzerrungen durch das Objektiv werden hierdurch herausgerechnet. Für eine Prüfung der Genauigkeit wurden im

Anschluss an die Kalibrierung 30 Prüfkörper mit einer bekannten Länge von 30 mm mit dem System vermessen. Die maximale Abweichung betrug 1,5 % (0,5 mm), bei einem Mittelwert von 29,9875 mm. Da die Kalibrierung nur zuverlässig für Pellets, die innerhalb der Fokusebene rutschen, funktioniert, werden Pellets außerhalb der Fokusebene erkannt und nicht berücksichtigt. Der Durchsatz der Anlage liegt bei 40-50 kg/h, wodurch die Vermessung einiger Proben in angemessener Zeit möglich war. Die Bildrate der Kameras ist mit 40 Bildern pro Sekunde so eingestellt, dass jedes Pellet der Probe vermessen wird. Eine Fehlerkorrektur in der Software verhindert zudem die selten auftretende Doppeltzählung von Pellets, indem exakt gleich lange Pellets, die in aufeinanderfolgenden Bildern in der gleichen Bahn erkannt wurden, gelöscht werden. Nach einem Durchlauf von ca. 250 kg Probe werden die ca. 4 Millionen Bilder, die durch die vier Kameras aufgezeichnet wurden, ausgewertet. Ein Beispielbild aus der Bildauswertung ist in Abbildung 22 zu sehen.

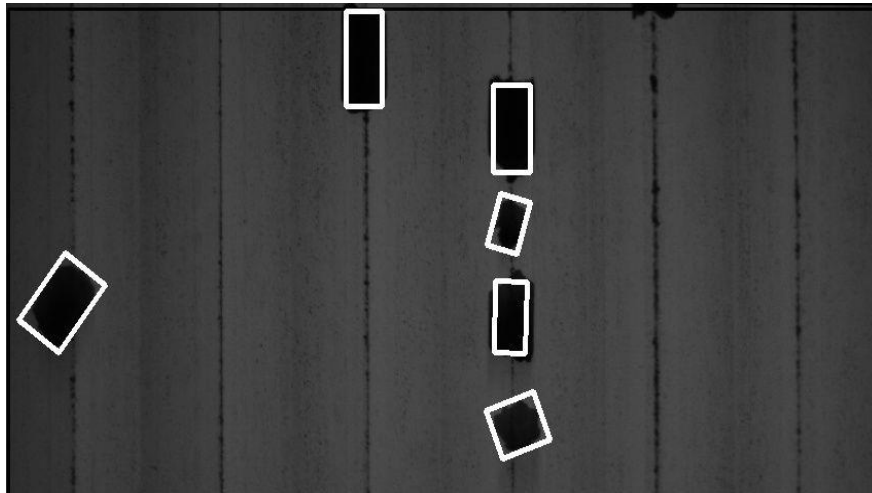


Abbildung 22: Bildmaterial einer Kamera nach Anwendung der Bilderkennung

Aus der Gesamtheit der durchgeführten Fahrzeugversuche lassen sich verschiedene Erkenntnisse ableiten, die im folgenden Abschnitt vorgestellt werden.

Einfluss der Materialleitung auf die Zerkleinerung

Für eine Untersuchung der Zerkleinerungswirkung wurden Messreihen aus den 2 m und 18 m Leitungsversuchen ausgesucht, dessen resultierender Pelletmassenstrom und Förderluftvolumen ähnlich war. Die Materialklappenstellung sowie die Zellraddrehzahl in den Versuchen war für beide Längen identisch, die Gebläse/Kompressorleistung befand sich bei beiden Messreihen ebenfalls in der gleichen Größenordnung. Die Berücksichtigung von einem möglichst einheitlichen Förderluftvolumenstrom ist an dieser Stelle insbesondere deshalb wichtig, da so hinsichtlich der Partikelgeschwindigkeit beim Auffangen der Probe vergleichbare Bedingungen herrschen. Andernfalls kann ein stark unterschiedlicher Luftvolumenstrom zu einer höheren Zerkleinerung beim Auffangen der Probe verursachen. Wie in Abbildung 23 zu sehen ist, konnte eine Feinanteilbildung von etwa 0,9 % allein durch die Verwendung eines Materialschlauchs von 18 m festgestellt werden, in diesem Fall anhand von Messreihen eines Silofahrzeugs.

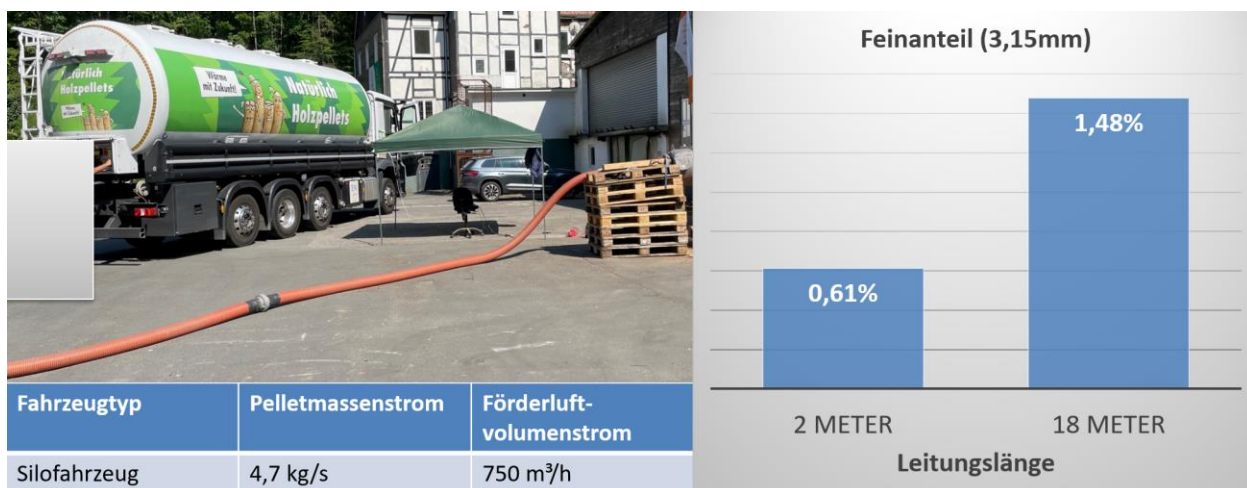


Abbildung 23: Untersuchung des Einflusses der Zerkleinerung durch Verwendung eines 18m Materialschlauchs (Silofahrzeug)

Gleichermaßen wurden auch für das Fahrzeug mit Zellradschleuse zwei Messreihen mit gleichen Betriebsparametern sowie resultierendem Pelletmassen- und Förderluftvolumenstrom verglichen (s. Abbildung 24). Auch hier konnte eine Erhöhung des resultierenden Feinanteilgehalts um etwa 0,85 % bei Erhöhung der Förderleitungslänge durch einen 18 m Materialschlauch festgestellt werden.

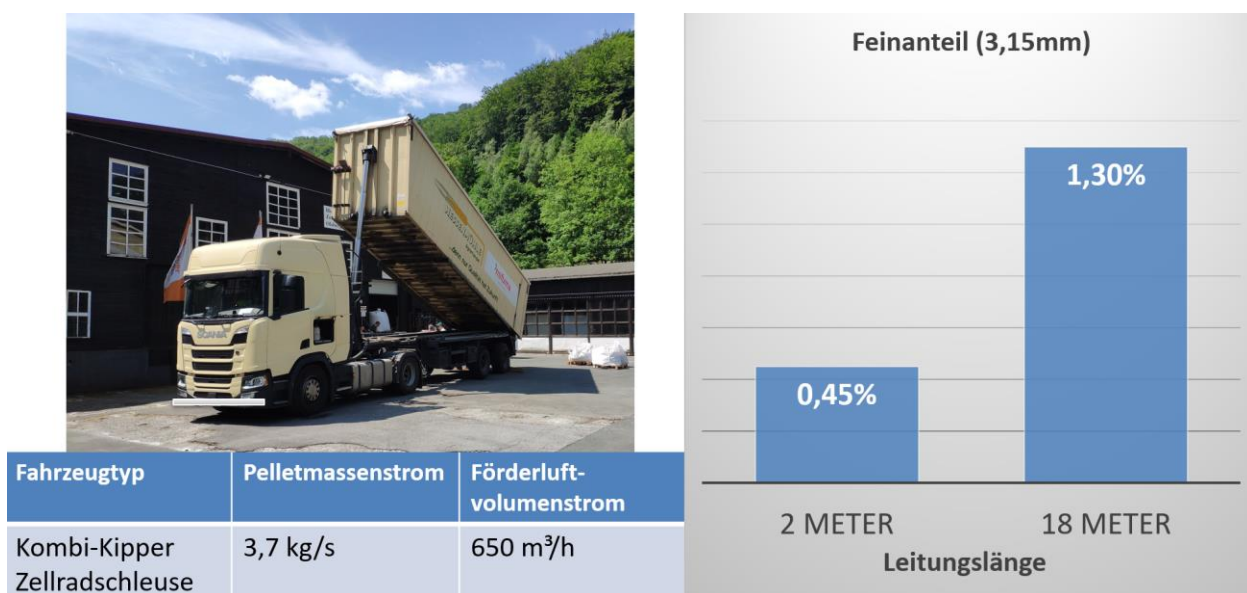


Abbildung 24: Untersuchung des Einflusses der Zerkleinerung durch Verwendung eines 18m Materialschlauchs (Fahrzeug mit Zellradschleuse)

Variation der Materialklappenstellung

Für die Untersuchung des Einflusses der Materialklappenstellung auf Zerkleinerungswirkung sowie den Pelletmassenstromes im Realbetrieb wurden die Daten der Silofahrzeuge gemittelt. An dieser Stelle sei gesagt, dass die Zerkleinerungswirkung der drei Silofahrzeuge bei jeweils gleicher Klappenöffnungsweite in einer ähnlichen Größenordnung zueinander liegt, die

beschriebenen Effekte sind daher allgemeingültig auf diesen Fahrzeugtyp bezogen. Da die Öffnungsweite je nach Hersteller unterschiedlich eingestellt wird, wurde in Absprache mit den Fahrzeugbedienern an jedem Fahrzeug eine Einstellung gewählt, die dem zu untersuchenden Öffnungswinkel am nächsten kommt. Eingeordnet wurde in die Kategorien kleine, mittlere und volle Öffnung der Materialklappe (ca. 35°, 65°, 80°). Die Ergebnisse für Versuche mit einem 18 m Materialschlauch sind in Abbildung 25) dargestellt. Der Pelletmassenstrom nimmt mit zunehmender Klappenöffnung zu und liegt mit aufsteigendem Öffnungswinkel bei ca. 1-2 kg/s (35 °), 2-6 kg/s (65 °), 5-8 kg/s (80 °). Grund für die große Spannweite des Massenstroms ist der im nachfolgenden erläuterte Einfluss der Silozuluft auf den Materialmassenstrom. Die hohe Zerkleinerung bei kleiner Materialklappenöffnung lässt sich dadurch erklären, dass die Holzpelletschüttung durch einen schmalen Spalt zwischen Materialklappe und Übergang in die Förderleitung fließen muss. Entsprechend werden prozentual gesehen mehr Pellets entlang der Klappe und der Leitungswand transportiert. Diese Partikel-Wand Interaktion wird durch ein weiteres Öffnen der Materialklappe von 65 ° bzw. 80 ° zunehmend reduziert, sodass die Pellets primär als voller Materialstrom in die Rohrleitung eintreten.

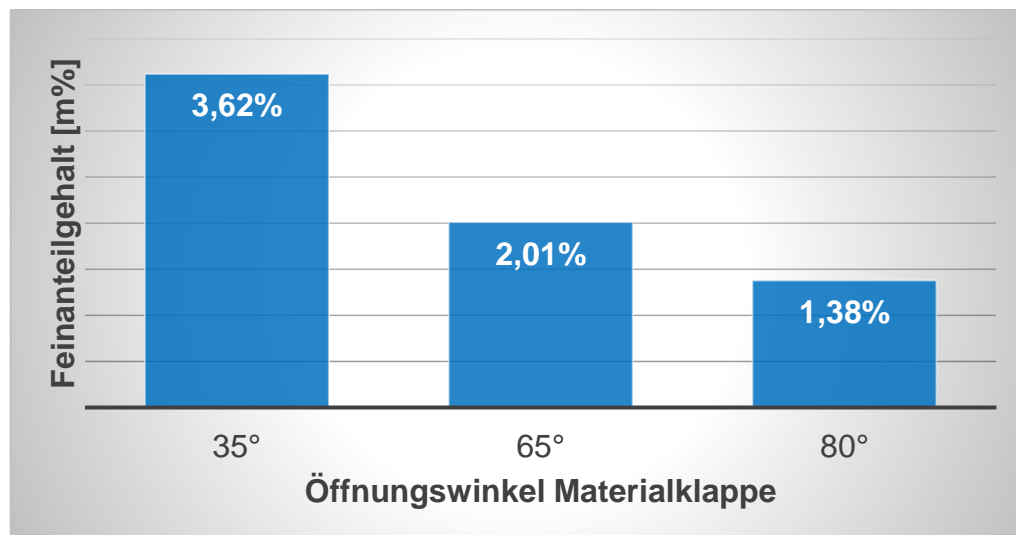


Abbildung 25: Feinanteilgehalt (3,15 mm) bei unterschiedlicher Materialklappenöffnung, 18 m Materialschlauch (Silofahrzeuge)

Variation der Luftaufteilung bei Silofahrzeugen mit Druckbehälter

Wie im Kapitel zu AP5 bereits beschrieben, teilt sich in den Silofahrzeugen der Gesamtvolumenstrom aus dem Kompressor typischerweise in zwei Luftströme auf. Ein Teil fließt als Silozuluft (Oberluft) in die Silokammer, während der andere Teil als Treibluft direkt in die pneumatische Förderleitung unterhalb der Silos geleitet wird. Über Absperrklappen kann die Aufteilung der Kompressorluft eingestellt werden. Primär wird die Silozuluft eingesetzt, da diese den Ausfluss der Pellets durch die Öffnung der Materialklappe begünstigt und somit einen höheren Massenstrom fördert. Die Treibluft wird als zusätzliche Maßnahme zum Beschleunigen der Holzpellets unterhalb der Materialklappe eingesetzt. Zudem lässt sich über die Treibluft auch indirekt die Beladung im Schlauch reduzieren, da bei Öffnung der Treibluftklappe zeitgleich weniger Luft in das Silo gefördert wird. Das Silo verfügt über Rückschlagventile, sodass eine Rückströmung von Luft aus dem Silobehälter unterbunden wird. Es wurden Versuche bei identischer Materialklappenstellung mit Variation der Luftaufteilung durchgeführt, um den Effekt der Oberluft auf die Entleerung des Silos zu quantifizieren. Der Einfluss auf den Materialaustrag ist in Abbildung 26 veranschaulicht. Die Messreihen stammen von einem einzelnen Silofahrzeug,

die beobachteten Effekte sind auf den beiden anderen untersuchten Fahrzeugen jedoch identisch. Die Austragsleitung bei den Versuchen betrug 2 m bis zum Fangsack. Bei voller Öffnung der Materialklappe und voller Öffnung der Treibluft wurde ein Pelletmassenstrom von 5,5 kg/s ermittelt. Durch das Verschließen der Treibluft strömt die Kompressorluft vollständig in Silokammer. Der Druck erhöhte sich in dieser Konfiguration von 1,1 auf 1,3 bar, der Pelletmassenstrom stieg auf 7,1 kg/s an. Eine Erhöhung der Kompressorleistung führte zu einer Druckerhöhung auf 1,4 bar in der Kompressorleitung, der Pelletmassenstrom betrug 9,5 kg/s.

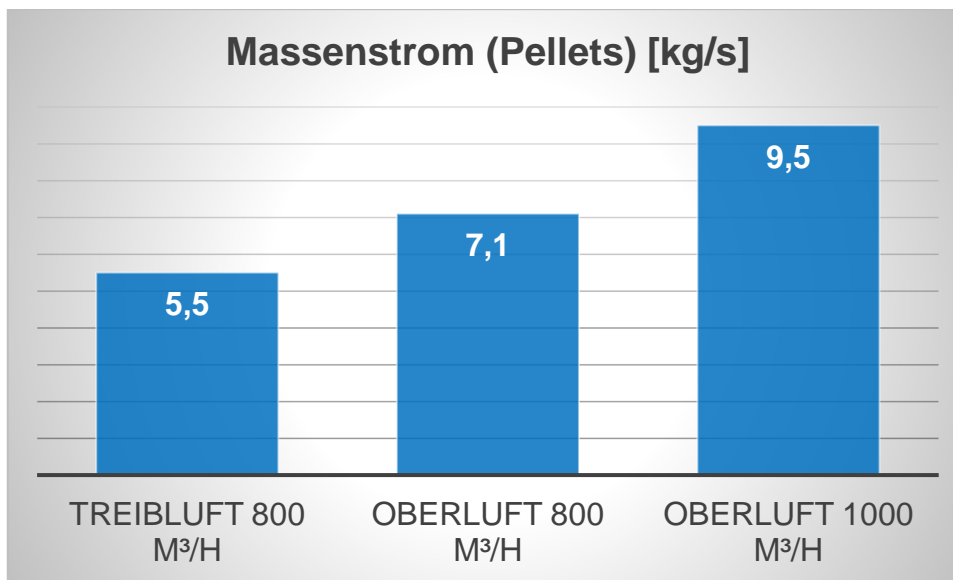


Abbildung 26: Einfluss auf den Massenstrom bei Variation der Luftzuführung und Förderluftmenge bei voll geöffneter Materialklappe für ein Silofahrzeug, Länge der Austragsleitung 2 m

Hinsichtlich der Zerkleinerung wurde in beiden Messreihen bei 800 m³/h ein Feinanteilgehalt von je 0,5 % ermittelt, im Falle der höheren Gebläseleistung mit 1000 m³/h verdoppelte sich der Feinanteil auf 1,1 % wie in Abbildung 27 zu sehen ist. Als Hauptursachen für Zerkleinerung bei den Silofahrzeugen lassen sich drei Quellen zusammenfassen: Zerkleinerung durch Quetschung im Bereich der Materialklappen, Abrieb der Pelletschüttung an den Rohr/Leitungswandungen und Zerkleinerung der Pellets aufgrund von Stößen durch Richtungsumlenkungen oder Aufprallvorgänge beim Einfangen im Fangsack. Für eine Leitungslänge von 2 m ohne Umlenkung scheint eine Erhöhung des Pelletmassenstroms durch die ausschließliche Nutzung von Oberluft keine signifikante Erhöhung von Feinanteil zu verursachen. Wird die Förderleistung der Oberluft erhöht, so nimmt auch der Druck in der Silokammer zu. Die Erhöhung des Feinanteils auf 1,1 % lässt sich zum einen auf größere Kräfte, die auf die Schüttung im Bereich der Klappe einwirken, zum anderen durch eine höhere Aufprallgeschwindigkeit der Pellets im Fangsack zurückzuführen sein. Bei geringeren Gebläseleistungen (450-750 m³/h) in den Fahrzeugversuchen sowie in den Modellstandversuchen (300-530m³/h) betrug die Flugbahn bei einer 2 m Leitungsstrecke 1-3 m. Nimmt die Förderluftmenge und Leitungslänge zu, so erhöht sich in den meisten Fällen abhängig vom pneumatischen Förderzustand (Flugförderung, Propfenförderung, Dünenförderung) auch die Partikelgeschwindigkeit zunehmend.

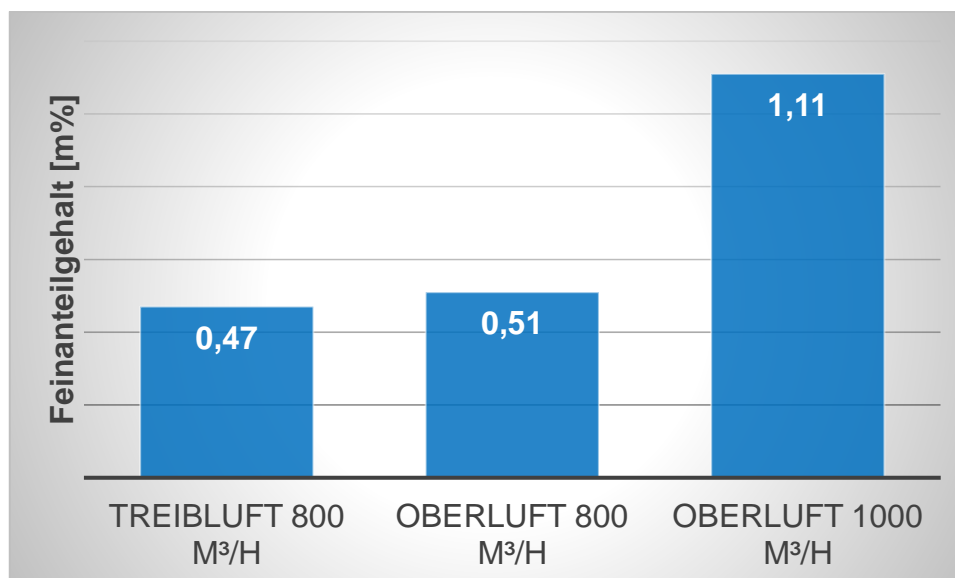


Abbildung 27: Einfluss auf den entstandenen Feinanteilgehalt bei Variation der Luftzuführung und Förderluftmenge bei voll geöffneter Materialklappe für ein Silofahrzeug, Länge der Austragsleitung 2 m

Für den Einfluss der Zerkleinerungswirkung bei realen Leitungslängen wurden zwei Versuche bei einer Materialklappenöffnung von 65 ° (praxisnaher Wert) mit einer 18 m Schlauchleitung, unter Variation der Treibluftklappenöffnung durchgeführt. Zudem wurden zwei Versuche mit einer geringen Klappenöffnung von 40 ° durchgeführt. Für die Auslieferungen wird bei den Silofahrzeugen primär mit der Silozuluft gearbeitet. Die Treibluft dient zum einen zum Entleeren der Materialleitung bei Auslieferungsende, zum anderen bietet sie eine Möglichkeit im Fall einer zu hohen Beladung im Materialschlauch die Luftmenge zu erhöhen, um einen Schlauchstopfer zu vermeiden. Aus diesem Grund wurde je ein Versuch mit verschlossener Treibluft (nur Silozuluft) und ein Versuch mit halb geöffneter Treibluftklappe durchgeführt. Die Leistung des Gebläses wird über die Drehzahl der Antriebswelle der Drehkolbenkompressoren eingestellt. Für die vier Versuche wurde die identische Drehzahl (750 U/min) eingestellt. Aufgrund des geringeren Stömungswiderstands bei halb geöffneter Treibluftklappe stellte sich in diesem Fall ein Überdruck von ca. 0,55 bar, (Volumenstrom 550 m³/h) bei ausschließlicher Durchströmung des Silos (Treibluft zu) ein Überdruck von ca. 0,65 bar (Volumenstrom 500 m³/h) ein. Der geringere Volumenstrom resultiert aus der Charakteristik des Drehkolbenkompressors, bei zunehmenden Gegendruck nimmt die Förderleistung entsprechend ab. Der in den Versuchen ermittelte Massenstrom ist in Abbildung 28 dargestellt. Wie auch bereits in den Versuchen mit der 2 m langen Rohrleitung und einer vollgeöffneten Materialklappe führt eine ausschließliche Nutzung der Oberluft bei einer Klappenöffnung von 65 ° zu einer Erhöhung des Pelletmassenstroms von 6 kg/s auf ca. 7 kg/s. Im Falle der mit 40 ° geringfügig geöffneten Materialklappe wurde keine signifikante Erhöhung des Massenstroms durch 100 % Oberluft erreicht.

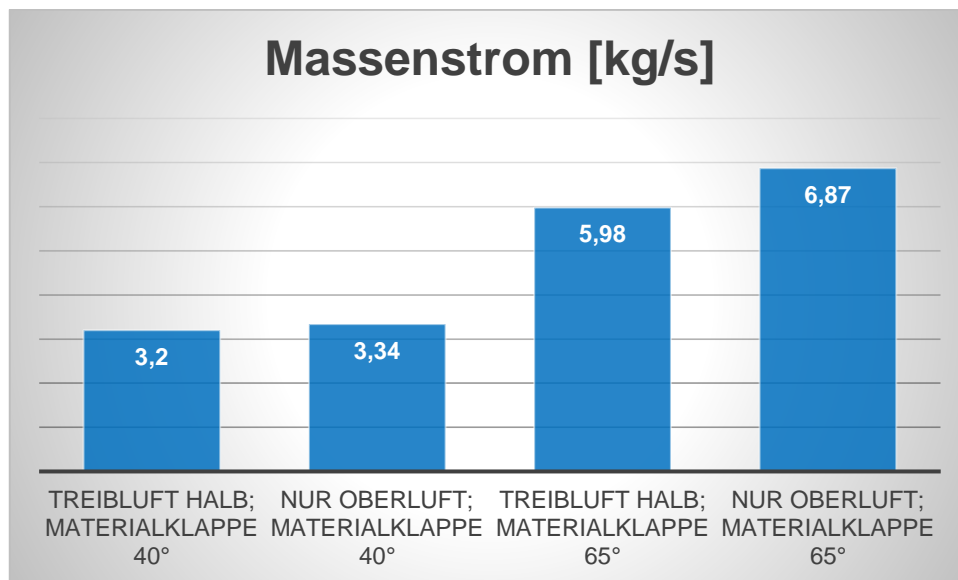


Abbildung 28: Resultierender Massenstrom bei Variation der Luftzuleitung in einem Silofahrzeug. Öffnung der Materialklappe 65°, Leitungslänge 18 m, Überdruck 0,55-0,65 bar, Drehzahl Nebenantrieb/Kompressor: 750 U/min

Eine Betrachtung des gebildeten Feinanteils bei den jeweiligen Konfigurationen in Abbildung 29 liefert weitere Erkenntnisse. Die größte Zerkleinerung tritt bei einer ausschließlichen Verwendung der Oberluft bei gleichzeitig geringer Klappenöffnung auf. Eine mögliche Ursache sind auch hier die Partikel-Wand Interaktionen im Bereich der Materialklappe, die in Kombination mit dem höheren Druck und größeren Luftvolumenstrom im Silo bei 100 % Oberluft bei höheren Geschwindigkeiten stattfinden. Die geringste Zerkleinerung findet wiederum bei 65° Klappenöffnung und 100 % Oberluft statt. Daraus lässt sich schließen, dass die Verwendung von viel Silozuluft (mit zeitgleich zunehmenden Silodruck) nicht als kritisch zu betrachten ist, sofern die Materialklappenöffnung ausreichend groß (> 65°) gewählt wird. In dem untersuchten Szenario ist die Partikelgeschwindigkeit der Pellets beim Eintreffen in den Fangsack (in der Praxis das Kundensilo) am geringsten, da das Verhältnis vom Schüttgut zu Förderluftmenge (Beladung) hoch ist. Die Kombination aus geringer Zerkleinerung durch Aufprall und geringer Partikel-Wand Interaktion (weit geöffnet) könnten hier die Ursache sein.

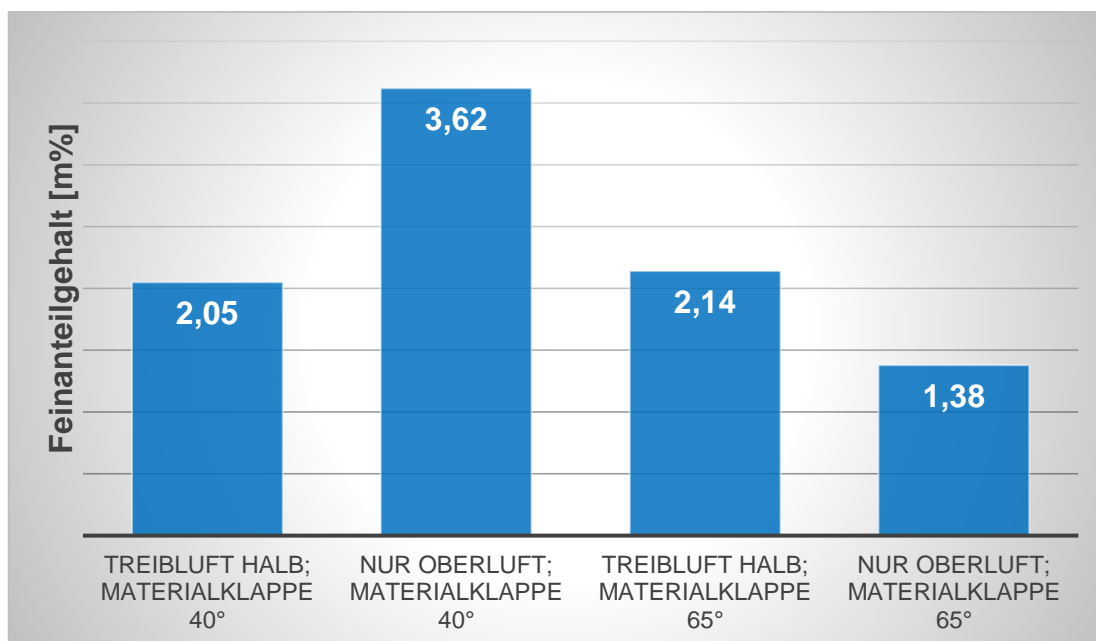


Abbildung 29: Resultierender Feinanteil bei Variation der Luftzuleitung in einem Silofahrzeug. Öffnung der Materialklappe 65°, Leitungslänge 18 m, Überdruck 0,55-0,65 bar, Drehzahl Nebenantrieb/Kompressor: 750 U/min

Aus den Erkenntnissen dieser Untersuchung lässt sich schlussfolgern, dass eine schnelle Auslieferung durch Silofahrzeuge bei gleichzeitig geringer Zerkleinerung insbesondere dann erzielen lässt, wenn die Materialklappe ausreichend weit geöffnet wird. Dann ist es förderlich hauptsächlich mit Silozuluft zu arbeiten, um das Silo zu entleeren. Für die Variation des Pelletmassenstroms ist es ratsamer, anstatt die Materialklappe auf eine geringe Klappenöffnung zu stellen zunächst die Gesamtleistung des Kompressors über den Nebenantrieb zu reduzieren. Eine Kombination aus viel Silozuluft bei geringer Klappenöffnung sollte vermieden werden. In den Versuchen hat sich gezeigt, dass eine hohe Beladung aufgrund der geringeren Partikelgeschwindigkeit zu einer geringeren Zerkleinerung führt.

Vergleich der Volumenströme bei den unterschiedlichen Fahrzeugtypen

Bei allen Versuchen wurden Messreihen des Gesamtvolumenstroms am Kompressor Ausgang durchgeführt. Beide Fahrzeugtypen nutzen Drehkolbenkompressoren, jedoch zeigen sich unterschiedliche Beobachtungen hinsichtlich des Volumenstroms während des Betriebs.

Bei den Silofahrzeugen mit Druckkammer bleibt der Förderluftvolumenstrom beim Öffnen der Klappen weitgehend konstant. Dies führt zu einer gleichmäßigeren Förderung und einen stabilen Druck in der pneumatischen Förderleitung. Im Gegensatz dazu zeigen Lieferfahrzeuge mit Zellradschleuse starke Schwankungen im Volumenstrom. Im Leerlauf, also ohne Betrieb der Zellradschleuse, beträgt der Volumenstrom in einer Beispielmessung 900 m³/h. Sobald jedoch die Zellradschleuse eingeschaltet wird und Pellets in die Leitung gelangen, bricht der Volumenstrom auf etwa 700 m³/h ein und schwankt jede Sekunde um ±50 m³/h, wie in Abbildung 30 zu sehen ist. Der Überdruck lokal zwischen Zellradschleuse und Kompressor steigt von 0,2 bar auf 0,7 bar.

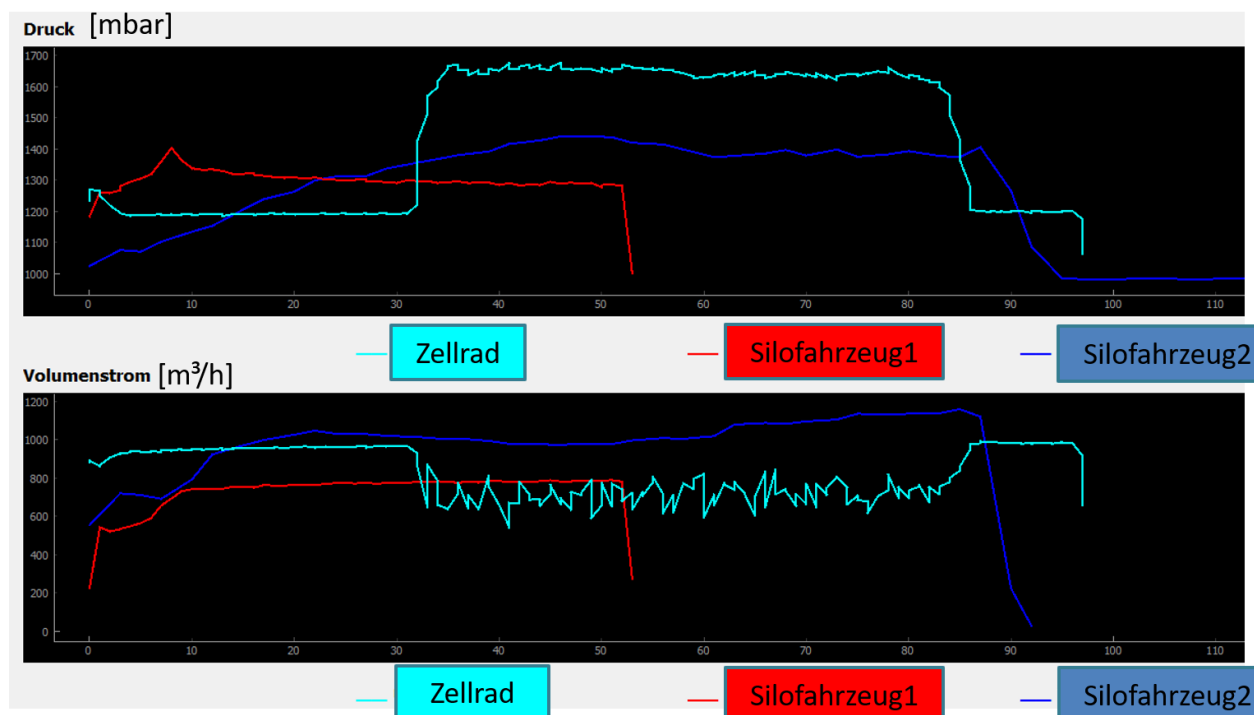


Abbildung 30: Verlauf von Druck und Volumenstrom bei zwei Silofahrzeugen (rot, blau), sowie einem Fahrzeug mit Zellradschleuse (türkis)

Diese Schwankungen lassen sich durch die Druckstöße erklären, die beim Betrieb der Zellradschleuse auftreten. Die Zellradschleuse führt in Intervallen Schüttgut in die pneumatische Förderleitung ein. Jeder Durchgang von Pellets durch die Zellen verursacht einen temporären Anstieg des Drucks, gefolgt von einem Abfall, wenn die Zellen sich wieder leeren. Diese zyklischen Druckstöße führen zu den beobachteten Schwankungen im Volumenstrom. Der Wechsel zwischen dem Einlassen von Pellets und den Zwischenphasen, in denen weniger oder keine Pellets transportiert werden, erzeugt ein ungleichmäßiges Förderprofil, das sich als Volumenstromschwankungen äußert.

Bei Verlängerung der pneumatischen Leitung von 2 m auf 18 m halbiert sich der Volumenstrom beim Zellradsystem, da der erhöhte Strömungswiderstand den Druckverlust entlang der Leitung und somit den Gegendruck für den Kompressor erhöht. Dies führt zu einer weiteren Reduktion des Volumenstroms. Der Zusammenhang zwischen Leitungswiderstand und Gegendruck ist proportional zur Länge und Beladung der Leitung. Die Schwankungen im Volumenstrom bei Lieferfahrzeugen mit Zellradschleuse sind plausibel und lassen sich auf die periodischen Druckstöße durch die intermittierende Förderung der Holzpellets zurückführen. Diese Effekte sind konsistent mit den physikalischen Prinzipien der Druckverlustberechnung in pneumatischen Fördersystemen. Bei den Silofahrzeugen mit Druckkammer fällt bei Erhöhung der Förderleitungslänge der Volumenstrom zwar ebenfalls ab, jedoch typischerweise lediglich um ca. 20 %, da die komprimierte Luft im Silotank beim Öffnen der Materialklappe entweicht und einen Puffer bildet. Der effektive Volumenstrom ist bei Silofahrzeugen mit Druckkammer entsprechend typischerweise höher als bei Fahrzeugen ohne Druckkammer.

Variation von Parametern der Zellradschleuse

Für das Lieferfahrzeug mit Zellradschleuse und Querförderschnecke wurden ebenfalls Versuche mit Parametervariationen durchgeführt. Es gibt drei direkte Stellgrößen, die den Materialaustrag beeinflussen. Die Drehzahl der Zellradschleuse sowie die Drehzahl der Querförderschnecke können variiert werden. Dies erfolgt über ein Durchflussventil für die hydraulischen Zuleitungen zu den jeweiligen Antrieben der Komponenten. In der Praxis wählt der Fahrzeugführer die Drehzahl der Zellradschleuse abhängig vom geladenen Schüttgut. Neben Holzpellets wird mit diesem Fahrzeugtyp insbesondere auch Tierfutter und Getreideerzeugnisse ausgeliefert. Da auf den meisten Fahrzeugen kein Drehzahlgeber vorhanden ist, wird durch Erfahrung und Augenmaß eingestellt. Durch Vorversuche und anhand eines externen Messgeräts wurde die von dem Fahrer typisch eingestellte Drehzahl für eine Auslieferung von Holzpellets auf 50 U/min bestimmt. Zur Gewährleistung identischer Betriebszustände wurde in den Versuchen die Drehzahl immer unter Verwendung eines Messgeräts eingestellt. Während der Auslieferung wird die Drehzahl nicht weiter variiert, vielmehr wird der oberhalb der Zellradschleuse befindliche Sperrschieber (vgl. Abbildung 13) genutzt, um die Menge an Pellets, die in die Schleuse gelangt, zu regulieren. Die Querförderschnecke, mit gegenläufig gestalteten Wendeln, führt bei einer Drehung zur Förderung von Schüttgut von den Seiten der Ladefläche in Richtung Mitte, hin zur Zellradschleuse. Im Falle von Holzpellets ist das Rieselvermögen ausreichend, um beim Entleeren der Ladefläche zunächst ausschließlich mit der Kippfunktion der Ladefläche zu arbeiten. Erst wenn sich links und rechts die restlichen Pellets ansammeln und nicht mehr Richtung Mitte nachrieseln wird die Querförderschnecke angeschaltet, sodass eine vollständige Entleerung erfolgt. Aus diesem Grund wurde die Querförderschnecke in den Fahrzeugversuchen erst bei den letzten vier Versuchen eingeschaltet. Die Drehzahl der Querförderschnecke beträgt bei einer Auslieferung von Pellets 40 U/min. Ein Test zeigte, dass sich bei Bedarf bis zu 130 U/min einstellen lassen. Die Geschwindigkeit und die Entscheidung, ob die Querförderschnecke auch bei noch voller Ladefläche eingesetzt werden muss, hängt ebenfalls stark vom Schüttgut ab. Bei feinkörnigen Gütern wie Mehl kommt es sehr schnell zu der Bildung von Feststoffbrücken, hier ist der Einsatz der Querförderschnecke stets erforderlich, da ohne eine Störung im Schüttbett kein Materialabtransport möglich wäre.

Es wurden mehrere Versuche mit 2 m Rohr und 18 m Materialschlauch durchgeführt, um zum einen die Zerkleinerungswirkung möglichst komponentenspezifisch (2 m), zum anderen möglichst praxisnah (18 m) zu untersuchen.

Für eine Untersuchung des Einflusses der Förderluftmenge auf den Pelletmassenstrom sowie die Zerkleinerung wurden je zwei Versuche bei gleicher Drehzahl (50, 93 U/min) und Sperrschieberöffnung (75% geöffnet), aber unterschiedlicher Kompressordrehzahl durchgeführt. Die Betriebsdaten sind in Tabelle 2 aufgeführt, der Massenstrom ist in Abbildung 31, der Feinanteil in Abbildung 32 dargestellt. Bei einem Vergleich der Versuche ID 3 und ID S3 fällt auf, dass der effektive Pelletmassenstrom ähnlich groß, der Volumenstrom der Förderluft jedoch im Falle von ID 3 mit 600 m³/h um ca. 130 m³/h geringer ausfällt. Der Materialschieber ist in allen in Tabelle 2 aufgeführten Versuchen zu 75 % geöffnet. Die Kompressordrehzahl ist in beiden Fällen identisch mit 850 U/min. Die Erklärung dieses Verhaltens liefert eine genauere Betrachtung der Vorgänge im Ein- und Austritt am Zellrad. Bei einer geringeren Drehzahl von 50 U/min ist die Füllung der Zellen größer, da mehr Zeit zur Verfügung steht, während der Pellets in die Zellen fallen. Gemäß der Charakteristik des Kompressors sinkt die Förderluftmenge bei größerem Strömungswiderstand. Der ähnlich hohe Massenstrom bei unterschiedlicher Zellraddrehzahl lässt sich durch zwei gegenläufige Effekte erklären. Bei einer höheren Drehzahl von 93 U/min bleibt

weniger Zeit zum Befüllen der Zellen, was zu einem geringeren Füllgrad führt. Bei 50 U/min werden die Zellen seltener geleert, aber jede Zelle ist dichter gepackt und enthält mehr Pellets. Bei 93 U/min werden die Zellen häufiger geleert, aber jede Zelle enthält weniger Pellets.

Tabelle 2: Auflistung der Betriebsparameter für Versuche am Zellradsystem zur Untersuchung des Massenstromes und der Zerkleinerung abhängig von der Förderleistung des Kompressors

ID	Zellrad Drehzahl	Kompressor Drehzahl	Volumenstrom (gemessen)	Leitungslänge
3	50 U/min	850 U/min	600 [m ³ /h]	2 m
4	50 U/min	950 U/min	722 [m ³ /h]	2 m
S3	93 U/min	850 U/min	732 [m ³ /h]	2 m
5	93 U/min	950 U/min	750 [m ³ /h]	2 m

Hinzu kommt, dass bei 50 U/min die Zellen nicht vollständig entleert werden können. Dies zeigt sich bei Betrachtung der Messreihe ID 4 in Abbildung 31. Bei Erhöhung der Kompressorleistung steigt der Pelletmassenstrom stark an, von 5,59 kg/s auf 9,8 kg/s. Aufgrund der größeren Förderluftmenge und des höheren Drucks werden die Zellen dann vollständig geleert. Die längere Verweildauer der Pellets in der Zellradschleuse und der höhere Strömungswiderstand führen bei zu geringer Kompressorleistung also dazu, dass nicht alle Pellets aus der Zelle herausgeblasen werden. Dies führt dazu, dass sich mehr Feinanteil bildet, da die Pellets durch das wiederholte Befüllen und teilweise Entleeren stärker beansprucht werden und zerbrechen. Dies ist eine mögliche Erklärung für den geringfügig höheren Feinanteilgehalt beim Vergleich der Versuche ID 3 und ID S3 in Abbildung 32. Der höhere Befüllgrad bei 50 U/min und die unvollständige Entleerung führen dazu, dass zwar weniger Pellets pro Durchgang gefördert werden, aber die höhere Effizienz bei der Befüllung und die teilweise Entleerung gleichen dies aus. Bei 93 U/min werden die Zellen häufiger und vollständiger entleert, sodass der Massenstrom durch die höhere Entleerungsfrequenz ausgeglichen wird. Der höhere Füllgrad bei 50 U/min erhöht den Strömungswiderstand, was den Volumenstrom reduziert. Bei 93 U/min ist der Strömungswiderstand niedriger, da die Zellen weniger gefüllt sind, was einen höheren Volumenstrom ermöglicht.

Zusammengefasst bleibt der Massenstrom der geförderten Pellets bei unterschiedlichen Drehzahlen der Zellradschleuse nahezu gleich, da sich die Effekte von Füllgrad, Entleerungsfrequenz und unvollständiger Entleerung bei 50 U/min sowie die vollständiger Entleerung bei 93 U/min gegenseitig ausgleichen. Der Unterschied im Volumenstrom lässt sich durch den unterschiedlichen Strömungswiderstand erklären, der bei höherer Befüllung und geringerer Drehzahl größer ist. Eine Erhöhung der Kompressorleistung bei konstanter Drehzahl von 93 U/min (vgl. ID S3 und ID 5) führt ebenfalls zu einer leichten Erhöhung von Volumen und Pelletmassenstrom, jedoch im geringeren Maße im Vergleich zu den bei 50 U/min durchgeführten Versuchen. Es ist davon auszugehen, dass die Förderleistung des Kompressors bei einer Betriebsdrehzahl von 850 U/min in beiden Fällen ungenügend für eine vollständige Entleerung der Zellen ist. Während die Zerkleinerung bei den Versuchen ID 3, ID 4 und ID S3 auf einem ähnlichen Niveau liegt, liegt bei Versuch ID 5 eine geringfügig höhere Zerkleinerung vor.

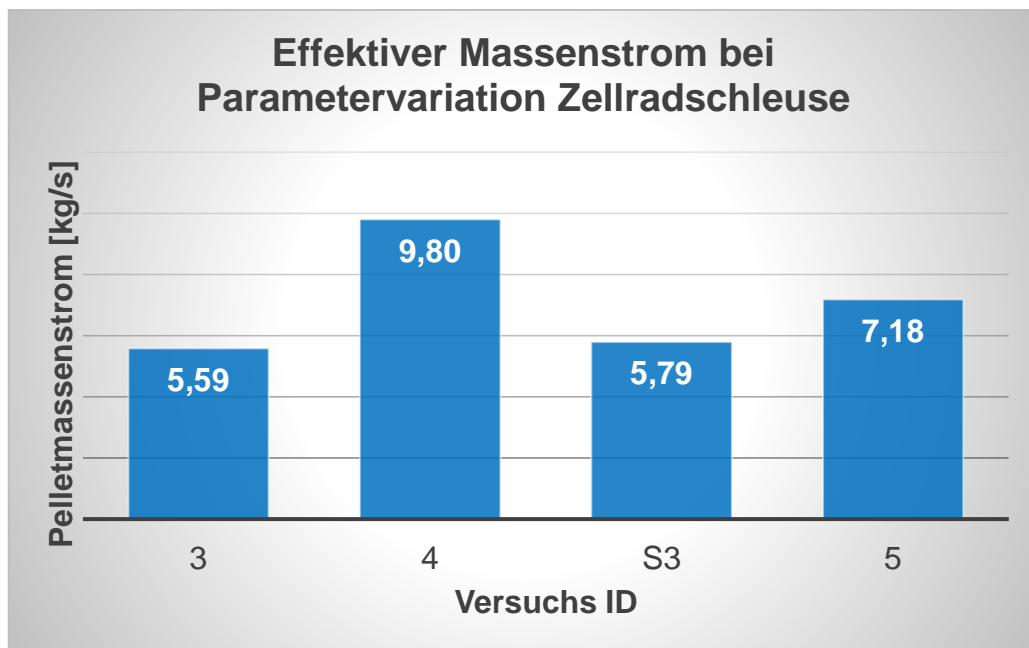


Abbildung 31: Ermittelter Massenstrom abhängig von der Förderleistung des Kompressors bei Versuchen mit einem Lieferfahrzeug mit Zellradsystem

Die Beobachtung, dass der Feinanteilgehalt bei höherer Kompressorleistung zunimmt, lässt sich durch die Intensität der Druckstöße und deren Auswirkungen auf die Pellets erklären (vgl. Abbildung 30). Bei höherer Kompressorleistung sind die Druckstöße stärker, was zu stärkeren Beschleunigungen der Pellets führt. Diese intensiven und kurzfristigen Beschleunigungen verursachen keine signifikante Zerkleinerung durch die Druckstöße selbst, sondern durch die resultierenden Kollisionen.

In einem Szenario mit einer sehr kurzen Förderleitung kommt es nicht zu einer Vergleichmäßigung der Partikel- und Luftgeschwindigkeit, bevor die Pellets auf Hindernisse wie Umlenkungen oder das Ende des Silos treffen. Diese ungleichmäßigen Geschwindigkeiten führen zu Kollisionen, die eine erhöhte Zerkleinerung der Pellets verursachen können.

Daher ist es wichtig, dass bei der Verwendung von Zellradschleusen keine Umlenkungen direkt in der Nähe des Austritts der Zellradschleuse verbaut werden. Stattdessen sollte zunächst eine möglichst gerade Strecke verlegt werden, um die Partikelgeschwindigkeit und die Luftgeschwindigkeit zu vergleichmäßigen. Dies reduziert die Kollisionen und damit die mechanische Belastung der Pellets, wodurch die Zerkleinerung minimiert wird.

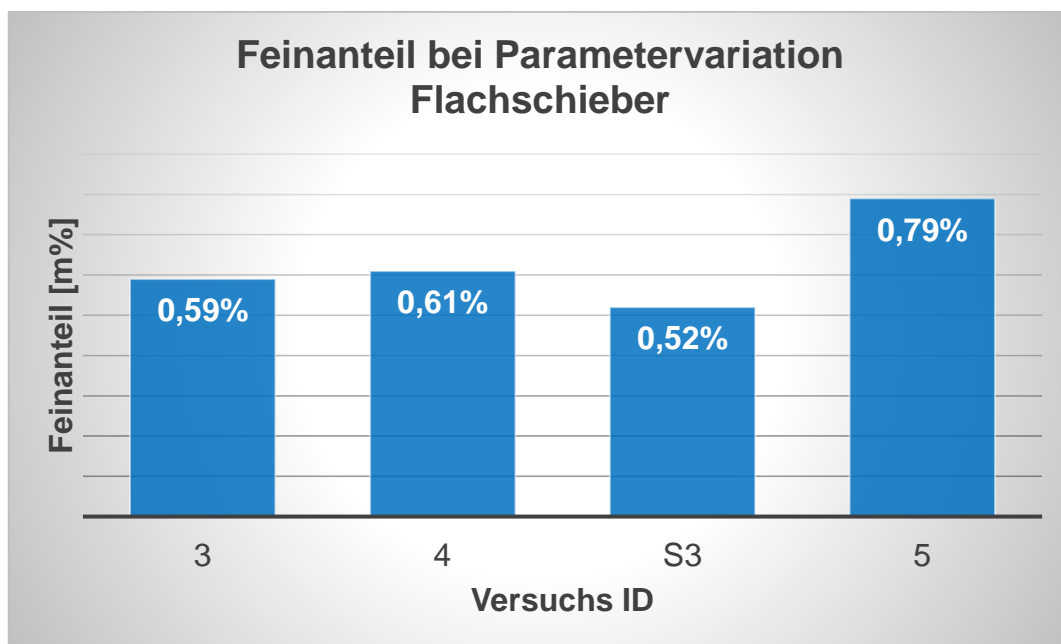


Abbildung 32: Ermittelter Feinanteilgehalt abhängig von der Förderleistung des Kompressors bei Versuchen mit einem Lieferfahrzeug mit Zellradsystem

Wie aus den obenstehenden Versuchen ersichtlich wird, hat der Befüllgrad der Zellradschleuse bei ähnlicher Kompressorleistung einen signifikanten Einfluss auf das Förderverhalten. Um diesen Aspekt weiter zu untersuchen, wurden Messreihen mit einer praxisnahen Leitungslänge von 18 m Materialschlauch durchgeführt. Dieses Mal wurde ausschließlich die Öffnungsweite des Sperrschiebers/Flachschiebers zwischen Ladefläche und Zellradschleuse (vgl. Abbildung 13) variiert. Die Messdaten sind in Tabelle 3 aufgelistet, die Drehzahl der Zellradschleuse betrug bei den Versuchen ID 6-8 stets 50 U/min. Die Kompressorleistung wurde bei 25% Schieberöffnung auf 850 U/min eingestellt, während sie bei 50% und 75% Öffnung auf 900 U/min erhöht wurde. Diese Anpassung war notwendig, um einen Schlauchstopfer zu verhindern, da der Materialschlauch bei den Versuchen mit 50% und 75% Öffnung stark beladen war, und ein Schlauchstopfer verhindert werden sollte. Die Ergebnisse für den Pelletmassenstrom sind in Abbildung 33 und der ermittelte Feinanteil aus den Versuchen ist in Abbildung 34 dargestellt.

Tabelle 3: Auflistung der Betriebsparameter für Versuche am Zellradsystem zur Untersuchung des Massenstromes und der Zerkleinerung Abhängig von der Öffnungsweite des Flachschiebers oberhalb der Zellradschleuse. Drehzahl der Zellradschleuse konstant bei 50 U/min

ID	Flachschieber	Kompressor Drehzahl	Volumenstrom	Leitungslänge
6	25% geöffnet	850 U/min	624 m ³ /h	18 m
7	50% geöffnet	900 U/min	450 m ³ /h	18 m
8	75% geöffnet	900 U/min	350 m ³ /h	18 m

Der Rückgang des Volumenstroms bei zunehmender Schieberöffnung ist auf den steigenden Gegendruck zurückzuführen, gegen den der Kompressor arbeiten muss. Der Überdruck lag bei den Versuchen mit 25% und 50% Öffnung bei etwa 0,5 bis 1 bar, während er bei 75% Öffnung

auf 1,5 bar anstieg. Dies erklärt, warum der Volumenstrom bei größerer Öffnung des Flachschiebers abnimmt.

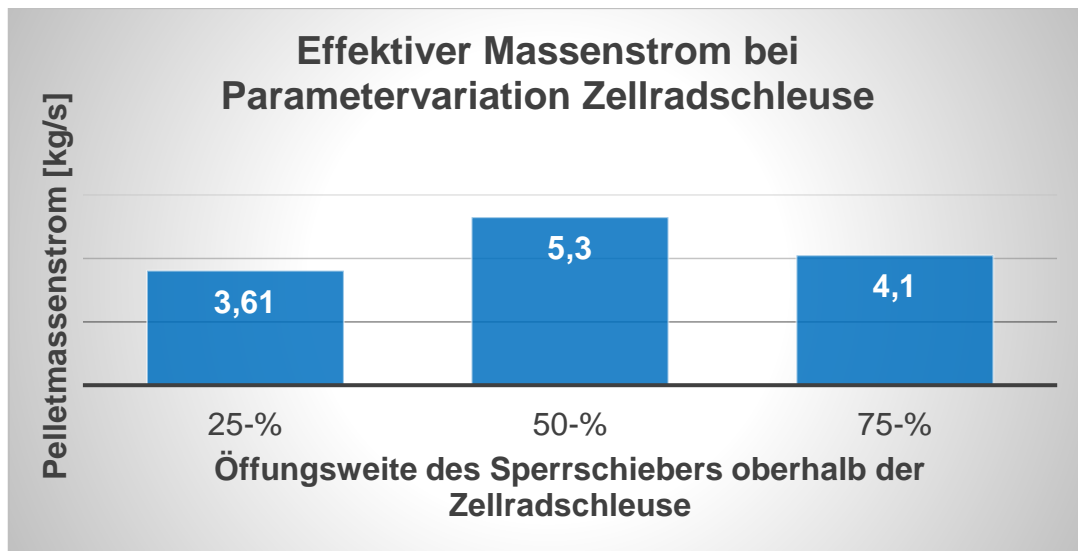


Abbildung 33: Effektiver Pelletmassenstrom bei Variation der Öffnungsweite des Sperrschiebers oberhalb der Zellradschleuse. Drehzahl Zellradschleuse: 50 U/min

Die Zunahme des Massenstroms bei 50% Öffnung im Vergleich zu 25% lässt sich dadurch erklären, dass mehr Pellets in die Zellradschleuse gelangen können, was durch die erhöhte Öffnung des Flachschiebers ermöglicht wird. Auch die leicht erhöhte Kompressordrehzahl bei 50% Öffnung trägt dazu bei, dass die Zellen weiter geleert werden können. Der Rückgang des Massenstroms bei 75% Öffnung hingegen ist auf die Kombination aus stark beladenen Zellen und dem hohen Gegendruck zurückzuführen, der zu einem erheblichen Absinken des Volumenstroms führt und die Zellen nicht effizient geleert werden können.

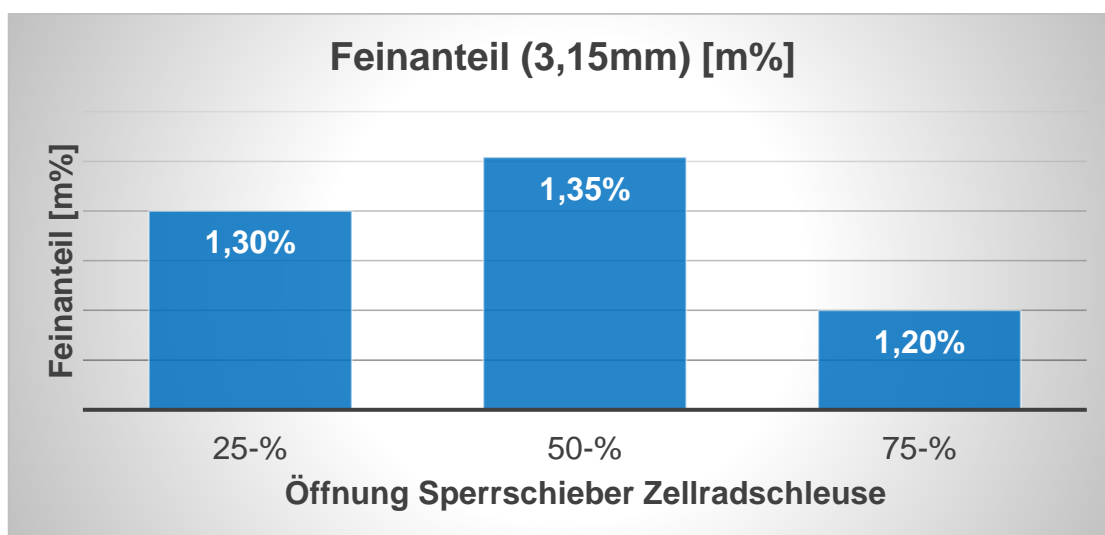


Abbildung 34: Ermittelter Feinanteilgehalt bei Variation der Öffnungsweite des Sperrschiebers oberhalb der Zellradschleuse. Drehzahl Zellradschleuse: 50 U/min

Der Feinanteilgehalt zeigt bei 25% und 50% Öffnung höhere Werte als bei 75% Öffnung, was durch verschiedene Faktoren erklärt werden kann. Bei 25% Öffnung beträgt der Feinanteilgehalt

1,3 m%, und bei 50% Öffnung liegt er bei 1,35 m%. Im Vergleich dazu sinkt der Feinanteilgehalt bei 75% Öffnung auf 1,2 m%.

Der geringere Feinanteil bei 75% Öffnung ist hauptsächlich auf die niedrigeren Partikelgeschwindigkeiten zurückzuführen, die durch den niedrigeren Volumenstrom verursacht werden. Ein niedriger Volumenstrom führt dazu, dass die Pellets langsamer durch den Schlauch gefördert werden, was die mechanische Beanspruchung und damit die Zerkleinerung reduziert. Allerdings sind solche Betriebszustände nicht praxisnah, da die Gefahr eines Schlauchstopfers besteht und daher vermieden wird. Wenn der Schlauch verstopft, muss er freigeblasen werden, was einen hohen Druck und großen Volumenstrom erfordert. Sollte sich der Schlauch nicht freiblasen lassen, müssten die Schläuche manuell entleert werden, was einen großen Aufwand bedeutet und bei einer Auslieferung nicht vorkommen sollte.

Bei 25% und 50% Öffnung hingegen ist die mechanische Belastung der Pellets höher, was zu einem höheren Feinanteil führt. Bei 25% Öffnung gelangen nicht genügend Pellets in die Zellradschleuse, wodurch die Pellets stärker beansprucht werden. Die leicht erhöhte Kompressordrehzahl bei 50% Öffnung trägt ebenfalls zur intensiveren Entleerung der Zellen bei, was zu einer höheren mechanischen Beanspruchung und somit zu mehr Feinanteil führt.

Ergänzend zu dem Versuch S 3 (Zellrad 93 U/min) (s. Tabelle 2) wurde zusätzlich ein Versuch bei einer Sperrschieberöffnung von 25 % und sonst gleichen Parametern durchgeführt (Versuch S 2). Der Pelletmassenstrom sank von 5,79 kg auf 2,87 kg/s, während sich der Feinanteilgehalt von 0,52 m% durch die Reduktion der Sperrschieberöffnung von 75 % auf 1,02 m% erhöhte. Die Kombination einer hohen Zellraddrehzahl mit einer geringen Öffnungsweite des Sperrschiebers führt somit ebenfalls zu einer starken Zerkleinerung.

Bei einer kleineren Schieberöffnung gelangen die Pellets langsamer in die Zellradschleuse, da sie sich im Bereich der Spaltöffnung gegenseitig hemmen. Durch die geringere Geschwindigkeit der Pellets erhöht sich die Wahrscheinlichkeit, dass sie durch die Drehung der Zellradschleuse abgeschert werden. Daher nimmt die relative Zerkleinerung bei kleinerer Schieberöffnung zu, da mehr Pellets durch die rotierende Zellradschleuse mechanisch beansprucht werden. Die Drehzahl der Zellradschleuse und die Öffnungsweite des Flachschiebers sollten somit sorgfältig aufeinander abgestimmt sein, um eine unerwünschte Zerkleinerung der Pellets zu vermeiden.

Einsatz der Querförderschnecke zur Beschickung der Zellradschleuse

Die in Abbildung 13 dargestellt Querförderschnecke wird bei Holzpellets typischerweise erst dann eingeschaltet, wenn die Schüttung bei geringem Füllstand auf der Lagerfläche nicht mehr in den mittig befindlichen Schacht zur Zellradschleuse rieselt. Für eine Beurteilung der Zerkleinerungswirkung wurden zwei Versuche, ID 7 und ID 12 durchgeführt. Beide Versuche wurden bei identischen Parametern (Drehzahl Zellrad 50 U/min, Flachschieber 50% geöffnet) durchgeführt. Im Fall von Versuchs ID 12 wurde zusätzlich die Querförderschnecke bei einer Drehzahl von ca. 60 U/min hinzugeschaltet. Vor dem Versuch mit der Förderschnecke wurde diese bereits für 3 Minuten betrieben und der aufgrund von Entmischung angesammelte Feinanteil im Trog abtransportiert, um einen Fehler durch im Vorfeld erzeugtes Holzmehl auszuschließen. Der ermittelte Feinanteil für Versuchs ID 7 (ohne Förderschnecke) beträgt 1,35 m%. Durch die Hinzuschaltung der Förderschnecke erhöhte sich der Feinanteilgehalt um einen Prozentpunkt auf 2,33 m%. In den in AP 5 durchgeführten Versuchen konnte im Schnecken-trog bei Betrieb der Förderschnecke eine starke Feinanteilbildung beobachtet werden. Diese trat insbesondere dann auf, wenn das Spaltmaß zwischen Schneckenwendel und

Behälterwand bei 3-6 mm liegt (Pelletdurchmesser 6 mm), in diesem Fall werden Pellets in den Spalt gezogen und teilweise zerquetscht.

Vergleich der Zerkleinerung bei den unterschiedlichen Fahrzeugtypen

Aufgrund der unterschiedlichen Konzepte der beiden zu vergleichenden Austragssysteme, Silofahrzeug und Fahrzeug mit Zellradschleuse, wurden im Vorfeld der Versuchsplanung Förderzustände definiert, wie beispielweise „hohe Austragskapazität“ oder „hoher Volumenstrom“. Je nach System wurden dann die Parameter ausgewählt. Für den Versuch ID 1 wurde beispielsweise der Betriebszustand „wenig Materialaustrag, wenig Förderluft“ angestrebt. Bei den Silofahrzeugen wurde dies erzielt, indem die Drehzahl des Kompressors auf einen in der Praxis sehr niedrigen Wert von 600 U/min eingestellt wurde. Es wurde kein Vordruck in der Silokammer aufgebaut, die Klappenstellung für die Luftaufteilung wurde auf 50 % Silozuluft, 50 % Treibluft eingestellt, die Materialklappe wurde in den Fahrzeugen zur Hälfte geöffnet. Im Falle des Fahrzeugs mit Zellradschleuse wurde ebenfalls eine in der Praxis niedrige Kompressordrehzahl gewählt (650 U/min), die Drehzahl der Zellradschleuse wurde auf 28 U/min eingestellt, und der oberhalb der Zellradschleuse befindliche Flachschieber wurde auf 25 % Öffnungsweite eingestellt. Die Länge der Förderleitung betrug 2 m. Wie die Auswertung der Messergebnisse zeigte, wurde bei allen vier Fahrzeugen ein ähnlicher Volumenstrom von 600-700 m³/h, ebenso wie ein ähnlicher Leitungsdruck von 0,05-0,1 bar Überdruck erzielt. Der Pellet-Massenstrom betrug bei zwei der teilnehmenden Silofahrzeuge ca. 2 kg/s, bei einem weiteren Silofahrzeug und dem Fahrzeug mit Zellradschleuse ca. 3,8 kg/s. Der resultierende Pelletmassen- und Luftvolumenstrom lag für alle Fahrzeuge somit für die gleiche Versuchs ID in einem ähnlichen Bereich, aufgrund der verschiedenen beschriebenen Einflüsse (Einfluss Silozuluft auf Massenstrom, geringerer Volumenstrom bei hoher Beladung der Zellradschleuse) kam es aber zu Abweichungen. Die Versuchsreihen ID 1-ID 11 bieten somit einen Ansatz für den Vergleich der beiden Fahrzeugsysteme; auf die Austragssystem bedingten Abweichungen sei an dieser Stelle jedoch hingewiesen. In Abbildung 35 sind die Versuche ID 1-ID 5 dargestellt. Diese Versuche wurden mit einer geraden, 2 m langen Rohrleitungsstrecke zwischen Austritt der Materialleitung am Fahrzeug und Eintritt in den 4 m langen Fangsack durchgeführt. In den Versuchen ID1 –ID 3 wurde bei geringer Kompressordrehzahl schrittweise die Materialklappenstellung in den Silofahrzeugen erhöht (30-40 % - 60-70 % 80-90%), wodurch sich der Pelletmassenstrom schrittweise erhöhte (2-4 kg/s – 3-6 kg/s – 5-9 kg/s). Im Falle des Zellradsystems wurde zunächst bei geringer Zellraddrehzahl und Sperrschieberöffnung (28 U/min, 25 % Öffnungsweite) für ID 1 gestartet und dann durch Erhöhung der Zellraddrehzahl und Materialschieberöffnung die Förderkapazität angehoben. In den Versuchen ID 4 und ID 5 wurde auf allen Fahrzeugen die Drehzahl des Kompressors auf 950 U/min erhöht, zudem wurde bei den Silofahrzeugen ein Vordruck von 0,2 bar bzw. 0,4 bar Überdruck aufgebaut. Dies ist die Ursache für die erhöhte Zerkleinerung bei den Silofahrzeugen gegenüber der Zellradschleuse. Der für das vorhandene Ausliefer Szenario (2 m Rohrleitung) zu hoch gewählte Druck führt zu hohen Partikelgeschwindigkeiten beim Eintreten in den Fangsack, wodurch es zu Pelletbruch kommt. Dies zeigt, dass es wichtig ist, den Vordruck in der Silokammer an die Leitungslänge zwischen Fahrzeug und Kundensilo anzupassen.

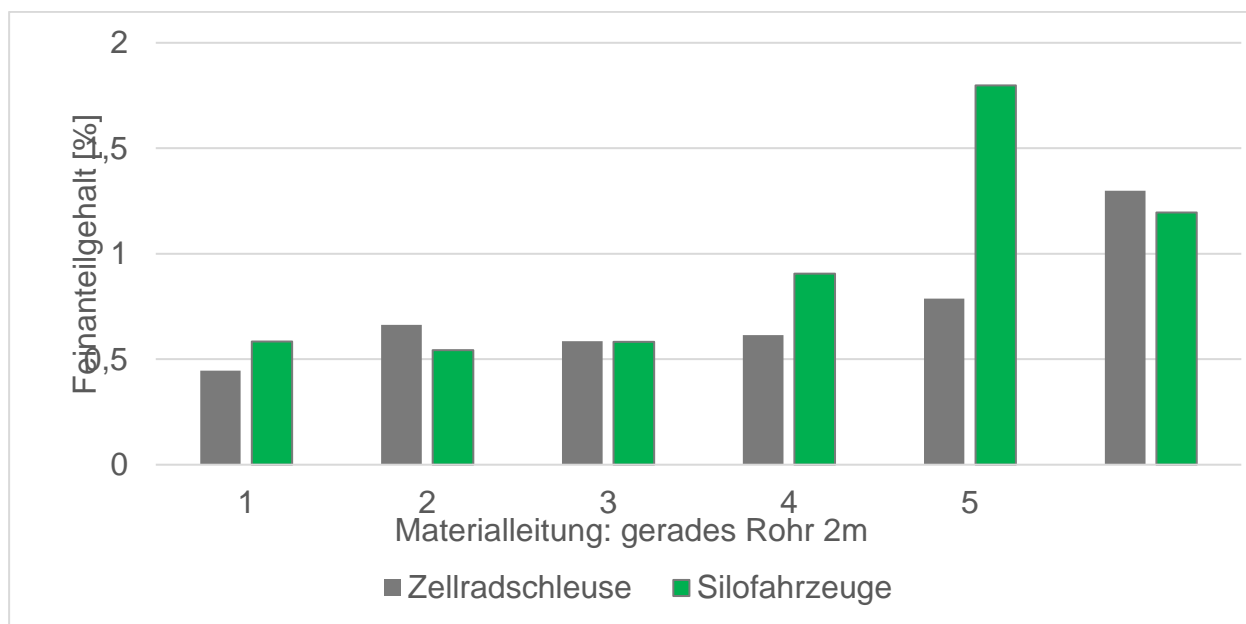


Abbildung 35: Feinanteilgehalt bei Versuchen durchgeführt auf verschiedenen Fahrzeugtypen, Materialleitung bis zum Fangsack: gerade Rohrleitung, 2 m

In Abbildung 36 sind die Versuche, die mit einem 18 m langen Materialschlauch durchgeführt wurden, dargestellt. In den Versuchen ID 7-ID 9 wurde der Pelletmassenstrom in den Silofahrzeugen durch die Erhöhung der Materialklappenöffnung und Silozuluft schrittweise erhöht. Der Vordruck betrug ca. 0,5 bar, der Volumenstrom lag in der Größenordnung von 700-850 m³/h. Die geringste Zerkleinerung und der höchste Massenstrom (ca. 6,5 kg/s) wurde für Konfiguration ID 9: ausschließlich Silozuluft, Materialklappe weit geöffnet (80-90 %) ermittelt. In den Versuchen ID 10 wurde die Leistung des Kompressors weiter erhöht und die Treibluftzuleitung geöffnet, bei weit geöffneter Materialklappe. Der Volumenstrom erhöhte sich auf 750-1000 m³/h, der Massenstrom reduzierte sich auch ca. 4,4 kg/s. Somit erhöhte sich die Partikelgeschwindigkeit in der Schlauchleitung und vor dem Aufprall im Fangsack. Das Resultat ist eine Zunahme von Feinanteil um ca. 1 m% (vgl. ID 9 und ID 10 in Abbildung 36). In ID 11 wurde der Druck in der Silokammer auf 0,7 bar erhöht, ausschließlich Silozuluft eingesetzt und die Materialklappe auf eine niedrige Öffnungsweite (30 %) eingestellt. Die geringe Öffnungsweite der Materialklappe in Kombination mit viel Druck in der Silokammer führt zu starker Zerkleinerung, da die Pellets aufgrund des schmalen Spalts zwischen Silo und Förderleitung hohe mechanische Belastungen erfahren. Eine zusätzliche Ursache für den hohen Feinanteilgehalt ist, wie auch in den Versuchen mit viel Treibluft beobachtet, die niedrige Beladung und somit die höhere Partikelgeschwindigkeit.

Die Ergebnisse der Versuche mit der Zellradschleuse in Kombination mit der Querförderschnecke sind in Abbildung 36 dargestellt. Wie im vorherigen Abschnitt bereits erwähnt führt die Nutzung der Querförderschnecke zu einer starken Erhöhung des Feinanteilgehalts (ID 9-ID 11). In ID 9 wurde die Querförderschnecke zum ersten Mal eingeschaltet, sodass der im Schneckentrog akkumulierte Feinanteil in diesem Versuch zusätzlich im Probenbehälter eingefangen wurde. Dies erklärt den hohen Feinanteilgehalt von ca. 4 m%. Die Masse des zusätzlich enthaltenen Feinanteils beträgt ca. 3,75 kg-5 kg (Annahme ca. 1,5 % - 2 % Feinanteil von 250 kg Probe). Versuch ID 10 und ID 11 fanden entsprechend bei entleertem Schneckentrog statt.

Erwähnenswert ist an dieser Stelle, dass der Massenstrom für ID 10 ID 11 und ID 7 mit 4,6-5,3 kg/s in einer ähnlichen Größenordnung liegt. Die Drehzahl und Sperrschieberöffnung waren in diesen Versuchen abgestimmt: Drehzahl 28 U/min mit 25 % Öffnung, Drehzahl 50 U/min mit 50 % Öffnung, Drehzahl 93 U/min mit vollständig geöffneten Schieber. Auch die Zerkleinerung ist in den drei Konfigurationen unter Annahme einer zusätzlichen Zerkleinerung von 1 m% durch die Querförderschnecke mit 1,2-1,35 m% in einer ähnlichen Größenordnung. Dies zeigt, dass es hinsichtlich einer materialschonenden Förderung auf die richtige Kombination der beiden Stellgrößen Zellradschleuse und Materialschieber ankommt.

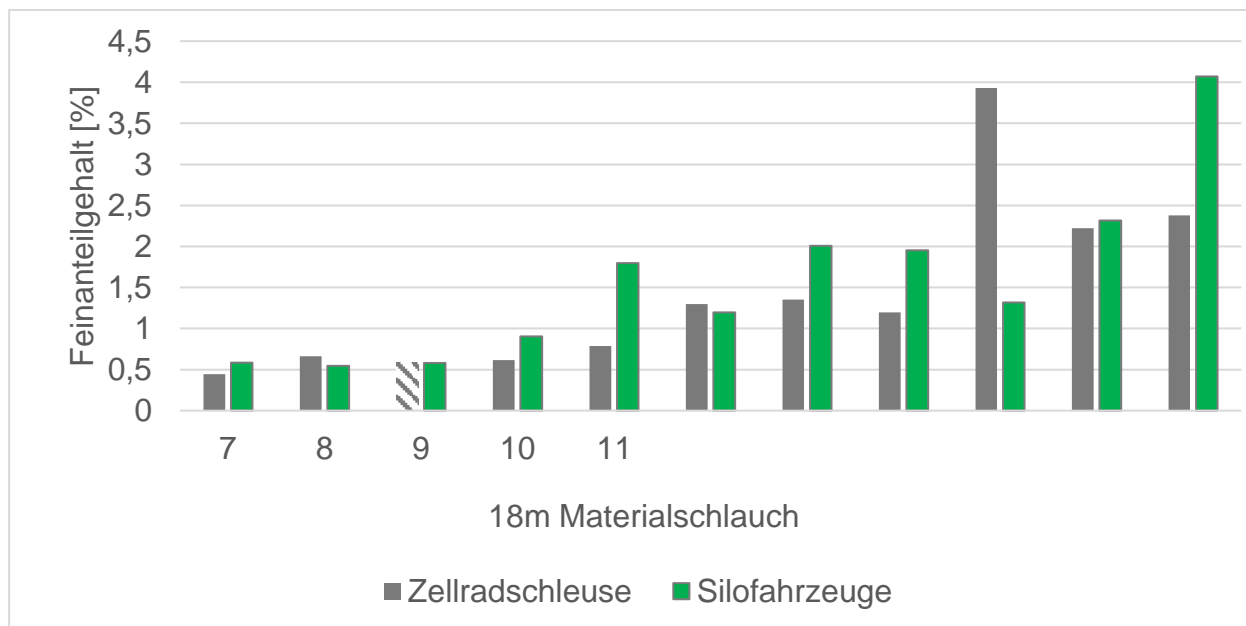


Abbildung 36: Feinanteilgehalt bei Versuchen durchgeführt auf verschiedenen Fahrzeugtypen, Materialleitung bis zum Fangsack: 18 m Materialschlauch, ausgelegt in einem Viertelkreis (90° Umlenkung)

Für eine Untersuchung des Bruchverhaltens wurden neben der vollständigen gravimetrischen Untersuchung auch mehrere der Proben aus den Fahrzeugversuchen mit der im Rahmen des Projekts in Betrieb genommenen optischen Längenmessung untersucht. Die Längenverteilung der Proben ist in Abbildung 37 dargestellt. Die Nullprobe_LKW Probe stellt die initiale Längenverteilung der verwendeten Holzpelletcharge nach dem Sieben und vor dem Einfüllen in die Fahrzeuge dar. Die optische Längenmessung erfasst Partikel >4 mm, da kleiner Partikel keine zylindrische Form aufweisen, sondern vielmehr als unförmige Bruchstücke vorliegen. Die Ergebnisse zeigen, dass insbesondere Pellets >11 mm brechen. Die Charakteristik der Häufigkeitsverteilungen ist dabei unabhängig vom Fahrzeugtyp ähnlich, insbesondere die Häufigkeit an Pellets im Bereich der Länge 6-9 mm nimmt stark zu.

Über das Verhältnis der ursprünglichen mittleren Länge der Nullprobe \bar{l}_0 bezogen auf die mittlere Länge \bar{l}_1 nach dem Fördervorgang lässt sich dann die *Crushing Ratio CR* (Zerkleinerungsrate) bestimmen (1), wie bereits in AP5 eingeführt.

$$CR = \bar{l}_0 / \bar{l}_1 \quad (1)$$

Eine Untersuchung der gemessenen Proben aus der Längenmessung, abgeglichen mit den Ergebnissen aus der Auswertung des Feinanteilgehalts, zeigte, dass die *Crushing Ratio* in den meisten Fällen proportional mit dem Feinanteilgehalt zunimmt. Bei einem Vergleich von einem Fahrzeugversuch eines Silofahrzeugs mit dem des Zellrads, bei denen ein ähnlicher Feinanteilgehalt vorlag, war die CR im Falle des Zellrads im Trend etwas höher als bei den Silofahrzeugen. Pellets, die im Eintritt in die Zellradschleuse gelangen, während die Zelle weiter rotiert, können je nach Orientierung an der Trennkante unter geringer Feinanteil Entstehung zerteilt werden.

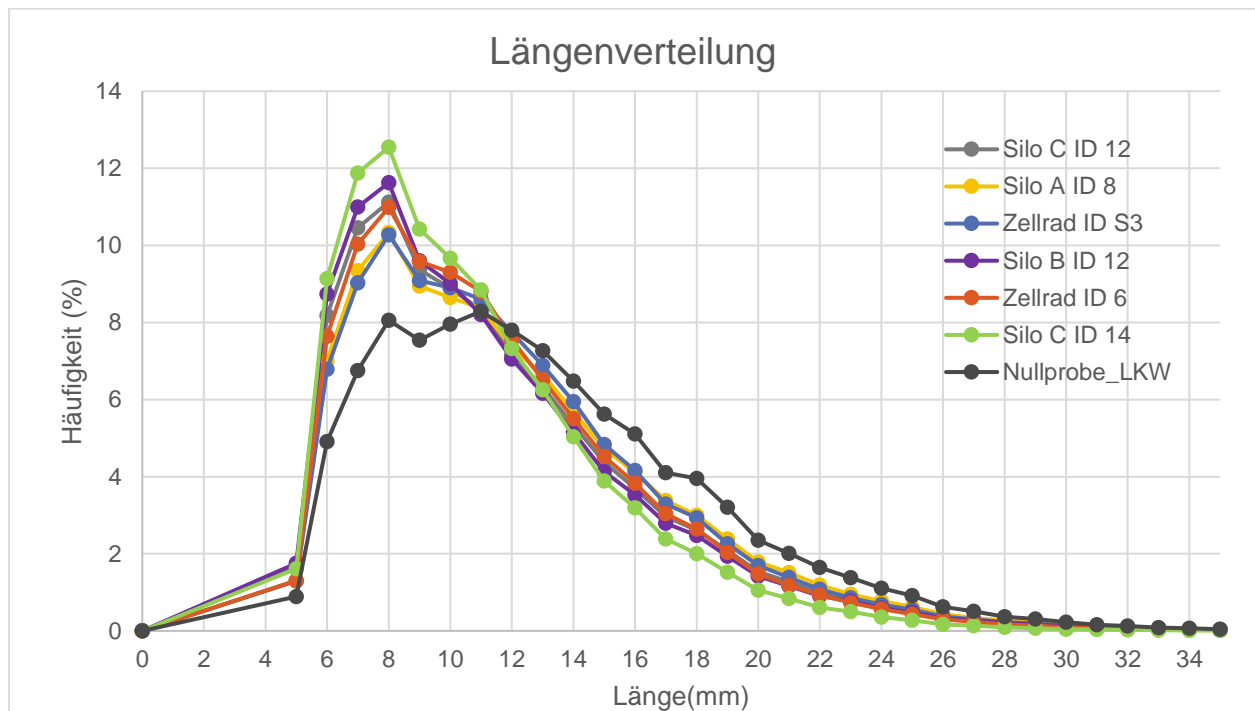


Abbildung 37: Häufigkeitsverteilung verschiedener Fahrzeugversuche ermittelt mit der optischen Längenmessung

Wie aus den Fahrzeugversuchen in AP 6 hervorgeht liegt die Zerkleinerung bei beiden untersuchten Fahrzeugtypen bei günstig gewählten Betriebsparametern auf einem ähnlichen Niveau. Der Pelletmassenstrom lag bei einer Leitungslänge von 2 m bei beiden Fahrzeugtypen mit 5-9 kg/s, je nach Klappen/Schieberöffnung, in einem ähnlichen Größenbereich. Bei den Versuchen mit 18 m Schlauch lag der Pelletmassenstrom bei dem Zellradsystem zwischen 3 kg/s-5,5 kg/s, im Falle der Silofahrzeuge bei 2 kg/s-7,5 kg/s. Die Einstellung/Variation des Massenstroms war bei den Silofahrzeugen aufgrund der Bedienung intuitiver. Eine weitere Erhöhung des Pelletmassenstroms beim Zellradsystem kann durch eine weitere Erhöhung der Kompressordrehzahl erreicht werden, wodurch jedoch auch eine Zunahme des Feinanteilgehalts zu erwarten ist (maximal in den Versuchen verwendete Drehzahl 1050 U/min). Bei großer Leitungslänge (höherer Strömungswiderstand) ist eine Auslieferung mit Silofahrzeugen vorteilhaft, da diese in der Silokammer vor der Öffnung der Materialklappe Druck aufbauen können, dies unterstützt den Kompressor und sorgt für eine gleichmäßigere Förderung.

Arbeitspaket 7: Durchführung von Feldversuchen

Für die Auswertung der Messdaten wurde eine Software mit einer grafischen Oberfläche programmiert. Diese ermöglicht es, die aufgezeichneten Rohdaten in physikalische Größen umzuwandeln. Grundlage hierfür sind die vorhandenen Kennlinien der verbauten Drucksensoren, Thermoelemente und Strömungssensoren. Anhand der nach DIN 5167-2 vorgegebenen Berechnungsroutinen kann dann das Signal aus den Differenzdrucksensoren der Messblende sowie der zugehörigen Druck- und Temperatursensoren in einen Luftvolumenstrom umgerechnet werden. Das Ausgangssignal der in AP3 entwickelten Strömungssensoren ist nicht-linear. Für eine Umrechnung des Spannungssignals in den korrespondierenden Volumenstrom wurden Kalibriermessungen mit bekannten Volumenströmen durchgeführt und die Kennlinie der Sensoren ermittelt (s. Abbildung 38). Mittels Interpolation zwischen den Messpunkten kann dann der Volumenstrom bestimmt werden.

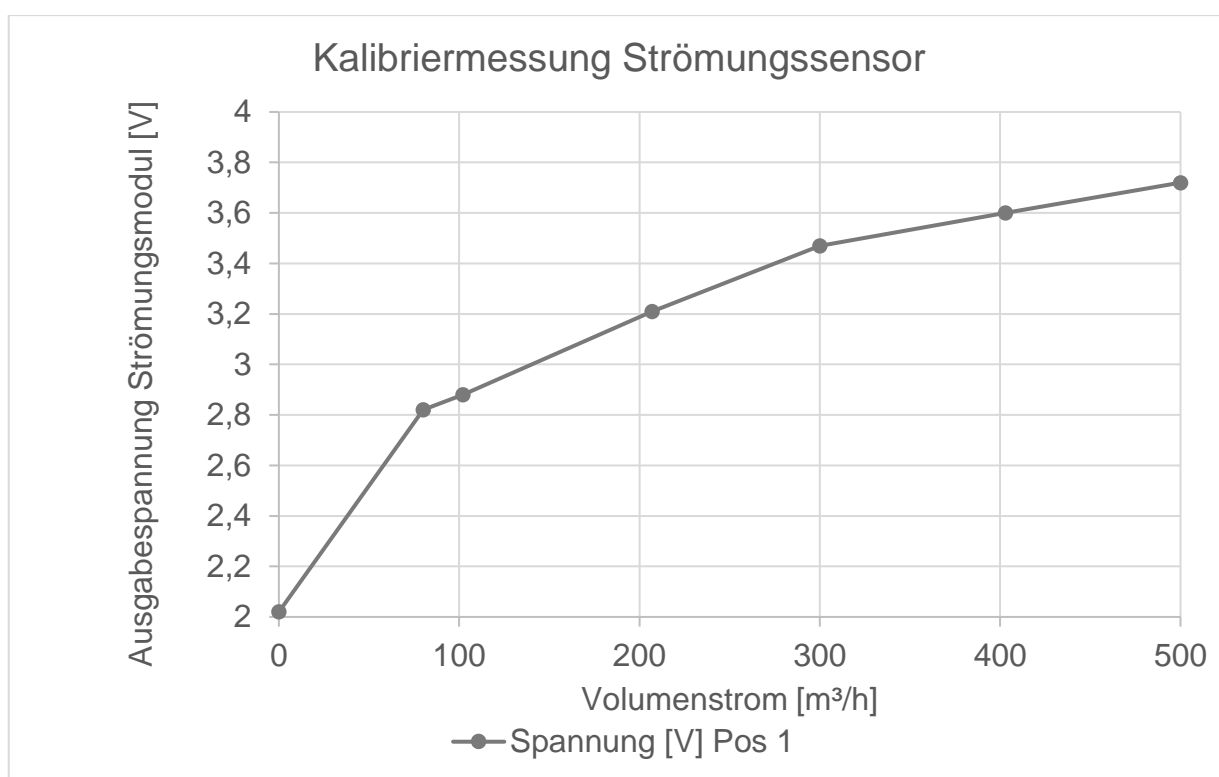


Abbildung 38: Kennlinie der Strömungssensoren, ermittelt anhand einer Kalibriermessung mit bekannten Volumenströmen

Aufgrund der unterschiedlichen Anzahl an Sensoren wurde für jedes Fahrzeug die Kanalbelegung des Messsystems individuell eingepflegt, ebenso die Abmessungen der in den Fahrzeugen verbauten Messblenden und die Kennlinien der Sensoren. Über eine Schaltfläche lässt sich die Messreihe, die ausgewertet werden soll, einlesen; das Fahrzeug wird über ein DropDown Menü ausgewählt. Sobald die Schaltfläche „auswerten“ angeklickt wird, werden die Rohdaten konvertiert und eine in Microsoft Excel einlesbare CSV Datei mit den physikalischen Größen erstellt. Zeitgleich werden die Daten Druck, Volumenstrom geplottet (s. Abbildung 39), und bei vorhandener Waage, ebenfalls der Massenstrom. Über die erneute Auswahl einer Messreihe kann ein weiterer Datensatz zeitgleich geplottet werden. Über den Button „löschen“

werden die Plots gelöscht. Die Software steht für die Fahrzeugeigentümer zur Verfügung und ermöglicht die Auswertung von Auslieferungen.

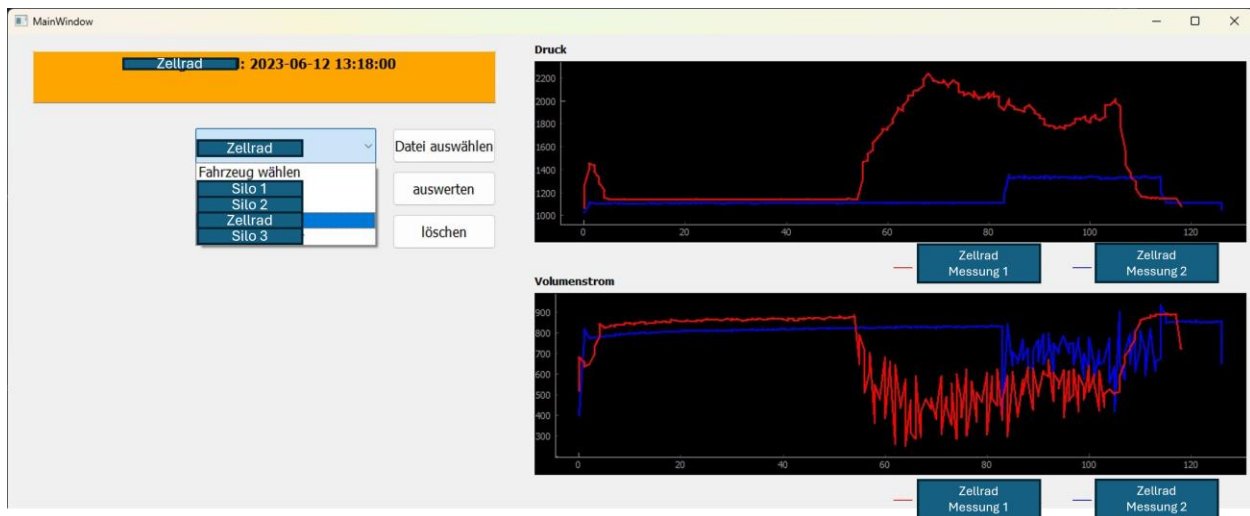


Abbildung 39: Software mit grafischer Oberfläche für die Auswertung von Messungen

Eine Durchführung von Stichproben in den Kundenlagern, wie im Antrag zunächst vorgesehen, wurde in Rücksprache mit den Teilnehmern des PA verworfen, da die Zugänglichkeit zu den Kundensilos nur eingeschränkt möglich und eine repräsentative Probennahme ebenfalls nicht umsetzbar wäre. Als Ersatz wurde die Software mit der grafischen Oberfläche ausgestattet, sodass die Auswertung der Messdaten auch nach Projektende für die Fahrzeugeigentümer zur Verfügung steht und Messungen ausgewertet werden können.

Arbeitspaket 8: Maßnahmenkatalog zur Reduzierung der Pelletzerkleinerung innerhalb der Lieferfahrzeuge und Abschlussbericht

Die Fahrzeugversuche aus AP6 ermöglichten aufgrund des großen Probenchargenumfangs und der Vielzahl an Parametervariationen wichtige Erkenntnisse über die geeigneten Stellgrößen für eine materialschonende und gleichzeitig schnelle Auslieferung durch die Lieferfahrzeuge. Aus diesen Erkenntnissen lassen sich Empfehlungen ableiten, die bei der Bedienung der Fahrzeuge einen entscheidenden Unterschied für eine möglichst geringe Zerkleinerung und somit qualitativ hochwertigere Produktabgabe ermöglichen. Im Einzelnen sind dies:

- Bei Silofahrzeugen: Öffnung der Materialklappe sollte nicht geringer als 50 %, also 45 ° geöffnet sein. Bei kleineren Öffnungsweiten kam es zu einer signifikanten Zunahme an Feinanteil. Besonders geeignet war ein Klappenwinkel von 60 °-90 °. Die Kompressorluft sollte primär über die Silozuluft eingeleitet werden. Dies führt bei einem Klappenwinkel >60 ° zu einem höheren Materialaustrag, gleichzeitig aber auch zu einer höheren Beladung der Materialleitung, wodurch die Partikelgeschwindigkeit und somit die Zerkleinerung geringer ausfällt. Treibluft sollte nur kurzfristig hinzugegeben werden, um einen Schlauchstopfer bei zu hoher Beladung zu vermeiden. Der Aufbau von Vordruck in der Silokammer ist bei längeren Leitungswegen (>12 m) erforderlich, sollte jedoch nicht zu hoch gewählt werden. In den Versuchen wurde geringe Zerkleinerung mit 0,4 bar Überdruck für 18 m Leitungslänge erreicht. Fest installierte Leitungen oder eine längere

Schlauchdistanz zum Kundensilo können den erforderlichen Silodruck erhöhen.

- Bei Zellradschleusensystemen: Wichtig für eine möglichst geringe Zerkleinerung ist die korrekte Kombination aus Zellraddrehzahl und Sperrschieber oberhalb der Zellradschleuse. In der Praxis konnten mit einer Drehzahl von 50 U/min und einer Schieberöffnung von 50 %-75 % die höchsten Massenströme und die geringste Zerkleinerung erzielt werden. Wichtig ist es hierbei bei einer höheren Beladung der Zellradschleuse gleichzeitig die Drehzahl des Kompressors anzuheben. Nur so kann gewährleistet werden, dass die Zellradschleuse vollständig entleert wird, wodurch zusätzliche Zerkleinerung vermieden werden kann. Die angegebenen Parameter können nur nach Gefühl und Erfahrung des Bedienpersonal eingestellt werden und sind auch abhängig von der Einblasdistanz. Fehlbedienungen mit höherem Bruch und Feinanteil sind leicht möglich. Die Querförderschnecke sollte ausschließlich für die Restentleerung des Fahrzeugs verwendet werden. Im Schneckenrog sammelt sich viel Feinanteil, dieser wird beim Einschalten der Schnecke direkt in die Förderleitung transportiert, ein Betrieb der Schnecke führt zu hoher Zerkleinerung.
- Bei der Auslieferung spielt die Beladung (Verhältnis Schüttgut zu Förderluftmenge) eine wesentliche Rolle. Eine hohe Beladung („voller Schlauch“) führt zu einer geringeren Partikelgeschwindigkeit, bei gleichzeitig hohem Produktmassenstrom. Die geringen Geschwindigkeiten mindern Feinanteilbildung durch Abrieb und Pelletbruch. Da eine zu hohe Beladung zu einem Schlauchstopfer führen kann, wäre es sinnvoll den aktuellen Massenstrom in den Lieferfahrzeugen anzuzeigen und den Volumenstrom über die Drehzahl und den Arbeitsdruck des Kompressors abzuschätzen. Hierdurch kann ebenfalls die Beladung ermittelt und dem Fahrer zur Verfügung gestellt werden.
- Der Einsatz von Krümmern im Allgemeinen, aber insbesondere unmittelbar am Fahrzeugaustritt ist als kritisch anzusehen, da jede Umlenkung zu Kollisionen und somit zu Pelletbruch und Feinanteilbildung führt. Es ist ratsam, die Pellets gerade aus der Austragsleitung des Fahrzeugs herauszuleiten. Falls aufgrund der örtlichen Gegebenheiten sich eine Umlenkung nicht vermeiden lässt, sollte diese über das Auslegen einer Schlauchlänge (6 m Element) in einem großen Radius umgesetzt werden.

Die oben genannten Maßnahmen und Daten werden dem DEPV bezüglich einer Übernahme für Lehrinhalte für Fahrerschulungen vorgelegt.

6. Verwendung der Zuwendung

Forschungsstelle 1: LEAT – Ruhr-Universität Bochum

Teilziel laut Antrag / Arbeitspaket 1: Entwicklung und Erprobung einer materialschonenden Auffangeinrichtung

- wissenschaftlich-technisches Personal
Der wissenschaftliche Mitarbeiter Phil Spatz entwickelte die Auffangeinrichtung und erprobte diese. (3 PM) Der wissenschaftliche Mitarbeiter Max Kriegeskorte unterstützte

bei der Konstruktion (1 PM), der wissenschaftliche Mitarbeiter Julian Jägers unterstütze bei der Konzeptfindung (2 PM)
(gesamt 6 PM)

Teilziel laut Antrag / Arbeitspaket 2: Charakterisierung der Lieferfahrzeuge und Festlegung der Prozessparameter

- wissenschaftlich-technisches Personal
Der wissenschaftliche Mitarbeiter Phil Spatz analysierte die verschiedenen Fahrzeugtypen und plante die Ausrüstung der Fahrzeuge mit Messtechnik (2 PM).
(gesamt 2 PM)

Teilziel laut Antrag / Arbeitspaket 3: Ausrüstung der Fahrzeuge mit der jeweils erforderlichen Messtechnik

- wissenschaftlich-technisches Personal
Der wissenschaftliche Mitarbeiter Phil Spatz entwickelte die Messtechnik für die Lieferfahrzeuge und rüstete diese aus. (2 PM), der wissenschaftliche Mitarbeiter Maik Scharnowski unterstütze bei der Programmierung des Messsystems (1 PM).
(gesamt 3 PM)

Teilziel laut Antrag / Arbeitspaket 4: Erprobung der Messtechnik und initiale Charakterisierung der Zerkleinerungswirkung der unterschiedlichen Fahrzeugtypen

- wissenschaftlich-technisches Personal
Der wissenschaftliche Mitarbeiter Phil Spatz führte gemeinsam mit den Werkstatt-Teams der Aufbauhersteller die Erprobung der Messtechnik durch (2 PM).
(gesamt 2 PM)

Teilziel laut Antrag / Arbeitspaket 5: Analyse der Zerkleinerungswirkung der einzelnen Komponenten der unterschiedlichen Lieferfahrzeuge

- wissenschaftlich-technisches Personal
Der wissenschaftliche Mitarbeiter Phil Spatz konstruierte Modellversuchsstände, plante und koordinierte die Versuche an den Anlagen und Wertete die Ergebnisse aus (8 PM).

(gesamt 8 PM)

Teilziel laut Antrag / Arbeitspaket 6: Messung der Zerkleinerungswirkung bei Parametervariation

- wissenschaftlich-technisches Personal
Der wissenschaftliche Mitarbeiter Phil Spatz koordinierte die Durchführung der Fahrzeugversuche und deren Auswertung, die Entwicklung der optischen Längenmessung und konstruierte eine Siebanlage für die Auswertung der Proben (8 PM).
(gesamt 8 PM)

Teilziel laut Antrag / Arbeitspaket 7: Durchführung von Feldversuchen

- wissenschaftlich-technisches Personal

Der wissenschaftliche Mitarbeiter Carl Hentschel koordinierte die Programmierung der Software zur Auswertung der Fahrzeugmessdaten (2 PM).
(gesamt 2 PM)

Teilziel laut Antrag / Arbeitspaket 8: Maßnahmenkatalog zur Reduzierung der Pelletzerkleinerung innerhalb der Lieferfahrzeuge und Abschlussbericht

- wissenschaftlich-technisches Personal
Der wissenschaftliche Mitarbeiter Phil Spatz verfasste den Abschlussbericht und formulierte die Empfehlungen für den Maßnahmenkatalog (1,75 PM).
(gesamt 1,75 PM)

Für die Forschungsstelle 1 LEAT wurden in Summe 32,75 Personenmonate für wissenschaftlich-technisches Personal eingesetzt.

7. Notwendigkeit und Angemessenheit der geleisteten Arbeit

Die geleistete Arbeit entspricht den im Projektantrag definierten Aufgabenstellungen bzw. den Inhalten der einzelnen Arbeitspakete. Der erzielte Erkenntnisgewinn folgt dabei den formulierten Erwartungen und unterstreicht die Notwendigkeit derartiger Untersuchungen zum Verständnis der pneumatischen Auslieferung durch die Lieferfahrzeuge abhängig von den eingestellten Betriebsparametern. Die geleistete Arbeit erfolgte im angemessenen Umfang hinsichtlich der im Antrag geforderten Maßnahmen.

8. Wissenschaftlich-technischer und wirtschaftlicher Nutzen der erzielten Ergebnisse für KMU

Von den Ergebnissen dieses Vorhabens profitiert ein wesentlicher Teil der sehr stark von KMU geprägten Holzpelletbranche. Durch schonendere Auslieferungen kann die Zerkleinerung der Holzpellets reduziert werden. Neben der damit einhergehenden Erhöhung der Produktqualität wird die Konzentration des explosionsgefährlichen und gesundheitsschädlichen Schwebstaubs in der Luft verringert. Die bessere Endproduktqualität entlastet die Zulieferer durch eine geringere Anzahl an Reklamationen/Regressanforderungen, die zu einem Großteil aus einem zu hohen Feinanteil resultieren. Geringe Feinanteile in Pelletschüttungen reduzieren ebenfalls die Störanfälligkeit einzelner Anlagenkomponenten, wie z.B. Förderschnecken oder Zelleradschleusen, sowie die Staubemissionen der Feuerungen.

Darüber hinaus können die Hersteller der Lieferfahrzeuge die Fahrzeugsysteme optimieren, indem beispielsweise mehr Parameter wie der Pelletmassenstrom oder die Drehzahl der Zelleradschleuse direkt auf einem Display angezeigt werden, und so dem Personal auf dem Lieferfahrzeugen mehr Informationen für eine Bedienung der Fahrzeuge zur Verfügung steht. Auch konzeptionelle Änderungen wie der Ersatz der Querförderschnecke auf Fahrzeugen mit Zelleradsystem durch materialschonendere Mechanismen für die Restentleerungen sind eine mögliche Optimierung. Für die Fahrerschulungen können die Fahrzeughersteller Erkenntnisse aus den Fahrzeugversuchen nutzen, um zu vermitteln, welche Parameter günstig für eine möglichst geringe Zerkleinerung bei Auslieferung sind.

Da der Aspekt Störungen im Anlagenbetrieb durch Feinanteil und Zerkleinerung in der öffentlichen Wahrnehmung teilweise negativ mit Pelletheizungen verknüpft sind, kann durch eine Reduktion des Feinanteils der Pellets auch mittel- bis langfristig eine erhöhte Kaufbereitschaft von Pelletheizungen erreicht werden.

9. Plan zum Ergebnistransfer in die Wirtschaft

Transfermaßnahmen während der Projektlaufzeit

Zeitraum	Maßnahme	Erfüllungsstatus
Fortlaufend	Betreuung studentischer Arbeiten zur Thematik und Einbeziehung studentischer Hilfskräfte	2022 wurde eine Masterarbeit verfasst 2023 wurden eine Masterarbeit sowie zwei Projektarbeiten verfasst 2024 wird eine Projektarbeit abgeschlossen
Halbjährlich	Berichterstattung an den Projektbegleitenden Ausschuss	Treffen/Online Meeting des Projektbegleitenden Ausschusses am 23.03.2021, am 24.11.2021, am 18.05.2022, am 16.12.2022 am 07.06.2023, am 30. 10.2023 (Abschlussmeeting).
Halbjährlich	Bereitstellung der Dokumente aus den PA-Sitzungen	Im Anschluss an das Treffen des Projektbegleitenden Ausschusses
Jährlich	Bereitstellung des Zwischenberichts	Zwischenbericht 2021 eingereicht und dem Projektbegleitenden Ausschuss zur Verfügung gestellt. Zwischenbericht 2022 eingereicht und dem Projektbegleitenden Ausschuss zur Verfügung gestellt. Zwischenbericht 2023 wurde in den Abschlussbericht integriert.
Jährlich	Berichterstattung auf Jahressitzung der Forschungsvereinigung	Die laufenden Ergebnisse und der Stand des Projekts wurden auf den Jahressitzungen der DVV präsentiert: 11.11.2021 (Vortrag) 10.11.2022 (Poster)
Jährlich	Berichterstattung beim DEPV	Verbreitung der Ergebnisse und Erfahrungsaustausch mit Unternehmen aus der Holzpelletbranche
2023	Konferenzbeitrag	Dt. Flammentag (26.09.2023)
2024	Veröffentlichung im Tagungsband und Konferenzbeitrag	European Pellet Conference WSED 2024, Wels, Austria, (05.-07. März 2024)

2024	Konferenzbeitrag	European Conference on Industrial Furnaces and Boilers INFUB 14, Portugal (02. -05. April 2024)
------	------------------	---

Transfermaßnahmen nach Abschluss des Projekts

Zeitraum	Maßnahme	Erfüllungsstatus
2024	Abschlussbericht	Eingereicht und dem Projektbegleitenden Ausschuss zur Verfügung gestellt.
2024	Bereitstellung der Ergebnisse	Bereitstellung der Ergebnisse an den projektbegleitenden Ausschuss.
2024	Veröffentlichung in Fachzeitschrift, Holz-Zentralblatt	Veröffentlichung bereits geplant.
2024	Publikation in Journal	Ausgewählt für die Veröffentlichung im Rahmen des special issues der INFUB 14 im Journal Fuel Processing Technology
2024	Projekttreffen: Erläuterung der Erkenntnisse und Vorstellung des Abschlussberichts	Terminfindung nach Veröffentlichung des Abschlussberichts
2024	Anpassung der Software für die Eigentümer der mit Messtechnik ausgestatteten Fahrzeuge	Terminfindung nach Veröffentlichung des Abschlussberichts
2024	Bereitstellung der Optischen Längenmessung an das HEZ Olsberg	Terminfindung nach Veröffentlichung des Abschlussberichts.
2024	DEPV-Richtlinie	Aufnahme der in AP8 genannten Erkenntnisse in die DEPV-Richtlinien geplant

10. Umsetzung des Transferkonzeptes

Durch Kombination unterschiedlicher Maßnahmen wurde schon während der Projektlaufzeit und bei Projektabschluss der Ergebnistransfer in die Wirtschaft gefördert und gewährleistet. Die einzelnen Maßnahmen waren folgende:

- In dem durch KMU's geprägten Projektbegleitenden Ausschuss sind sowohl Mitarbeiter von Pelletlieferanten, Pelletproduzenten als auch von Herstellern von Lieferfahrzeugen und Lagersilos integriert. Anregungen und konkrete Problemstellungen aus dem

Projektbegleitenden Ausschuss wurden im Vorhaben mitberücksichtigt, sodass eine gemeinschaftliche Daten- und Erkenntnisbasis gelegt wurde. Dadurch können die Ergebnisse sowohl bei der Auslieferung (Einstellung der Betriebsbedingungen) als auch bei der Auslegung von Lieferfahrzeugen und Lagermöglichkeiten (Einfluss der Leitungsbauteile) bei den entsprechenden Unternehmen berücksichtigt werden.

- Die im Rahmen des Projekts gewonnenen Erkenntnisse wurden in Form von frei zugänglichen Zwischen- und Abschlussberichten dokumentiert.
- Weiterhin wurden die Erkenntnisse bei Fachtagungen (DVV-Jahressitzung) und Konferenzen (31. Deutscher Flammentag (2023), WSED 2024, INFUB 14 (2024)) vorgetragen.
- Auf dem Gebiet der Ausbildung wurden und werden die Ergebnisse im Rahmen der Lehrtätigkeit an der Ruhr-Universität Bochum vermittelt. Durch Mitarbeit studentischer Hilfskräfte und der Betreuung studentischer Arbeiten zum Projektinhalt wurde und wird die intensive Einarbeitung zukünftiger Absolventen in die Thematik gefördert, über den Personaltransfer werden Erkenntnisse in die Industrie transferiert.
- Nach Beendigung des Vorhabens sind die Ergebnisse hinsichtlich der Zerkleinerung in den Lieferfahrzeugen sowie die Wahl geeigneter Betriebsparameter für eine möglichst materialschonende Auslieferung den Firmen des PA und der Fachöffentlichkeit zugänglich gemacht worden.
- Die Ergebnisse werden in ergänzenden Schulungsunterlagen zusammengefasst und die DEPV übergeben, sodass das Knowhow auch an die Fahrer der Lieferfahrzeuge weitergegeben wird und die Pelletlieferanten und Kunden von einer höheren ausgelieferten Pelletqualität profitieren können.

11. Gewerbliche Schutzrechte

Für die aus diesem Forschungsvorhaben gewonnenen Erkenntnisse wurden keine gewerblichen Schutzrechte beantragt.

12. Förderhinweis

Das IGF-Vorhaben 21332 N der Forschungsvereinigung DVV wurde über die AiF im Rahmen des Programms zur Förderung der Industriellen Gemeinschaftsforschung (IGF) vom Bundesministerium für Wirtschaft und Klimaschutz aufgrund eines Beschlusses des Deutschen Bundestages gefördert.

13. Literatur

Verwendete Publikationen

- [1] Oveisi, E. et al., Breakage behavior of wood pellets due to free fall, *Powder Technology*, Vol. 235, 2013, pp. 493–499.
- [2] Mina-Boac, J., Maghirang, R. G., and Casada, M. E., Durability and Breakage of Feed Pellets during Repeated Elevator Handling, in *ASABE Annual International Meeting*, 2006, No. 06, pp. 2–12.
- [3] Larsson, S. H., Lestander, T. A., Crompton, D., Melin, S., and Sokhansanj, S., Temperature patterns in large scale wood pellet silo storage, *Applied Energy*, Vol. 92, 2012, pp. 322–327.
- [4] Ferrero, F., Lohrer, C., Schmidt, B. M., Noll, M., and Malow, M., A mathematical model to predict the heating-up of large-scale wood piles, *Journal of Loss Prevention in the Process Industries*, Vol. 22, No. 4, 2009, pp. 439–448.
- [5] Ferrero, F., Malow, M., and Noll, M., Temperature and gas evolution during large scale outside storage of wood chips, *European Journal of Wood and Wood Products*, Vol. 69, No. 4, 2011, pp. 587–595.
- [6] Deutsches Pelletinstitut, *ENplus-Informationsblatt "Entstehung von Feinanteil."* 2016.
- [7] IEA Bioenergy, *Health and Safety Aspects of Solid Biomass Storage, Transportation and Feeding*, 2013.
- [8] Abdulmumini, M. M., Bradley, M. S. A., and Zigan, S., Prediction of wood pellets degradation in a pressurised tanker truck delivery system using bench scale testers, in *ICBMH 2016 - 12th International Conference on Bulk Materials Storage, Handling and Transportation*, 2016.
- [9] Kotzur, B. A., Berry, R. J., Bradley, M. S. A., Dias, G. C., and de M S e Silva, A. C., Influence of pellet length on breakage by impact, in *ICBMH 2016 - 12th International Conference on Bulk Materials Storage, Handling and Transportation*, 2016, pp. 182–190.
- [10] Aarseth, K. A., Attrition of feed pellets during pneumatic conveying: The influence of velocity and bend radius, *Biosystems Engineering*, Vol. 89, No. 2, 2004, pp. 197–213.
- [11] Yao, J., Wang, C.-H., Wee Chuan Lim, E., and Bridgwater, J., Granular attrition in a rotary valve: Attrition product size and shape, *Chemical Engineering Science*, Vol. 61, No. 11, 2006, pp. 3435–3451.
- [12] Zhang, Y. and Wang, C.-H., Particle Attrition Due to Rotary Valve Feeder in a Pneumatic Conveying System: Electrostatics and Mechanical Characteristics, *The Canadian Journal of Chemical Engineering*, Vol. 84, No. 6, 2008, pp. 663–679.
- [13] Cleary, P. W., DEM modelling of particulate flow in a screw feeder Model description, *Progress in Computational Fluid Dynamics, An International Journal*, Vol. 7, No. 2/3/4, 2007, p. 128.