

Staubentwicklung und Explosionsrisiko beim  
Befüllen mit Pellets, Getreide und ähnlichen  
Produkten

**Abschlussbericht zum Projekt  
F-05-1401**

von

M. Sc. Benjamin Schmidt

Forschungsgesellschaft für angewandte Systemsicherheit und  
Arbeitsmedizin e.V.

12. Juli 2022, Mannheim



# Inhaltsverzeichnis

<b>1</b>	<b>Einleitung</b>	<b>1</b>
1.1	Allgemeines . . . . .	1
1.2	Projekt F-05-1401 . . . . .	3
<b>2</b>	<b>Beschreibung der Versuche</b>	<b>4</b>
2.1	Beschreibung der Schüttgüter . . . . .	4
2.1.1	Holzpellets der Klasse EN plus A1 und EN B . . . . .	4
2.1.2	Holzhackschnitzel EN plus A1 . . . . .	5
2.1.3	Weizen, Gerste und Mais . . . . .	6
2.2	Beschreibung der Messtechnik . . . . .	6
2.2.1	Messkopf, Messsignalverarbeitung und Messwertausgabe . . . . .	6
2.2.2	Kalibrierung der Messgeräte . . . . .	7
2.3	Versuche im Technikum . . . . .	8
2.3.1	Silo . . . . .	8
2.3.2	Fördereinrichtungen . . . . .	9
2.3.3	Messpunkte . . . . .	10
2.3.4	Versuchsprogramm für die Versuche im Technikum . . . . .	11
2.3.5	Versuchsdurchführung der Versuche im Technikum . . . . .	12
2.4	Praxisuntersuchungen . . . . .	12
2.4.1	Silozellen . . . . .	12
2.4.2	Fördereinrichtung . . . . .	13
2.4.3	Messpunkte . . . . .	13
2.4.4	Versuchsprogramm für die Versuche im Praxisbetrieb . . . . .	14
2.4.5	Versuchsdurchführung der Versuche im Praxisbetrieb . . . . .	14
2.5	Bestimmung der unteren Explosionsgrenze . . . . .	15

<b>3</b>	<b>Messergebnisse</b>	<b>16</b>
3.1	Ergebnisse der Versuche im Technikum . . . . .	16
3.1.1	Reproduzierbarkeit der Versuchsergebnisse . . . . .	16
3.1.2	Einfluss des anfänglichen Füllstandes . . . . .	18
3.1.3	Einfluss des Feinanteils . . . . .	19
3.1.4	Einfluss der Förderleistung . . . . .	19
3.1.5	Vergleich der sich ausbildenden Staubkonzentrationsprofile der Schüttgüter . . . . .	20
3.2	Ergebnisse der Versuche im Praxisbetrieb . . . . .	22
3.2.1	Einfluss der Elevatorabsaugung . . . . .	22
3.2.2	Maximale Staubkonzentration am Silokopf und am Schüttkegel. . . . .	23
3.3	Ergebnisse zur Bestimmung der unteren Explosionsgrenze . . . . .	25
<b>4</b>	<b>Diskussion und Fazit</b>	<b>26</b>
4.1	Erfüllung der vorgegebenen Projektziele . . . . .	26
4.2	Diskussion der Messergebnisse . . . . .	27
<b>A</b>	<b>Anhang</b>	<b>39</b>

# Liste der Symbole

Symbol	Einheit	Bedeutung
$s_p$	mm	Grenzpartikelgröße zwischen Grob- und Feinanteil
$c_{MB}$	$g/m^3$	Konzentrationsmessbereich
$l_{St}$	m	Länge des Strahlengangs zwischen ab der Kante der Fremdlichtschutzhülse
$I_0$	/	Eingangsintensität eines Lichtstrahls
$I$	/	Ausgangsintensität eines Lichtstrahls
$c$	$g/m^3$	Staubkonzentration allgemein
$\epsilon$	$m^2/g$	Extinktionskoeffizient
$f_s$	$s^{-1}$	Abtastrate
$h_m$	m	Höhe mittleres Silosegment
$h_z$	m	Höhe des zylindrischen Teil des Silos
$D_s$	m	Durchmesser des Silos
$\dot{m}$	t/h	Förderleistung
$y_i$	mm	Abstand der Messpunkte zur Silowandung
$t_f$	s	Förderzeit
$m$	kg	Fördermenge
$c_{20l}$	$g/m^3$	Staubkonzentration innerhalb der 20 l Kugel
$\bar{c}_i$	$g/m^3$	arithmetische Schüttgutspezifische Staubkonzentration
$v_i$	$m/s$	Geschwindigkeit
$\Omega$	/	Ljasčenko-Zahl
$Re$	/	Reynoldszahl
$A_i$	$m^2$	Fläche
$\psi$	/	Sphärizität
$\rho_i$	$kg/m^3$	Dichte allgemein
$\eta_f$	$Pa \cdot s$	dynamische Viskosität eines Fluids
$g$	$m/s^2$	Erdbeschleunigung
$K_{St}$	$bar \cdot m/s$	volumenabhängiger maximaler Explosionsdruckanstieg



# Kapitel 1

## Einleitung

### 1.1 Allgemeines

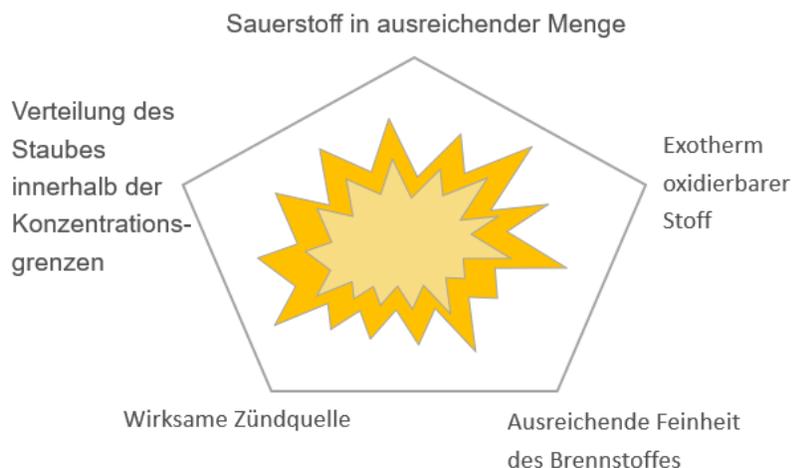
In allen Gewerbezweigen, in denen brennbare Stäube oder staubhaltige Schüttgüter im industriellen Maßstab transportiert, gelagert oder verarbeitet werden, besteht die Gefahr einer Staubexplosion. Sie können auf kleine Betriebsbereiche oder Baugruppen beschränkt sein, jedoch auch katastrophale Ausmaße annehmen [1]. Wenn gefährliche explosionsfähige Staub-Luft-Gemische verfahrensbedingt auftreten können, so müssen im Rahmen der Gefährdungsbeurteilung u. a. die Auftretswahrscheinlichkeit und die Schwere der möglichen Auswirkungen einer solchen Staubexplosion eingeschätzt werden. Auf Grundlage dieser Einschätzung kann schließlich ein risikobezogenes Explosionsschutzkonzept für den betrachteten Anlagenbereich entwickelt werden. Folgende Kriterien müssen für den Auftritt einer Staubexplosion erfüllt sein:

- Vorliegen einer Atmosphäre aus einem brennbaren Staub-Luft-Gemisch.
- Staubkonzentration innerhalb des explosionsfähigen Konzentrationsbereichs.
- Staubpartikelgroe in ausreichender Feinheit.
- Präsenz von Sauerstoff in ausreichend hoher Konzentration <sup>1</sup>.
- Energieeintrag durch eine wirksame Zündquelle.

In Abbildung 1.1 wird der Zusammenhang der drei Kriterien nochmals bildlich dargestellt.

---

<sup>1</sup>Sauerstoffkonzentration in normaler Luft bereits ausreichend.



**Abbildung 1.1** – Bildlicher Zusammenhang der Kriterien einer Staubexplosion

Entsteht ein Staub-Luft-Gemisch innerhalb der staubspezifischen unteren und oberen Explosionsgrenze, so kann nach Wirksamwerden einer Zündquelle eine Staubexplosion entstehen. Im Falle organischer brennbarer Stäube im Gemisch mit Luft beträgt die untere Explosionsgrenze (UEG) im Allgemeinen  $UEG \geq 40 \text{ g/m}^3$ .

Es sei angemerkt, dass die obere Explosionsgrenze nicht ermittelt wird. Sie liegt im Kilogrammereich. Durch Sedimentation des Staubes muss jedoch auch in Prozessen, in denen solch hohe Staubkonzentrationen vorhanden sind, mit dem Durchlaufen des explosionsfähigen Konzentrationsbereichs gerechnet werden. Als Beispiele seien das An- und Abfahren von Anlagen oder Betriebsstörungen genannt.

Als Staub im hier betrachteten Zusammenhang gilt fein verteilter brennbarer Feststoff beliebiger Form, Struktur und Dichte unterhalb einer Korngröße von  $500 \mu\text{m}$  [2]. Solche Stäube können als Nutz- oder Abfallstäube auftreten. Letzterer kann auch im Falle grober (stückiger) Schüttgüter wie Pellets, Granulate oder Körner durch Verunreinigungen anfallen oder verfahrensbedingt durch Abrieb entstehen, zum Beispiel aufgrund mechanischer Förderprozesse. Solche Schüttgüter enthalten meist - absolut gesehen - größere Mengen an Staub, auch wenn der prozentuale Anteil gering ist.

Zu diesen stückigen Schüttgütern zählen zum Beispiel Getreide, Holz- und Futtermittelpellets oder auch Holzhackschnitzel. Sie sind aufgrund ihrer Größe zwar als nicht explosionsfähig zu betrachten, können durch die zuvor erwähnten Verunreinigungen und / oder Materialabrieb jedoch erhebliche Mengen an Feinstaubanteilen enthalten.

Werden Behälter oder Silos mit stückigen Schüttgütern befüllt, so ist eine belastbare Beurteilung der Auftrittswahrscheinlichkeit explosionsgefährlicher Staub-Luft-Gemische und deren räumliche Ausdehnung in der Regel sehr schwierig.

Aus sicherheitstechnischen Gründen werden zumeist konservative Annahmen getroffen, die schließlich zu aufwändigen und kostspieligen Explosionsschutzmaßnahmen führen.

Die Forschungsgesellschaft für angewandte Systemsicherheit und Arbeitsmedizin e.V. (FSA e.V.), Fachgebiet „Brand- und Explosionsschutz“, hat es sich unter der Leitung von Professor Dr. Siegfried Radandt zur Aufgabe gemacht, die Staubkonzentrationen während der Silobefüllung mit staubhaltigen, stückigen Schüttgütern zu untersuchen.

## 1.2 Projekt F-05-1401

Das Projekt F-05-1401 „Überprüfung der Füllmethode bei Silos - Staubentwicklung und Explosionsrisiko beim Befüllen mit Pellets, Getreide und ähnlichen Produkten“ wurde Ende des Jahres 2014 mit folgender Zielsetzung gestartet:

- Für alle zu untersuchenden Schüttgüter ist der worst-case Zustand zu betrachten. Hieraus ergibt sich, dass alle Schüttgüter ungesiebt untersucht werden sollen.
- Es soll eine Auswahl an groben Schüttgütern untersucht werden die Teil der folgenden Produktarten sind:
  1. Holzpellets,
  2. Holzhackschnitzel,
  3. Getreide.
- Die Untersuchung sollte anwendungsorientiert erfolgen. Hierdurch ergaben sich mechanische Förderorgane als Befüllmethode.
- Es sollen das Staubkonzentrationsprofil und die maximale Staubkonzentration im Silo während der Befüllung in Echtzeit gemessen werden.
- Die Ergebnisse der Staubkonzentrationsmessungen sind mittels der für jeden Staub zu ermittelnden unteren Explosionsgrenze zu bewerten.

# Kapitel 2

## Beschreibung der Versuche

Es ist vorwegzunehmen, dass die Holzschüttgüter im Technikum (siehe hierzu Kapitel 2.3) und die Getreideschüttgüter während der Beschickung von Silozellen in einem Getreideumschlagbetrieb (siehe Kapitel 2.4) untersucht wurden. In den folgenden Kapiteln wird auf die Schüttgüter, die Messtechnik, die Fördereinrichtungen, die Silos sowie die explosionstechnischen Kenngrößen näher eingegangen.

### 2.1 Beschreibung der Schüttgüter

#### 2.1.1 Holzpellets der Klasse EN plus A1 und EN B

Bei Holzpellets handelt es sich um kleine, zylindrische Körper aus Holz, die aus Holzspänen unter hohem Druck gepresst werden. Holz besteht im wesentlichen aus Lignin und Zellulose. Aufgrund des hohen Drucks auf die Holzspäne verklebt das Lignin die Zellulosefasern, wodurch die Pellets formstabil werden. Die Holzspäne werden aus Waldholzresten, Sägemehl und Hobelspänen hergestellt. Letztgenannte sind ein Nebenprodukt aus Holzverarbeitungsanlagen wie z.B. Sägewerken.

Holzpellets werden sowohl für Kleinfeuerungsanlagen im privaten Bereich als auch für industrielle Großanlagen hergestellt. Im Jahr 2010 wurde durch die europäische Norm DIN EN ISO 17225-2:2014-09 für die unterschiedlichen Pelletarten drei Qualitätsklassen eingeführt. Hierbei werden die Pellets genormt in die Klassen EN-A1, EN-A2 und EN-B [4].

Der Unterschied der Holzpelletarten ist in den Eigenschaften zu erkennen, welche sich im Wesentlichen auf die Verbrennung - also auf die chemischen Eigenschaften - beziehen. Da die im Rahmen dieser Arbeit verwendeten Holzpellets nicht verbrannt werden, sind in der folgenden Tabelle 2.1 nur die Sollwertunterschiede in den physikalischen Eigenschaften genannt.

Ein weiterer Unterschied zwischen Holzpellets der Klassen EN-A und EN-B liegt darin, dass die Norm

**Tabelle 2.1** – Physikalische Eigenschaften der unterschiedlichen Pelletsorten

	EN A1 & A2	EN B
Länge [mm]	3,15 - 40	-
Durchmesser [mm]	$6 \pm 1$	4 - 10
Schüttdichte [ $g/m^3$ ]	$\geq 600$	-
Mechanische Festigkeit [%]	$\geq 97,5$	-

die Verwendung von Rinde bei der Herstellung der Pellets der Klasse EN-B erlaubt.

Holzpellets dürfen je nach Bedarf bis zu 2 % Bindemittel enthalten, um die mechanische Festigkeit zu gewährleisten. Wie aus Tabelle 2.1 ersichtlich ist, sind die Holzpellets der Klasse EN-B (Industriepellets) nur in Bezug auf den Durchmesser genormt. Sie müssen deshalb keine Anforderungen hinsichtlich ihrer Festigkeit erfüllen. Dadurch ist die Festigkeit von Industriepellets in der Regel geringer, als die der Pellets der Klassen EN-A1 und EN-A2. Durch die geringere mechanische Festigkeit der EN-B Pellets neigen diese zur stärkeren Abriebbildung, sodass hier höhere Staubkonzentrationen während der Silobefüllung zu erwarten sind.

In dieser Arbeit werden die Schüttgüter in Grob- sowie Feinanteil eingeteilt. Die definierte Grenzkornpartikelgröße beträgt hierbei  $s_p = 3,15 \text{ mm}$ . Laut [5] werden die EN B Holzpellets nach dem Pressen zusammen mit dem Feinanteil, der aus Abrieb und ungepressten Spänen besteht, in das Produktsilo weiter gefördert. Der Feinanteil kann hierbei bis zu 30 % betragen. Die angelieferten EN B Pelletproben, die nur über einen Feinanteil von  $< 2\%$  verfügten, wurden sowohl im Anlieferungszustand untersucht, als auch für Untersuchungen mit Abriebstaub auf einen Feinanteil von 30 % angereichert. Die EN plus A1 Pellets wurden der Anlieferung entsprechend verwendet. Ihr Feinanteil belief sich auf 2,3 %.

### 2.1.2 Holzhackschnitzel EN plus A1

Bei Holzhackschnitzeln handelt es sich um zerkleinertes Holz in Stücken mit festgelegter Partikelgröße, welches aus aufgearbeitetem Industrieholz, Ganzbäumen sowie sogenannten Schlagbraum (Kronen, Äste usw.) gewonnen wird. Die Klasse EN plus A1 stellt naturbelassenes Holz und chemisch unbehandelte Holzrückstände dar [6]. Die Zerkleinerung erfolgt hier im Unterschied zu Schredderholz mit Schneidmühlen. Holzhackschnitzel dienen vor allem als Brennstoff in gewerblichen oder häuslichen Feuerstätten. Weiterhin werden sie aber auch als Nährboden für die Pilzzucht sowie als Bodenbelag auf Spielplätzen verwendet.

Der Feinanteil der angelieferten Holzhackschnitzel wurde zu 3 % bestimmt.

### 2.1.3 Weizen, Gerste und Mais

Bei Weizen, Gerste und Mais handelt es sich um Pflanzenarten der Familie der Süßgräser und somit um Getreide. Genauer handelt es sich bei dem zu untersuchenden Getreide um Winterweizen, Braugerste und Futtermais. Da Ernte und Einlagerung für Weizen, Gerste und Futtermais identisch ist, wird die folgende Beschreibung allgemein gehalten. Zum Erntezeitpunkt werden die Getreidepflanzen mittels Mähdrescher geerntet. Die Getreidekörner werden innerhalb des Mähdreschers von dem Stroh und der Streu getrennt und anschließend auf ein separates Transportfahrzeug gefördert. In diesem Zustand befinden sich dennoch Restanteile von Stroh, kleine Steine und Erdklumpen im Getreide. Weiterhin ist es möglich, dass im Mähdrescher nicht alle Spelzen vom Getreidekorn entfernt wurden. In diesem ungereinigten Zustand wurde das Getreide in diesem Projekt untersucht. Die Messungen hierzu fanden in den Silozellen der ZG Raiffeisen Niederlassung in Freistett / Rheinau statt. Der Feinanteil des Weizens betrug 1,1 %, der der Gerste 1,3 % und der des Mais 0,4 %.

## 2.2 Beschreibung der Messtechnik

In den folgenden Kapitel wird die Messtechnik sowie deren Kalibrierung beschrieben.

### 2.2.1 Messkopf, Messsignalverarbeitung und Messwertausgabe

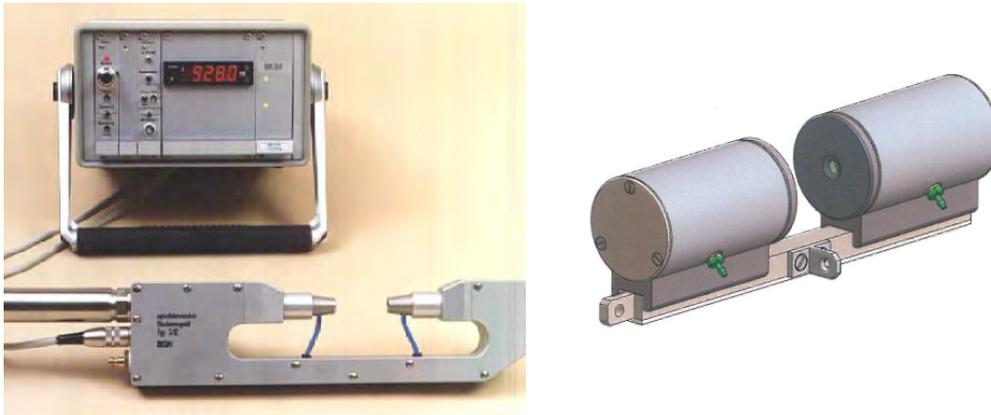
Zur Messung der Staubkonzentration wurden von der BGN / FSA entwickelte Staubkonzentrationsmessgeräte (Bezeichnung SKG) verwendet, die einen Messbereich<sup>2</sup> von  $c_{MB} = 1 - 1000g/m^3$  abdecken. Zum Einsatz kam zu Beginn des Projekts das SKG 5 Typ 7. Im späteren Verlauf wurde dieses durch das SKG 7 Typ 18 getauscht (siehe Bild 2.1). Dort ist zwar der Messkopf des Typ 16 zu sehen, allerdings ist dieser baugleich mit dem Messkopf Typ 18.

Das Messprinzip des SKGs beruht auf der Schwächung eines Lichtstrahls, der ein definiertes Messvolumen mit der Messstrecke  $l_{St}$  durchläuft. Auf dem Weg durch das Messvolumen verliert der Lichtstrahl mit der Ausgangsintensität  $I_0$  durch Absorption und Streuung an den im Messvolumen befindlichen Staubpartikeln an Intensität. Dieser Vorgang heißt Extinktion und wird durch das Lambert-Beer-Gesetz in Gleichung (2.1) beschrieben.

$$I = I_0 \cdot e^{-\varepsilon l_{St} c} \quad (2.1)$$

In Gleichung (2.1) ist  $c$  die Staubkonzentration,  $I$  die verbliebene Lichtintensität nach Durchlaufen der Strecke  $l_{St}$  und  $\varepsilon$  der Extinktionskoeffizient, der eine Stoffkonstante beschreibt. Sind  $l_{St}$  und  $\varepsilon$

<sup>2</sup>Der angegebene Konzentrationsbereich hängt vom Staub ab



**Abbildung 2.1** – Foto des Staubkonzentrationsmessgerätes mit zwei unterschiedlichen Messköpfen. Dieses setzt sich zusammen aus dem Steuergerät (links Hintergrund) und dem Messkopf (links im Vordergrund der Messkopf Typ 7 und rechts der Messkopf Typ 16) (Quelle: Handbuch des SKG5).

bekannt und ermittelt man  $I$  durch Messung, so ist die Staubkonzentration  $c$  durch Auflösung von (2.1) nach  $c$  direkt zugänglich. Der Extinktionskoeffizient  $\epsilon$  muss für jeden Staub hierfür ermittelt werden (siehe hierzu Kapitel 2.2.2).

Das SKG-Messsystem besteht aus zwei Teilen. Dem optoelektronischen Messkopf, welcher die Lichtschwächung im Messvolumen detektiert und dem mit ihm verbundenen Steuergerät, welches die gemessene Lichtintensität  $I$  in Form einer Proportionalspannung auf einer digitalen Anzeige darstellt. Für eine detailliertere Beschreibung des SKG wird hier auf [7] verwiesen.

Zur Datenaufzeichnung wurde ein Datenlogger ALMEMO 2890-9 der Firma Ahlborn verwendet. Hierbei wurde eine Abtastrate von  $f_s = 1 \text{ s}^{-1}$  gewählt, die für die träge Änderung der Staubkonzentration in der Luft als hinreichend schnell betrachtet wird. Der Datenlogger wird über programmierbare Stecker mit den Steuergeräten der Staubkonzentrationsmessgeräte verbunden. Auf dem Datenlogger gespeicherte Messdaten können per PC aus dem Gerät ausgelesen werden. Dazu wird die ebenfalls von Ahlborn entwickelte Software AMR WinControl 6 verwendet. Aus dieser Software können die Datenreihen als Texteditorformat exportiert werden.

## 2.2.2 Kalibrierung der Messgeräte

Wie bereits in 2.2.1 erwähnt wurde, muss für die Berechnung der Staubkonzentration mit dem SKG für jeden zu messenden Staub der Extinktionskoeffizient durch einen Kalibriervorgang bestimmt werden. Dieser Kalibriervorgang besteht im Wesentlichen aus der Erstellung einer Kalibrierkurve, die mit Hilfe einer Regressionsrechnung mit (2.1) aus zuvor gewonnenen Kalibrierpunkten gewonnen wurde. Der freie Parameter bei der Regression ist der Extinktionskoeffizient  $\epsilon$ . Auch hier wird für

eine detaillierte Beschreibung der Kalibrierungsmethoden auf [7] verwiesen. Im folgenden werden die ermittelten Extinktionskoeffizienten für die Staubanteile der verwendeten Schüttgüter in Tabelle 2.2 dargestellt.

**Tabelle 2.2** – Extinktionskoeffizienten der Staubanteile der verwendeten Schüttgüter

Schüttgut [l]	$\varepsilon$ [m <sup>2</sup> /g]
Holzpellets EN plus A1	0,148
Holzpellets EN B	0,160
Holzhackschnitzel EN plus A1	0,173
Weizenkörner	0,174
Gerstenkörner	0,161
Maiskörner	0,105

## 2.3 Versuche im Technikum

Die Versuche mit den Holzschüttgütern wurden an einem Technikumssilo auf dem Versuchsfeld der BGN / FSA in Kappelrodeck durchgeführt. Um die Messungen zielgerichtet durchführen zu können wurde ein Versuchsstand aufgebaut, der es ermöglichte, die Schüttgüter mechanisch in ein Silo zu fördern und dabei die sich ausbreitende Staubkonzentration innerhalb des Silos zu messen. Die einzelnen Bestandteile des Versuchsstandes, die Messtechnik und die Versuchsdurchführung werden im Folgenden beschrieben.

### 2.3.1 Silo

Um die höchste Staubkonzentration während der Förderung erfassen zu können ist es zweckmäßig, ein entsprechendes Messnetz über die Höhe und Tiefe des Silos aufzuspannen. Mehr dazu im Kapitel 2.3.3. Um die Messgeräte entsprechend dem gewählten Messnetz innerhalb des Silos positionieren zu können wurde aus dem Bestand des Versuchsfelds ein Silo mit 11 m<sup>3</sup> gewählt, welches über eine hohe Anzahl an Messstutzen verfügt. Eine technische Zeichnung findet sich im Anhang A.1.

In der im Anhang gezeigten technischen Zeichnung verfügt das Silo noch über das mittlere Segment mit einer Höhe von  $h_m = 2,5\text{ m}$ . Dieses wurde für die Versuche allerdings entfernt, da das Silo sonst nicht mit dem auf dem Versuchsfeld vorhandenen Elevator hätte beschickt werden können. Über die an der Silowandung vorhandenen Stutzen können die Staubkonzentrationsmessgeräte über längenvariable Lanzen eingeführt werden. Bei dem Silo handelt es sich um ein Rundsilos mit konischem

Austrag. Die Höhe des zylindrischen Teils beträgt  $h_z = 5,0\text{ m}$  und der Durchmesser beläuft sich auf  $D_S = 1,6\text{ m}$ . Ein am Silokopf befindlicher Flansch wurde mit dem Fallrohr der Fördereinrichtung verbunden. Entleeren lies sich das Silo über eine Absperrklappe am unteren Ende des Silokonus.

### 2.3.2 Fördereinrichtungen

Bild 2.2 zeigt die Fördereinrichtungen, die bei den Versuchen im Technikum zum Einsatz kamen.



Abbildung 2.2 – Befüllung per Elevator (links) und Förderschnecke (rechts)

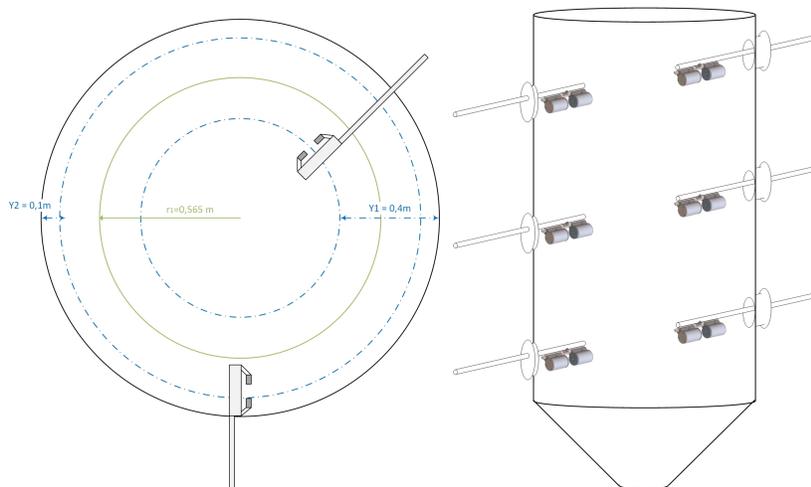
Da die Förderung mechanisch erfolgen sollte, wurden die EN B Pellets zunächst mit einem Becherelevator in das Silo gefördert. Dieser verfügt am Elevatorfuß über einen Vorlagetrichter, der ein Füllvolumen von  $1\text{ m}^3$  aufweist. Aus diesem wurden die Pellets per Metallbecherwerk zum Elevatorkopf gefördert, wo sie über den Auswurfschacht und ein Fallrohr in das Silo eingeleitet wurden. Die Drehzahl und somit die Förderleistung des Elevators ließen sich über einen Frequenzumrichter steuern. Somit war es möglich verschiedene Förderleistungen zu untersuchen. Standardmäßig wurden  $\dot{m} = 10\text{ t/h}$  eingestellt. Allerdings wurden auch Massenströme von  $\dot{m} = 5\text{ t/h}$  und  $\dot{m} = 14\text{ t/h}$  untersucht. Der Elevator kam bei den Untersuchungen mit den EN B Pellets und den Holzhackschnitzeln zum Einsatz.

Im späteren Verlauf des Projektes wurden die EN plus A1 Holzpellets aus Gründen der Handhabbarkeit mittels Förderschnecke in das Silo eingetragen. Hierbei wurde als Vorlage ein Big Bag mit einem Volumen identisch zu dem des Vorlagebehälters des Elevators verwendet. Der Massenstrom

der Förderschnecke ließ sich ebenfalls mittels Frequenzumrichter steuern. Auch hier wurden standardmäßig  $\dot{m} = 10 \text{ t/h}$  untersucht. Für die Holzhackschnitzel musste wie oben erwähnt abermals der Elevator eingesetzt werden, da dieses Schüttgut für die Förderschnecke zu grob und somit für diese Fördereinrichtung nicht geeignet war.

### 2.3.3 Messpunkte

Um die Staubkonzentrationsverteilung und die maximale Staubkonzentration während der Befüllung des Silos zu ermitteln wurden gleichmäßig verteilte Messpunkte gewählt. Die sechs Messgeräte wurden also auf drei unterschiedlichen Höhen zu jeweils zwei unterschiedlichen Tiefen in das Silo eingebracht. Die Rotationssymmetrie des Silos begründet den Umstand, dass pro Ebene zwei unterschiedliche Einschubtiefen mit nur zwei Messgeräten untersucht wurden. Somit entstand eine Messebene am unteren Ende des zylindrischen Teil des Silos, eine Messebene auf halber Höhe und eine Messebene am Silokopf. Auf jeder Messebene wurde die Staubkonzentration in der Nähe der Silowandung und in der Nähe des Zentrums gemessen. Die Abstände der Messgeräte zur Silowandung betragen hierbei  $y_1 = 400 - 450 \text{ mm}$  bzw.  $y_2 = 100 - 150 \text{ mm}$  und wurden über das Schwerelinienverfahren berechnet [8]. Abbildung 2.3 stellt das Verfahren bildlich da.



**Abbildung 2.3** – Bildliche Darstellung des Schwerelinienverfahrens)

Da für jede Ebene 2 Messköpfe zur Verfügung standen, wird hierbei der zu untersuchende Querschnitt in zwei gleichgroße Flächen unterteilt und die Distanz ihrer Schwerelinien zum Außenradius errechnet. Im Falle der EN B Holzpellets wurden auf der obersten Ebene tiefere Einschubdistanzen gewählt, als auf der mittleren und der untersten Messebene. Hier wurden die beiden Messgeräte in einer Distanz von  $y_1 = 600 \text{ mm}$  und  $y_2 = 400 \text{ mm}$  zur Silowandung positioniert.

### 2.3.4 Versuchsprogramm für die Versuche im Technikum

Ziel war die Erfassung des Staubkonzentrationsprofils im Silo. Hierfür wurden die folgenden Parametervariationen untersucht:

1. Reproduzierbarkeit der Staubkonzentrationsmessungen (Versuche mit EN B Pellets).
2. Höhe des Füllstands zu Beginn der Förderung (Versuche mit allen Holzschüttgütern).
3. Höhe des Feinanteils (Versuche mit EN B Pellets).
4. Förderleistung des Förderorgans (Versuche mit EN plus A1 und EN B Pellets).
5. Vergleich der sich ausbildenden Staubkonzentrationsprofile der Schüttgüter.

**Zu 1.:** Zunächst wurden 5 Versuche unter gleichen Bedingungen durchgeführt um eine Aussage über die Reproduzierbarkeit treffen zu können. Hierbei wurden Holzpellets der Klasse EN B mit einer Förderleistung von  $\dot{m} = 10 t/h$  in das leere Silo gefördert.

**Zu 2.:** Es soll untersucht werden, welchen Einfluss der anfängliche Füllstand im Silo auf die sich ausbildende Staubkonzentration hat. Da das freie Volumen mit zunehmendem Füllstand immer geringer wird, sollte die sich ausbildende Staubkonzentration mit dem Füllstand steigen. Für diese Untersuchungen wurden die Schüttgüter im Anlieferungszustand, also gesiebt, verwendet und es werden Füllstände von 0 %, 9 %, 25 %, 50 % und 75 % untersucht.

**Zu 3.:** Wie bereits in Kapitel 2.1.1 beschrieben, kann es bei Holzpellets durchaus vorkommen, dass diese nach dem Pressen mit einem erheblichen Anteil an ungespressten Holzspänen und Holzstaub in das Lagersilo gefördert werden und danach erst abgesiebt werden. Um diese Situation zu untersuchen, musste die benötigte Menge an Feinanteil künstlich zugesetzt werden, da die für die Versuche verwendeten EN-B Pellets gesiebt angeliefert wurden. Dies geschah, indem die Pellets mechanisch belastet und anschließend gesiebt wurden, bis eine entsprechende Menge an Pelletabrieb gesammelt war. Dieser wurde dann der zu untersuchenden Pelletprobe beigemischt, sodass der benötigte Feinanteil erreicht wurde. Mit diesen Proben erfolgten unter anderem ausgewählte Vergleichsversuche zu den Pellets im gesiebten Zustand.

**Zu 4.:** Als weiterer Parameter wurde die Förderleistung des Elevators verändert. Hierbei wurden mit den EN Plus A1 und den EN B (mit 30 % Feinanteil) Holzpellets Versuche durchgeführt, bei denen der Einfluss des Massenstroms auf die sich ausbildende Staubkonzentration innerhalb des Silos untersucht wurde. Der Förderstrom wurde dabei um  $\pm 50\%$  variiert.

**Zu 5.:** Um die Schüttgüter miteinander Vergleichen zu können, wurden diese unter definierten, zuvor ermittelten worst-case Bedingungen untersucht.

### 2.3.5 Versuchsdurchführung der Versuche im Technikum

Im Rahmen dieser Untersuchungen wurde für jeden Versuch eine Schüttgutvorlage mit einem Volumen von  $1\text{ m}^3$  verwendet. Bei Versuchen, bei denen der Becherelevator als Förderorgan zum Einsatz kam, wurde hierbei das Schüttgut vom Big Bag in den Vorlagebehälter des Elevators umgefüllt, die Messtechnik eingeschaltet und die Förderung gerade so lange in Betrieb genommen, bis alle Becher im Aufgangsschacht des Elevators gefüllt waren. Anschließend wurde der Vorlagetrichter des Elevators erneut mit Schüttgut gefüllt. Nach einer erneuten Überprüfung der Steuergeräte der SKGs wurde der Elevator in Betrieb genommen und gleichzeitig die Datenspeicherung am Datenlogger eingeschaltet. Nach einer Förderdauer von in der Regel ca.  $t_f = 90\text{ s}$  (entspricht bei einer Förderleistung von  $\dot{m} = 10\text{ t/h}$  einer Fördermenge von ca.  $m = 250\text{ kg}$  in Abhängigkeit der Schüttdichte des Produktes) wurde die Förderung gestoppt. Die Datenaufzeichnung wurde gestoppt sobald sich das Ausgangssignal stabilisiert hatte. Dies wurde als Beendigung der Sedimentationsphase gedeutet. Anschließend wurden die Messgeräte bei Bedarf gereinigt und der nächste Versuch durchgeführt.

## 2.4 Praxisuntersuchungen

Im Laufe des Projektes ergab sich die Möglichkeit, Staubkonzentrationsmessungen mit groben Schüttgütern in Silozellen im Praxisbetrieb durchführen zu können. Wie bereits in Kapitel 2.1.3 erwähnt, wurden diese Versuche mit Getreide in den Vertriebsilos der ZG Rraiffeisen, die Agrarprodukte erfasst und vermarktet, durchgeführt.

### 2.4.1 Silozellen

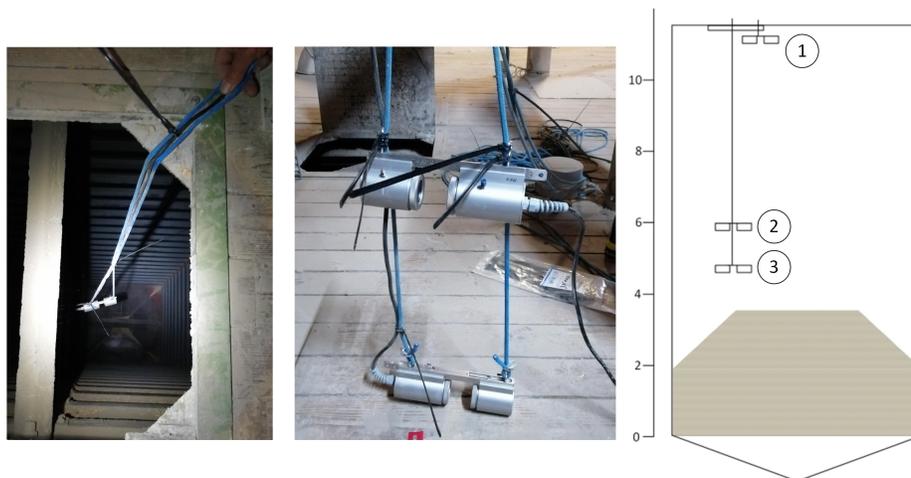
Auf dem Gelände der ZG Raiffeisen wurden Silos mit Volumina von  $55\text{ m}^3$ ,  $145\text{ m}^3$  und  $170\text{ m}^3$  für die Messungen ausgewählt. Bei diesen Silos handelt es sich um quadratische Silozellen innerhalb eines Silogebäudes, welche über Becherelevatoren und Trogkettenförderer befüllt werden. Am Elevatorkopf befindet sich eine Absaugung, die während der Befüllung eingeschaltet werden kann. Zum unteren Auslass hin verlaufen die Silos in Form eines quadratischen Kegelstumpfes. Die Decke der Silozellen bildet den Fußboden des nächsten darüber befindlichen Stockwerkes, in den die oberen Kontrollluken der Silos eingelassen sind. Die  $55\text{ m}^3$  sowie die  $170\text{ m}^3$  Silozellen sind als Silobatterie ausgeführt, deren Wandung aus Glattblech nicht bis zur Decke hochgezogen ist. Somit sind diese Silozellen am Kopf miteinander verbunden. Die  $145\text{ m}^3$  Silozellen sind ebenfalls als Silobatterie ausgeführt. Allerdings sind hier die Silozellen nicht am Kopf miteinander verbunden. Die Wandung dieser Silos besteht aus Trapezblech.

### 2.4.2 Fördereinrichtung

Die Beschickung des Silos erfolgt mit mechanischen Stetigförderern. Zunächst wird das Getreide senkrecht per Elevator auf das oberste Stockwerk des Silogebäudes gefördert. Von hier aus wird das Schüttgut per Kettenförderer horizontal zu der entsprechenden Silobatterie transportiert. Vom Kettenförderer aus gehen Fallrohre zu den einzelnen Silos ab. Diese sind wiederum mit Absperrorganen ausgestattet, welche angesteuert werden, um den Weg zu der entsprechenden Silozelle frei zu geben. Am Elevatorkopf befindet sich eine Aspirationsleitung um die Staubatmosphäre aus der Förderstrecke zu saugen. Die beschriebene Förderkette verfügt über einen Durchsatz von  $\dot{m} = 50 \text{ t/h}$ .

### 2.4.3 Messpunkte

Da die Silozellen im Gegensatz zum Technikumssilo weniger Möglichkeiten boten um die Staubkonzentrationsmessgeräte einzuführen, wurden hier nur zwei Messpunkte untersucht (siehe Abbildung 2.4, rechts).



**Abbildung 2.4** – Anordnung der Messgeräte bei Versuchen im Praxisbetrieb

Einerseits wurde die Staubkonzentration direkt am Kopf der Silozelle gemessen. Hierzu wurde ein Messgerät, in Abbildung 2.4 links zu sehen und rechts im Schemata mit **1** gekennzeichnet, durch die obere Kontrollluke 2 m tief in das Silo abgelassen. Der zweite Messpunkt beschreibt den Konzentrationsverlauf nahe des Schüttkegels. Um einen äquidistanten Bereich oberhalb des Schüttkegels während der Befüllung untersuchen zu können wurden hierfür zwei Messköpfe gleichzeitig verwendet. Ein Messkopf - in Abbildung 2.4 mit **3** markiert - wurde dabei am Ende zweier Seile befestigt. In einem Abstand von 50 cm oberhalb dieses Messkopfes wurde ein weiterer Messkopf (**2**) an den Seilen angebracht (siehe hierzu Abbildung 2.4, Mitte). Beide Geräte wurden in das leere Silo bis auf 2 m

über dem Boden abgelassen. Sobald der sich ausbildende Schüttkegel das Gerät **3** erreichte und somit für eine Verdeckung des Strahlenganges sorgte, lies sich dies über das ausgegebene Sprungsignal feststellen. In diesem Moment wurden beide Geräte um  $2\text{ m}$  hinaufgezogen und gewartet bis Gerät **3** abermals verschüttet wurde, sodass beide Geräte wieder um  $2\text{ m}$  hinaufgezogen wurden. Somit diente Gerät **3** nur als Füllstandssignalgeber, wohingegen mit Gerät **2** die Staubkonzentration gemessen werden konnte.

#### 2.4.4 Versuchsprogramm für die Versuche im Praxisbetrieb

Da die Messungen zum Erntezeitpunkt stattfanden und der tägliche Betrieb der ZG Raiffeisen hierdurch nicht zu sehr gestört werden sollte, wurde lediglich das Silovolumen als variabler Parameter angesetzt. Somit wurde geplant, dass mit jeder Getreidesorte 3 valide Versuche pro Silogröße durchgeführt werden sollten. Hierdurch ergab sich eine geplante Versuchsanzahl von 27 Versuchen. Bei den Messungen mit Weizen war die Absaugung am Elevatorkopf aktiv. Auf die Absaugung wurde bei den Versuchen mit Gerste und Mais aus betrieblichen Gründen verzichtet, allerdings wurden an der  $55\text{ m}^3$  Zelle mit Gerste zwei Vergleichsversuche durchgeführt, die Erkenntnis über den Einfluss der Elevatorkopfabsaugung liefern sollten, die Versuchsanzahl stieg somit auf 29 valide Versuche an.

#### 2.4.5 Versuchsdurchführung der Versuche im Praxisbetrieb

Vor Beginn des Versuchs wurden die Messgeräte eingeschaltet und ein Nullpunktgleich durchgeführt. Nachdem dieser erfolgte wurden die Messgeräte auf Funktion geprüft. Danach wurden die Messköpfe in das Leere Silo hinabgelassen, bis sich der untere Messkopf  $2\text{ m}$  über dem Siloboden befand. Nachdem die Förderung in Betrieb genommen wurde bildete sich der Schüttkegel aus und der Füllstand stieg. Sobald der Schüttkegel so weit angewachsen war, dass der untere Messkopf verschüttet wurde, wurden beide Messgeräte - wie bereits in Kapitel 2.4.3 beschrieben - um  $2\text{ m}$  nach oben versetzt. Diese Prozedur wurde durchgeführt, bis das Silo gefüllt war. Nachdem der obere Füllstandsmelder der Regelung der Fördereinrichtung Signal gab, dass dieses gefüllt war, wurde die Förderung außer Betrieb genommen. Die Messgeräte blieben weiterhin aktiv, um die Sedimentationsphase der Staubwolke zu erfassen. Sobald sich das Signal nicht mehr änderte wurde die Messung beendet und die Daten gesichert. Die Messköpfe wurden aus dem Silo entfernt, gereinigt und die Funktion überprüft. Danach wurde die Messung gestartet und die Messköpfe wurden in die nächste zu untersuchende Silozelle eingeführt. In diese wurde nun das Getreide aus der zuvor untersuchten Silozelle gefördert.

## 2.5 Bestimmung der unteren Explosionsgrenze

Die untere Explosionsgrenze der Stäube wurde im Staublabor der Berufsgenossenschaft für Nahrungsmittel und Gastgewerbe in Mannheim bestimmt. Hierzu wurde das Verfahren, welches in der DIN 14034-3 [9] beschrieben ist, angewendet. Bei dem verwendeten Explosionsbehalter handelt es sich um die im Anhang von [9] beschriebene 20lKugel. Entsprechend der Prüfanweisung aus dieser Norm wird Staub in die 20lKugel dispergiert und nach einer bestimmten Zeit per pyrotechnischem Zünder gezündet und der Explosionsdruckverlauf innerhalb der Kugel aufgezeichnet. Die Menge des zu Beginn eingetragenen Staubes soll hierbei innerhalb der Kugel eine Konzentration von  $c_{20l} = 500g/m^3$  erzeugen. Die Konzentration wird pro Versuch um 50% verringert bis zu einem Wert bei dem keine Explosion mehr erfolgt. Bei dieser Konzentration handelt es sich somit um die untere Explosionsgrenze.

# Kapitel 3

## Messergebnisse

### 3.1 Ergebnisse der Versuche im Technikum

Im folgenden werden die Messergebnisse der Versuche mit den Holzschüttgütern im Technikum behandelt. Hierbei wird der Einfluss der Schüttgutart, des anfänglichen Füllstands, des Feinanteils sowie der Förderleistung des Förderorgans betrachtet.

#### 3.1.1 Reproduzierbarkeit der Versuchsergebnisse

Ein wichtiger Test der Messdaten auf Tauglichkeit ist die Prüfung auf Reproduzierbarkeit. Hierzu werden 5 Versuche unter gleichen Randbedingungen mit Förderung gesiebter Industriepellets in das leere Silo durchgeführt. Die Untersuchung auf Reproduzierbarkeit bestand im Vergleich der maximalen Staubkonzentration an identischen Messstellen. Die Ergebnisse sind in Abbildung 3.1 dargestellt. Zu Erkennen ist, dass die Staubkonzentration bei Versuch Nr. 1 abgesehen von den Messstellen U1 und U2 überall die niedrigsten Werte annimmt. Dies ist darin begründet dass die Förderdauer bei Versuch Nr. 1, kürzer gewählt war als bei den restlichen Versuchen. Weiterhin war der Wassergehalt der Luft bei diesem Versuch deutlich höher als bei den Vergleichsversuchen (siehe Abbildung 3.2). Wie in [10] gezeigt wurde, hängt die Fähigkeit von Stäuben, Staubwolken auszubilden, stark vom Wassergehalt in der Luft ab. Dieser Effekt ist auch der Grund dafür, warum die maximale Staubkonzentration bei Versuch Nr. 13 deutlich geringer ist als bei Versuch Nr. 12. Beide Versuche erfolgten am selben Versuchstag, wobei Nr. 12 in den frühen Morgenstunden durchgeführt wurde. Versuch Nr. 13 erfolgte hingegen zur Mittagszeit, zu der die absolute Luftfeuchte erheblich höhere Werte angenommen hat. Bei den übrigen Versuchen Nr. 2, 11 und 12 ist die Streuung in den Staubkonzentrationsmaxima angesichts der Messaufgabe als durchaus im Rahmen befindlich anzusehen. Somit ist die Reproduzierbarkeit für

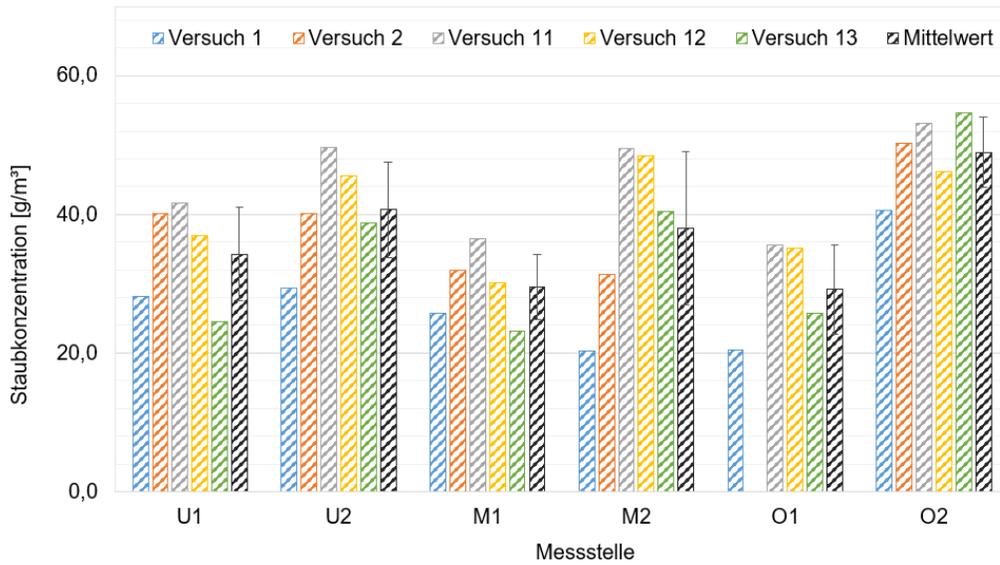


Abbildung 3.1 – Vergleich der maximalen Staubkonzentration der Messstellen  $U_i$ ,  $M_i$  und  $O_i$  bei den Versuchen 1, 2, 11, 12 und 13.

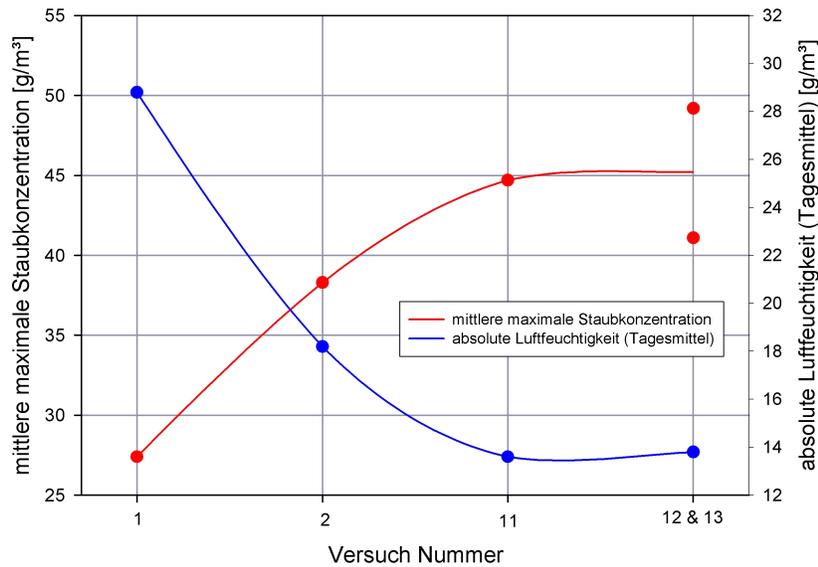


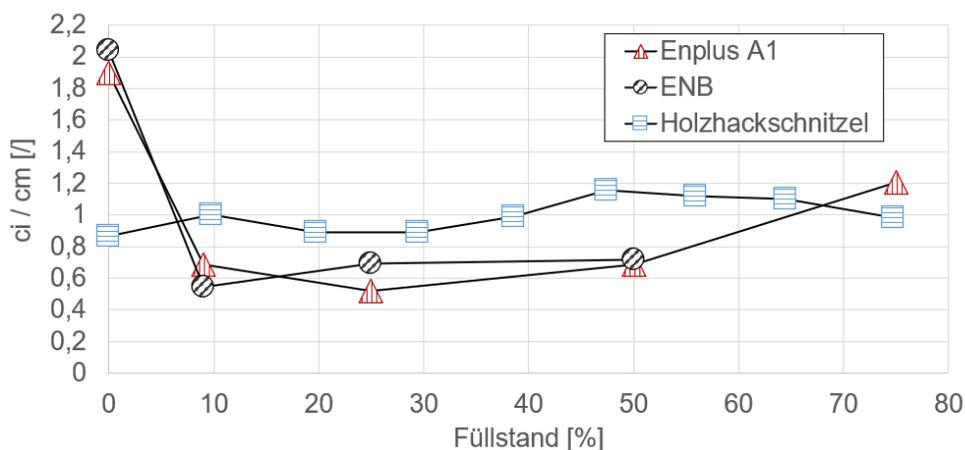
Abbildung 3.2 – Absolute Luftfeuchtigkeit (Tagesmittel) und maximale Staubkonzentration (gemittelt über alle Messstellen) aufgetragen über die Versuchsnummern.

die Versuche im Technikum also gegeben. Die Ergebnisse dieser Versuchssituation sind quantitativ exemplarisch für alle Versuche, die mit Holzschüttgütern durchgeführt wurden. Von daher wird bei dem Einfluss der Förderleistung und des Füllstandes, der qualitative Verlauf betrachtet. Hierbei wird nicht mehr auf jede Messstelle einzeln eingegangen, sondern die mittlere Staubkonzentration im Silo betrachtet.

### 3.1.2 Einfluss des anfänglichen Füllstandes

In Abbildung 3.3 ist die Abhängigkeit der Staubkonzentration im Silo vom Füllstand zu erkennen. Hierbei wurde schüttgutspezifisch die über das gesamte Silo gemittelte Staubkonzentration auf die mittlere Staubkonzentration aller Füllstandsversuche genormt. Bis zu einem Füllstand von 50% wurden alle Schüttgüter untersucht. Höhere Füllstände bis 75 % wurden nur mit EN B Pellets und Hackschnitzeln durchgeführt, da hierfür die benötigte Menge an Haushaltspellets nicht vorlag. Für die Holzpellets ist Abbildung 3.3 zu entnehmen, dass unabhängig von der Pelletart die Staubkonzentration bei der Förderung ins leere Silo die höchsten Werte annimmt (Faktor  $\approx 2$ ). Dies ist mit der Beschaffenheit der Pellets zu begründen. Durch den Aufprall auf den Silokonus werden die Holzpellets stärker mechanisch belastet, als wenn sie auf einen bereits ausgebildeten Schüttgutkegel fallen. Hierdurch splintern Holzpartikel und -späne ab, da es sich bei den Pellets nunmal um gepresste Agglomerate handelt. Bei Füllung des Silos verringert sich die Staubkonzentration auf etwa 54 % (EN B) bzw. 69 % (EN plus A1). Auf einem ähnlichen Niveau verharrt die Staubkonzentration bei weiterer Füllung. Zu dem Füllstand von 50 % hin steigt die Konzentration leicht an (auf 68 % bei EN B und 71 % bei den EN plus A1 Pellets). Zum Füllstand von 75 % nimmt die Konzentration noch einmal höhere Werte für die EN B Pellets an (Faktor 1,2).

Die Ergebnisse der Versuche mit den Holzhackschnitzeln zeigen, dass die Staubkonzentration schwach bis zu einem Füllstand von 47 % auf 110 % ansteigt und mit weiterer Füllung wieder auf 98 % sinkt.



**Abbildung 3.3** – Einfluss des Füllstandes auf die maximale Staubkonzentration bezogen auf die mittlere Staubkonzentration aller Förderleistungen.

### 3.1.3 Einfluss des Feinanteils

Es wurde erwartet, dass die Versuche mit 30 % Feinanteil zu höheren Staubkonzentrationen führen, als diejenigen ohne Feinanteil. Mittelt man die maximalen Staubkonzentrationswerte pro Messebene aller Versuche ohne Feinstaubanteil und aller Versuche mit Feinstaubanteil, so erhält man die in Tabelle 3.1 dargestellten Ergebnisse:

**Tabelle 3.1** – Maximale Staubkonzentration in den Messebenen  $U_i$ ,  $M_i$  und  $O_i$  gemittelt über alle Versuche ohne Feinanteil und über alle Versuche mit Feinanteil.

Messstelle [/]	$U_i$	$M_i$	$O_i$
$\bar{c}_{max,gesiebt} [g/m^3]$	35,3	28,1	37,3
$\bar{c}_{max,30\%} [g/m^3]$	54,8	44,1	42,2

In der unteren Messebene verzeichnete sich mit Feinanteil eine um 55 % bzw 56 % höhere mittlere maximale Staubkonzentration, als bei den Versuchen ohne Feinanteil. In der oberen Messebene machte dieser Unterschied rund 13 % aus. Der größte gemessene Unterschied der Einzelmessungen mit gesiebten und ungesiebten Pellets betrug knapp 80 % (Messstelle  $O_2$  bei Versuch Nr. 13 und  $U_2$  bei Versuch Nr. 10).

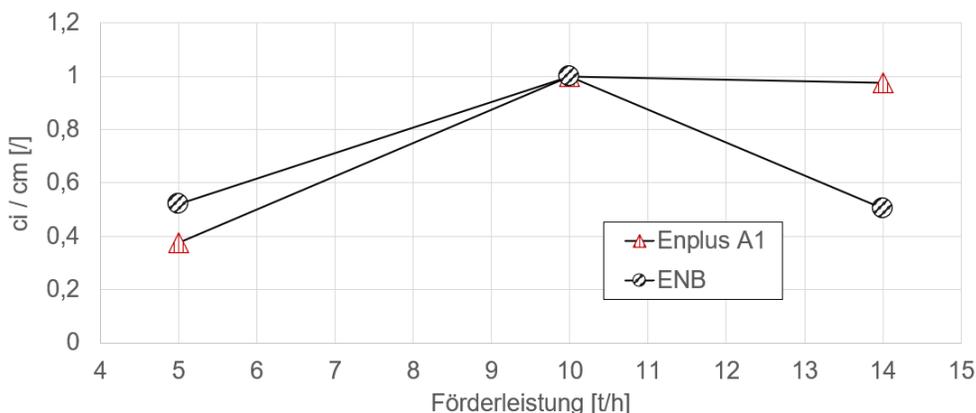
Damit ist nachgewiesen, dass bei der mechanischen Förderung von ungesiebten Holzpellets erheblich höhere Staubkonzentrationen entstehen, als bei der gleichen Förderung von gesiebten Pellets. Die Anzahl der Versuche ist ausreichend groß damit dieses Ergebnis als statistisch gesichert gelten kann.

### 3.1.4 Einfluss der Förderleistung

Um den Einfluss der Förderleistung auf das sich bildende Staubkonzentrationsprofil zu untersuchen, wurden die beiden Holzpelletsorten sowohl mit reduzierter, als auch mit erhöhter Förderleistung von  $\dot{m} = 5 t/h$  und  $\dot{m} = 14 t/h$  in das leere Silo gefördert. Die Staubkonzentration in Abhängigkeit der Förderleistung ist in Abbildung 3.4 dargestellt. Dargestellt ist über die jeweilige Förderleistung die maximale Konzentration bezogen auf die mittlere Konzentration der Standardförderleistung von  $\dot{m} = 10 t/h$ . Diese Förderleistung entspricht der Förderleistung von zwei Pelletpressen, welche in der Praxis laut [5] durchaus Anwendung finden können.

Es ist für beide Pelletsorten zu erkennen, dass sich die Staubkonzentration im Silo bei einer Verringerung der Förderleistung von  $\dot{m} = 10 t/h$  auf  $\dot{m} = 5 t/h$  ebenfalls verringert. Bei den Haushaltspellets stellt sich eine Verringerung auf 52 % der ursprünglichen Förderleistung ein. Die Industriepellets liegen mit 38 % ebenfalls in einem niedrigeren Bereich.

Mit einer Erhöhung der Förderleistung auf  $\dot{m} = 14 t/h$  ergibt sich für beide Pelletsorten allerdings keine Erhöhung der Staubkonzentration. Der Wert für die Haushaltspellets nimmt mit 97 % ähnliche Werte an wie bei einer Förderleistung von  $\dot{m} = 10 t/h$ . Die Staubkonzentration in Verbindung mit



**Abbildung 3.4** – Einfluss der Förderleistung auf die maximale Staubkonzentration bezogen auf die Konzentration bei einer Förderleistung von  $\dot{m} = 10 \text{ t/h}$ .

Industriepellets reduziert sich hingegen auf 38%. Eine Erklärung für dieses Phänomen könnte sein, dass die Pellets bei Erhöhung der Förderleistung mehr Feinstaubanteile mit sich reißen und hierdurch die Staubentwicklung hemmen.

### 3.1.5 Vergleich der sich ausbildenden Staubkonzentrationsprofile der Schüttgüter

Basierend auf den Ergebnissen der vorigen Kapitel kristallisierten sich das leere Silo und eine Förderleistung von  $\dot{m} = 10 \text{ t/h}$  als worst-case Szenario heraus. Mit diesen Parametern wurden die Staubkonzentrationsprofile für alle Schüttgüter ermittelt. Abbildung 3.5 zeigt die Ergebnisse der Staubkonzentrationsprofile der Holzschüttgüter. Da es sich bei dem Silo um einen rotationssymmetrischen Bunker handelt, ist das Silo bildlich nur von der Wandung bis zur axialen Mittellinie dargestellt. Dargestellt ist hierbei pro Messstelle jeweils die mittlere Staubkonzentration. Es werden für die weitere Beschreibung der Ergebnisse die folgenden Indizes verwendet: für Haushaltspellets **HP**, für gesiebte Industriepellets **IP**, für Industriepellets mit 30% Feinanteil **IP,30** und für Holzhackschnitzel **HS**.

Bei den Haushaltspellets zeigt sich, dass die Staubkonzentration, unabhängig vom Messort, recht niedrig ist. Lokal wurde die maximale mittlere Staubkonzentration im unteren Bereich in Wandnähe gemessen. Diese beträgt  $\bar{c}_{HP,max} = 22 \text{ g/m}^3$ . Sie verringert sich in Richtung Silozentrum. Auf der mittleren Ebene ist ebenfalls eine Verringerung der Staubkonzentration von der Silowand in Richtung Silozentrum zu erkennen. Allerdings ist auf beiden Ebenen der Konzentrationsabfall zur Silomitte hin nicht sehr stark ausgeprägt. Im oberen Bereich lässt sich kein Einfluss des Messortes auf die Höhe der Staubkonzentration feststellen.

Die Industriepellets hingegen weisen auf allen Messebenen eine höhere Staubkonzentration als die

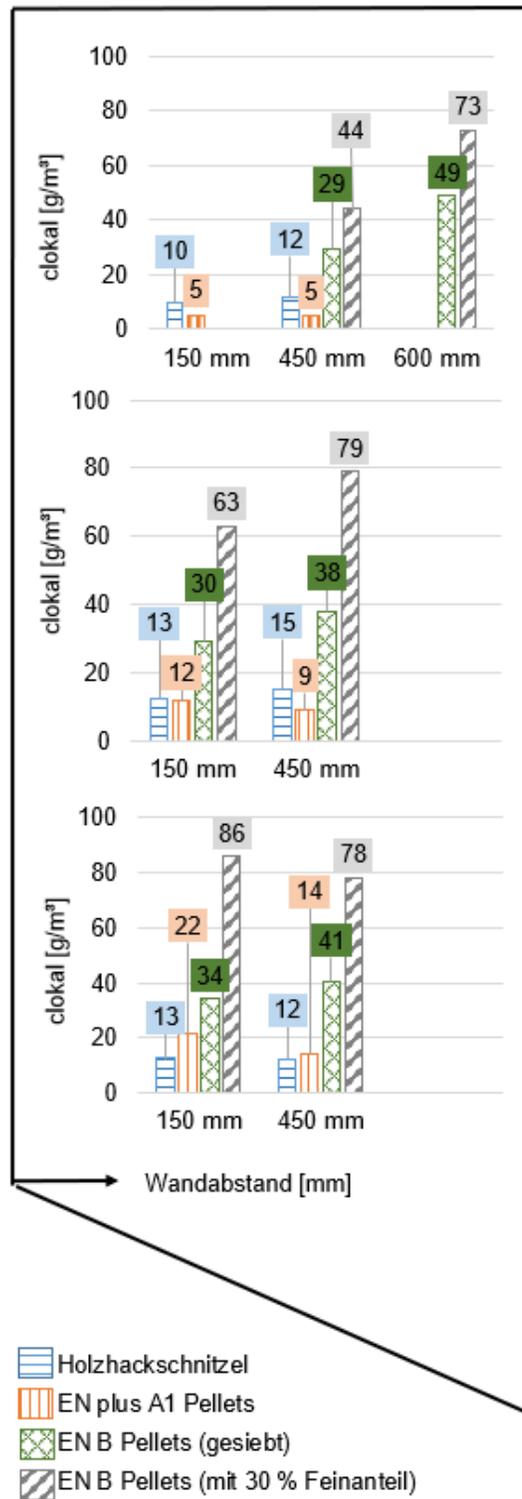


Abbildung 3.5 – Vergleich der Staubkonzentrationsprofile mit Holzschüttgütern bei einer Förderleistung von 10 t/h ins leere Silo.

Haushaltspellets auf. Dies gilt sowohl für die gesiebten Pellets, als auch für die Pellets denen der Feinanteil beigemischt wurde. Das Staubprofil der gesiebten Industriepellets weist folgende Charakteristika auf: Auf allen Ebenen wurde eine Erhöhung der Staubkonzentration zur Mitte hin beobachtet. Diese ist auf der obersten Ebene am stärksten ausgeprägt, wodurch sich auf dieser auch eine Staubkonzentration von  $\bar{c}_{IP,max} = 49g/m^3$  als lokales Maximum ausweisen lässt.

Die Holzpellets mit 30% Feinanteil hingegen zeigen hierzu eine leichte qualitative Abweichung von den Ergebnissen der Versuche mit gesiebten Industriepellets: Hier wurde das lokale Maximum der Staubkonzentration auf der untersten Ebene in Wandnähe gemessen. Diese beträgt  $\bar{c}_{IP,30,max} = 86g/m^3$ . Es ist zu erkennen, dass die Staubkonzentration von der Wand zum Zentrum hin abnimmt. Für die mittlere und die obere Messebene zeigt sich dagegen, dass die Staubkonzentration von der Wand zur Silomitte ansteigt. Dieser Anstieg ist auf der obersten Ebene am stärksten ausgeprägt, jedoch ohne absolutes Maximum im Gegensatz zu den gesiebten Industrieholzpellets.

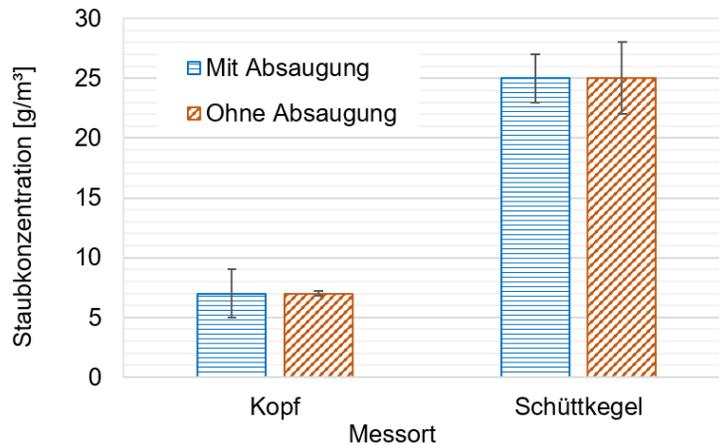
Bei den Holzhackschnitzeln ähnelt das sich bildende Staubkonzentrationsprofil qualitativ dem der Industriepellets, die über einen erhöhten Feinanteil verfügen. Die unterste Ebene stellt hierbei eine Ausnahme dar. Dabei ist kein signifikanter Unterschied zwischen Silozentrum und Silowandung zu erkennen. Auf der mittleren und oberen Ebene steigt sie zur Silomitte hin wieder an. Die höchste Staubkonzentration wurde auf der mittleren Ebene im Bereich der Silomitte gemessen und betrug  $\bar{c}_{HS,max} = 15g/m^3$ .

## 3.2 Ergebnisse der Versuche im Praxisbetrieb

Im folgenden werden die Ergebnisse der Staubkonzentrationsmessungen innerhalb der Silozellen im Praxisbetrieb diskutiert. Betrachtet werden die Ergebnisse für die maximale Staubkonzentration innerhalb der unterschiedlichen Silozellen sowie der Einfluss der Elevatorkopfabsaugung auf die sich ausbildende Staubkonzentration.

### 3.2.1 Einfluss der Elevatorabsaugung

Zur Ermittlung des Einflusses der Elevatorabsaugung fanden Vergleichsversuche mit Gerste statt. Hierbei wurden zwei Versuche mit eingeschalteter Absaugung und 3 Versuche ohne Absaugung durchgeführt. Die Ergebnisse sind in Abbildung 3.6 dargestellt.



**Abbildung 3.6** – Mittlere Staubkonzentrationen am Silokopf und am Schüttkegel innerhalb des  $55\text{ m}^3$  Silos mit aktiver und inaktiver Elevatorkopfabsaugung.

Erkennbar ist, dass die Elevatorabsaugung keinen Einfluss auf die sich ausbildende Staubkonzentration zu haben scheint. Ein Grund könnte hierbei sein, dass die vom Elevator abgesaugte Luft zwar Staubbeladen ist, dies allerdings nicht die Staubpartikel betrifft, die sich im Förderstrom befinden. Da es sich bei den Förderaggregaten um keine ausgewiesenen Windsichter handelt, ist anzunehmen, dass die sich durch Haftreibung an den Körnern befindlichen Staubpartikel während der Förderung zwar lösen, aber innerhalb des Kettenförderers vom Produktstrom mitgerissen werden. Erst im Silo lösen sich diese vom herabfallenden Freistrah und sorgen hierdurch für eine Staub-Luft-Atmosphäre im inneren des Silos.

### 3.2.2 Maximale Staubkonzentration am Silokopf und am Schüttkegel.

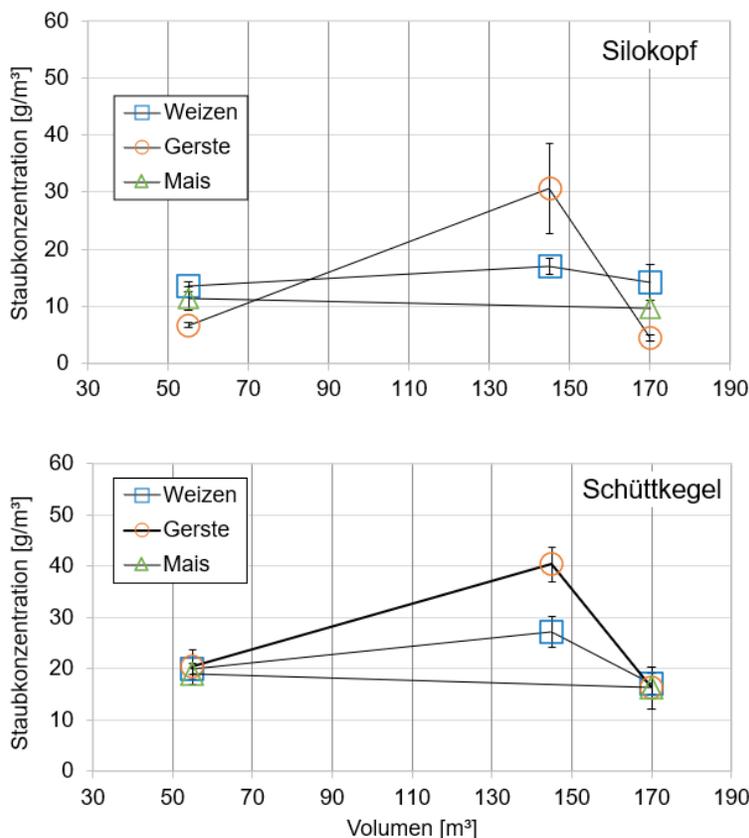
Abbildung 3.7 zeigt die mittlere maximale Staubkonzentration für die Messungen am Silokopf und am Schüttkegel für alle Getreidesorten und Silogrößen.

Für die Messergebnisse am Silokopf des  $55\text{ m}^3$  Silos zeigt sich, dass die mittlere Staubkonzentration bei Gerste mit  $\bar{c}_{GK} = 7\text{ g/m}^3$ , bei Weizen mit  $\bar{c}_{WK} = 13\text{ g/m}^3$  und bei Mais mit  $\bar{c}_{MK} = 11\text{ g/m}^3$  recht niedrige Werte annimmt. Am Schüttkegel wurden höhere Ergebnisse verzeichnet. Hier liegt die mittlere Staubkonzentration für Gerste bei  $\bar{c}_{GSK} = 23\text{ g/m}^3$  und für Weizen als auch Mais bei  $19\text{ g/m}^3$ .

Am  $145\text{ m}^3$  Silo ergibt sich am Silokopf bei der Messung mit Gerste eine mittlere Staubkonzentration von  $\bar{c}_{GK} = 31\text{ g/m}^3$ . Durch die Befüllung mit Weizen wurden lediglich  $\bar{c}_{WK} = 17\text{ g/m}^3$  verzeichnet. Am Schüttkegel hingegen wurde für Gerste im Mittel  $\bar{c}_{GSK} = 40\text{ g/m}^3$  nachgewiesen. Die Staubkonzentration durch die Befüllung mit Weizen, nahm ebenfalls höhere Werte an. Hier kam es zu einer mittleren Konzentration von  $\bar{c}_{WSK} = 31\text{ g/m}^3$ .

Die Staubkonzentration am  $170\text{ m}^3$  Silo nahm am Kopf bei Gerste einen Wert von  $\bar{c}_{GK} = 5\text{ g/m}^3$  an. Bei Weizen ergaben sich  $\bar{c}_{WK} = 14\text{ g/m}^3$  und bei Mais  $\bar{c}_{MK} = 10\text{ g/m}^3$ . Am Schüttkegel ließen sich mittlere Staubkonzentrationen von  $\bar{c} = 16\text{ g/m}^3$  für Gerste als auch Mais und  $\bar{c}_{WSK} = 17\text{ g/m}^3$  für Weizen messen.

Im  $55\text{ m}^3$  und  $170\text{ m}^3$  Silo wurden geringere maximale Staubkonzentrationswerte gemessen als im  $145\text{ m}^3$  Silo. Dies ist vermutlich auf die Tatsache zurückzuführen, dass die kleinsten und die größten Silos am Kopf miteinander verbunden sind und sich somit die Staubwolke auch auf weitere Silozellen ausbreiten kann. Die Staubkonzentration im betrachteten Silo kann dadurch nicht so stark ansteigen wie im rundum abgeschlossenen. Vergleicht man die Ergebnisse des kleinsten und des größten Silos, so ist hier kein signifikanter Unterschied zwischen den Silogrößen beim gleichen Schüttgut zu erkennen. Dementsprechend liegt die Annahme nahe, dass die Staubkonzentration ähnliche Werte wie die der Messungen im  $145\text{ m}^3$  Silo annehmen würde, wenn die Silos am Kopf nicht miteinander verbunden wären.



**Abbildung 3.7** – Maximale Staubkonzentration am Kopf und am Schüttkegel unter Verwendung von Weizen, Gerste und Mais.

### 3.3 Ergebnisse zur Bestimmung der unteren Explosionsgrenze

Für die Bestimmung der unteren Explosionsgrenze wurde die Probe in den Zustand eines sogenannten genormten Muster überführt. Ein Kriterium eines genormten Musters ist die zu untersuchende Partikelgrößenfraktion. Hierbei handelt es sich um die Fraktion mit den Partikelgrößen kleiner  $63 \mu\text{m}$ . Für zwei der sechs Schüttgüter (Mais und EN Plus A1 Pellets) konnte diese Fraktion allerdings nicht verwendet werden, weil die genommene Stichprobe keine Gewichtsanteile in den Fraktionen unterhalb einer Partikelgröße von  $125 \mu\text{m}$  aufwies. Somit beziehen sich die Werte der UEG hier auf die Fraktionen unterhalb  $125 \mu\text{m}$ .

In Tabelle 3.2 wird die Konzentration der unteren Explosionsgrenze für das entsprechende Schüttgut angegeben, wie sie nach Kapitel 2.5 ermittelt wurden.

**Tabelle 3.2** – Untere Explosionsgrenzen des Feinstaubes der untersuchten Schüttgüter

Schüttgut [/]	$c_{UEG} [g/m^3]$
Holzpellets EN plus A1	60
Holzpellets EN B	125
Holzhackschnitzel EN plus A1	30
Weizenkörner	30
Gerstenkörner	60
Maiskörner	$\geq 60$

Es zeigte sich, dass sich die Feinstäube der meisten Schüttgüter, also die der Hackschnitzel und Holzpellets der Güteklasse EN plus A1, sowie die der Getreidekörner bei einer Konzentration von  $60 g/m^3$  nicht mehr entzünden ließen. Zu den Maiskörnern ist zu bemerken, dass deren Abrieb, aus der vor Ort genommenen Probe, nicht ausreichend war, um im Labor höhere Konzentrationswerte als  $60 g/m^3$  zu untersuchen. Daher ist in Tabelle 3.2 angegeben, dass die untere Explosionsgrenze mehr als  $60 g/m^3$  betragen muss.

Die Feinstaubanteile der Holzpellets der Güteklasse EN B wiesen eine untere Explosionsgrenze von  $125 g/m^3$  auf und lagen somit oberhalb der UEG des Feinstaubes der EN plus A1 Holzpellets. Hier wird vermutet, dass dies auf den erhöhten zulässigen Rindenanteil der Industriepellets zurückzuführen ist, da Rinde über schlechtere Verbrennungseigenschaften verfügt. Für den Feinanteil der Holzhackschnitzel wurde eine UEG von  $30 g/m^3$  ermittelt. Da es sich bei den Holzhackschnitzeln um das reinste Produkt der untersuchten Holzschüttgüter handelt, scheint dies auch plausibel. Ebenfalls nimmt die UEG des Weizens einen Wert von  $30 g/m^3$  an. Dieser Wert ist aus der Gestis Staub-Ex-Datenbank ermittelt, da die ursprüngliche Probe aufgrund von Schädlingsbefall nicht mehr für eine Kennzahlermittlung geeignet war.

# Kapitel 4

## Diskussion und Fazit

Ziel des Projektes war es eine Aussage über das Staubexplosionsrisiko bei der mechanischen Befüllung von Silos mit stückigem abrasivem Schüttgut treffen zu können. Dieses Kapitel widmet sich der Erfüllung der vorgegebenen Projektziele sowie der Diskussion und Einordnung der Messergebnisse.

### 4.1 Erfüllung der vorgegebenen Projektziele

Die Erfüllung der in der Einleitung beschriebenen Teilziele wird nun mit den durchgeführten Versuchen überprüft:

1. **Für alle zu untersuchenden Schüttgüter ist der worst-case Zustand zu betrachten. Hieraus ergibt sich, dass alle Schüttgüter ungesiebt untersucht werden sollen.**

Erfüllt wurde dieses Ziel, indem bei den Versuchen im Technikum durch Variation der Förderleistung, des anfänglichen Füllstands und des Feinanteils zunächst ermittelt wurde, welche Parameter zu den höchsten Staubkonzentrationen innerhalb des Silos führen. Diese Parameter wurden dann als Standard angesetzt um das Staubkonzentrationsprofil für die jeweiligen Schüttgüter zu ermitteln. Es wurden zudem Vergleichsversuche zwischen gesiebten und ungesiebten Holzpellets durchgeführt um den Einfluss des Feinanteils zu untersuchen. Im Praxisbetrieb ließ die vorhandene Technik keine große Variation zu, sodass hier nur ermittelt werden konnte, welchen Einfluss die Elevatorabsaugung hatte. Da hier kein Einfluss festgestellt werden konnte, ließen sich die Originalbetriebsabläufe als worst-case Zustand definieren.

2. **Es soll eine Auswahl an groben Schüttgütern untersucht werden, die Teil der folgenden Produktarten sind:**

- (a) **Holzpellets,**
- (b) **Holzhackschnitzel,**
- (c) **Getreide.**

Diese Forderung wurde mit der Wahl von Holzpellets der Klassen EN plus A1 und EN B, Holzhackschnitzeln der Klasse EN plus A1 sowie von ungereinigtem Weizen, Gerste und Mais erfüllt.

3. **Die Untersuchung sollte anwendungsorientiert erfolgen. Hierdurch ergaben sich mechanische Förderorgane als Befüllmethode.** Durch die Wahl des Elevators und der Förderschnecke während der Technikumsversuche erfüllt. Untermauert wurde die Erfüllung dieser Anforderung zudem durch die Messungen in den Silozellen der ZG Raiffeisen.

4. **Es sollen das Staubkonzentrationsprofil und die maximale Staubkonzentration im Silo während der Befüllung in Echtzeit gemessen werden.**

Durch die Versuchsdurchführung berücksichtigt und erfüllt.

5. **Die Ergebnisse der Staubkonzentrationsmessungen sind mittels der für jeden Staub zu ermittelnden unteren Explosionsgrenze zu bewerten.**

Die untere Explosionsgrenze wurde für jeden Staub ermittelt. Die Einordnung der Messergebnisse erfolgt im nächsten Abschnitt.

## 4.2 Diskussion der Messergebnisse

Im Folgenden wird betrachtet, ob es zu einer, für die Auftrittswahrscheinlichkeit einer Explosion nötigen, staubexplosionsfähigen Atmosphäre innerhalb der Explosionsgrenzen kommen kann. Hierfür werden die Messergebnisse der Staubkonzentrationsmessungen herangezogen. Bei den im Technikum durchgeführten Untersuchungen zeigte sich, dass die Holzpellets der Güteklasse EN B ein Vielfaches der Staubkonzentration der Haushaltspellets und der Holzhackschnitzel hervorriefen und somit das kritischste Produkt hinsichtlich der absoluten Staubkonzentrationswerte darstellten. Im Praxisbetrieb nahm die Staubkonzentration die durch die Förderung von Gerste bedingt war, die höchsten Werte an. Da die untere Explosionsgrenze allerdings, wie in Kapitel 3.3 gezeigt, nicht für alle Schüttgüter identisch ist, wird nachfolgend unabhängig vom Messort die höchste mittlere Staubkonzentration produktspezifisch der entsprechenden unteren Explosionsgrenze gegenübergestellt.

**Tabelle 4.1** – Produktspezifische Gegenüberstellung der unteren Explosionsgrenze und der gemessenen Konzentrationen

Produkt [/]	$c_{UEG}$ [ $g/m^3$ ]	$\bar{c}_{max}$ [ $g/m^3$ ]	$c_{UEG}/\bar{c}_{max}$ [/]
Holzpellets EN plus A1	60	22	0,36
Holzpellets EN B	125	86	0,68
Holzhackschnitzel	30	15	0,50
Weizen	30	26	0,87
Gerste	60	44	0,73
Mais	$\geq 60$	19	0,32

Es ist zu erkennen, dass die mittlere Staubkonzentration in zwei Fällen unter 50 % der UEG blieb. Die niedrigste Konzentration wurde bei der Verwendung von Mais und Holzpellets der Klasse EN plus A1 ermittelt (32 % und 36 % der UEG). Wie in Kapitel 3.3 bereits erwähnt wurden für die Feinanteile der EN plus A1 Pellets und des Mais die UEG für die Fraktion, deren Partikel kleiner als  $125 \mu m$  waren, bestimmt. Es ist bekannt, dass innerhalb eines Schüttguts die untere Explosionsgrenze mit der betrachteten Fraktion proportional abnimmt [11]. Angenommen, die EN Plus A1 Pellets würden nun nennenswerte Fraktionen unterhalb  $125 \mu m$  aufweisen, so würde die UEG mit hoher Wahrscheinlichkeit einen geringeren Wert als  $60 g/m^3$  annehmen. Selbst wenn die UEG für die Fraktion deren Partikel kleiner  $63 \mu m$  sind bei  $30 g/m^3$  liegen würde, so würde die durch die Förderung bedingte Staubkonzentration nicht zu einer explosionsfähigen Atmosphäre führen. Eine analoge Betrachtung ist auf die Ergebnisse mit Mais anzuwenden.

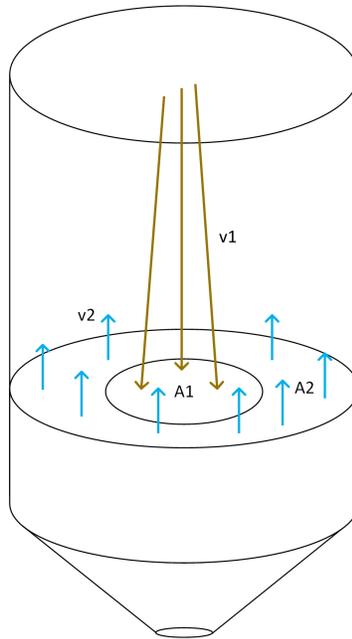
Die Holzhackschnitzel bedingten eine Staubkonzentration von 50 % der UEG. Erhöhte Werte wurden bei den ungesiebten Holzpellets der Klasse EN B und bei Gerste festgestellt. Hier erreichte die Konzentration 68 % bzw. 73 % der UEG. Den höchsten Wert erreichte Weizen mit 87 % der UEG. Dieser Wert liegt zwar mit 87 % am nächsten an der UEG allerdings überschreitet er diese nicht. Somit wird dieser Wert als unkritisch eingeschätzt, zumal die UEG laut [9] die Konzentration beschreibt bei der unter Laborbedingungen keine Zündung der Staub-Luft-Atmosphäre erreicht wurde.

Für die Einordnung der Messwerte ist es wichtig den Messfehler der Staubkonzentrationsmessgeräte zu diskutieren. Während der Messung setzt sich mit zunehmender Messdauer eine dicker werdende Staubschicht auf den Linsen ab. Diese Verschmutzung wird bei der Messwertaufbereitung herausgerechnet. Allerdings kann es auch hier zu Ungenauigkeiten kommen. Daraus resultiert, dass die Messwerte eher leicht nach oben abweichen und der reale Messwert sogar tiefer liegt, als ausgewiesen. Somit ist hier ein weiterer Sicherheitsfaktor bei der Bewertung der Ergebnisse vorhanden.

Weiterhin wird die Fraktion welche für die UEG Bestimmung herangezogen wurde, auf Plausibilität

geprüft, indem verfahrenstechnische Methoden zur Ermittlung der tatsächlich gemessenen Fraktionen herangezogen werden. Hierzu ist eine Abschätzung der größten Korngröße welche durch den Auftrieb innerhalb des Silos bedingt ist, notwendig. Diese wird auch Grenzpartikelgröße genannt. Diese Grenzpartikelgröße wird beispielhaft unter Zuhilfenahme der EN B Pellets ermittelt. Als erste Näherung wird postuliert, dass das herabfallende Schüttgut die Luft im Silo durch Reibungseffekte mit sich Richtung Fuß des Silos reißt, wobei die Luftströmung auf die Geschwindigkeit des herabfallenden Schüttguts beschleunigt wird. Vereinfacht betrachtet wird die Luftströmung verlustfrei am Fuß des Silos in einer torusförmigen Bewegung umgekehrt, wodurch der Feinstaub nach oben getragen wird.

Somit entstehen zwei auf zwei Flächen innerhalb des Silos entgegengesetzte Strömungen. Die erste Fläche beschreibt den freien Querschnitt, den das herabfallende Schüttgut einnimmt. Visuelle Auswertungen während der Versuche am AZO Silo haben ergeben, dass sich der Durchmesser des sich im Freistrahл befindlichen Schüttgutstroms vom Silokopf in Richtung Siloboden verdreifacht (siehe Abbildung 4.1).



**Abbildung 4.1** – Vereinfachte Annahme der Strömungsvektoren innerhalb des Silos.

Unter diesen Bedingungen ergibt sich über die Höhe des Silos für die Holzpellets eine maximale Fallgeschwindigkeit von  $v_{FF} = 7,5 \text{ m/s}$ . Entsprechend der strömungsmechanischen Kontinuitätsgleichung (4.1) ergibt sich für die Geschwindigkeit der Luftströmung.

$$v_1 = \frac{v_2 \cdot A_2}{A_1} = \frac{7,5 \text{ m/s} \cdot 0,407 \text{ m}^2}{1,60 \text{ m}^2} = 1,91 \text{ m/s} \quad (4.1)$$

Durch Strömungsmessungen im betrachteten Silo fand [12] heraus, dass die maximale vom Boden Richtung Silokopf gerichtete Luftgeschwindigkeit unter Beschickung des Silos mittels pneumatischer Fördereinrichtungen  $2\text{ m/s}$  beträgt. Somit scheint der oben errechnete Wert plausibel, wenn berücksichtigt wird, dass die Beschickung im untersuchten Fall mechanisch erfolgte wodurch sich geringere Luftgeschwindigkeitsvektoren einstellen müssten als bei der pneumatischen Förderungen welche in der Arbeit von [12] verwendet wurde.

Der Auftrieb der Partikel lässt sich verfahrenstechnisch gut mit den Berechnungsgrundlagen für Windsichter beschreiben. Zur Ermittlung der Grenzpartikelgröße wird [13] herangezogen. Zunächst wird als charakteristische Kennzahl die Ljasčenko-Zahl  $\Omega$  gemäß Gleichung (4.2) berechnet.

$$\Omega = \frac{v_{rel}^3 \cdot \psi^{-3/2} \cdot \rho_f^2}{\eta_f \cdot \Delta\rho \cdot g} = 85,21 \quad (4.2)$$

Es sind:

- $v_{rel} = 2\text{ m/s}$  die Relativgeschwindigkeit zwischen aufsteigender Luft und absinkendem Partikel
- $\psi = 0,66$  die Sphärizität (Formfaktor) des betrachteten Partikels
- $\rho_f = 1,2\text{ kg/m}^3$  die Fluidichte
- $\eta_f = 1,82 \cdot 10^{-5}\text{ Pa s}$  die dynamische Viskosität des Fluids
- $\Delta\rho = 1398,8\text{ kg/m}^3$  die Differenz der Partikeldichte zur Fluidichte
- $g = 9,81\text{ m/s}^2$  die Erdbeschleunigung.

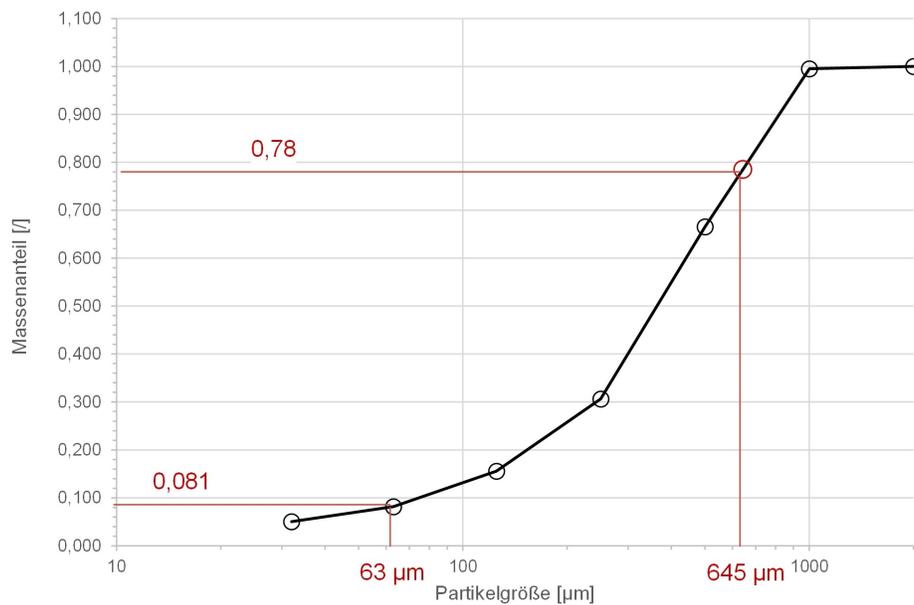
Befindet sich die Strömung im Stokes- und Übergangsbereich (charakterisiert durch  $Re < 3 \cdot 10^3$  und  $\Omega < 9 \cdot 10^3$ ) wird die Reynoldszahl gemäß Gleichung (4.3) ermittelt. Im Folgenden wird überprüft, ob die Reynoldszahl Werte annimmt, die für den Stokes- und Übergangsbereich gelten.

$$Re = \frac{\Omega}{16} \cdot \left( 1 + \sqrt{1 + 48 \cdot \sqrt{\frac{2}{\Omega}}} \right)^2 = 80,6 \rightarrow Re < 3 \cdot 10^3 \checkmark \quad (4.3)$$

Mit der Reynoldszahl lässt sich nach Gleichung (4.4) der Durchmesser des Grenzpartikels ermitteln.

$$x_{pm} = Re \cdot \frac{\eta_f}{v_{rel} \cdot \rho_f} = 645\ \mu\text{m} \quad (4.4)$$

Die ermittelte Grenzkornpartikelgröße zeigt, dass sich in der Luft aufgewirbelten Staubpartikel weit größer sind, als die Fraktionen, welche für die Bestimmung der unteren Explosionsgröße herangezogen wurden. In Abbildung 4.2 ist die Partikelgrößenverteilung der EN B Pellets gezeigt.



**Abbildung 4.2** – Partikelgrößenverteilung des Abriebs der EN B Pellets

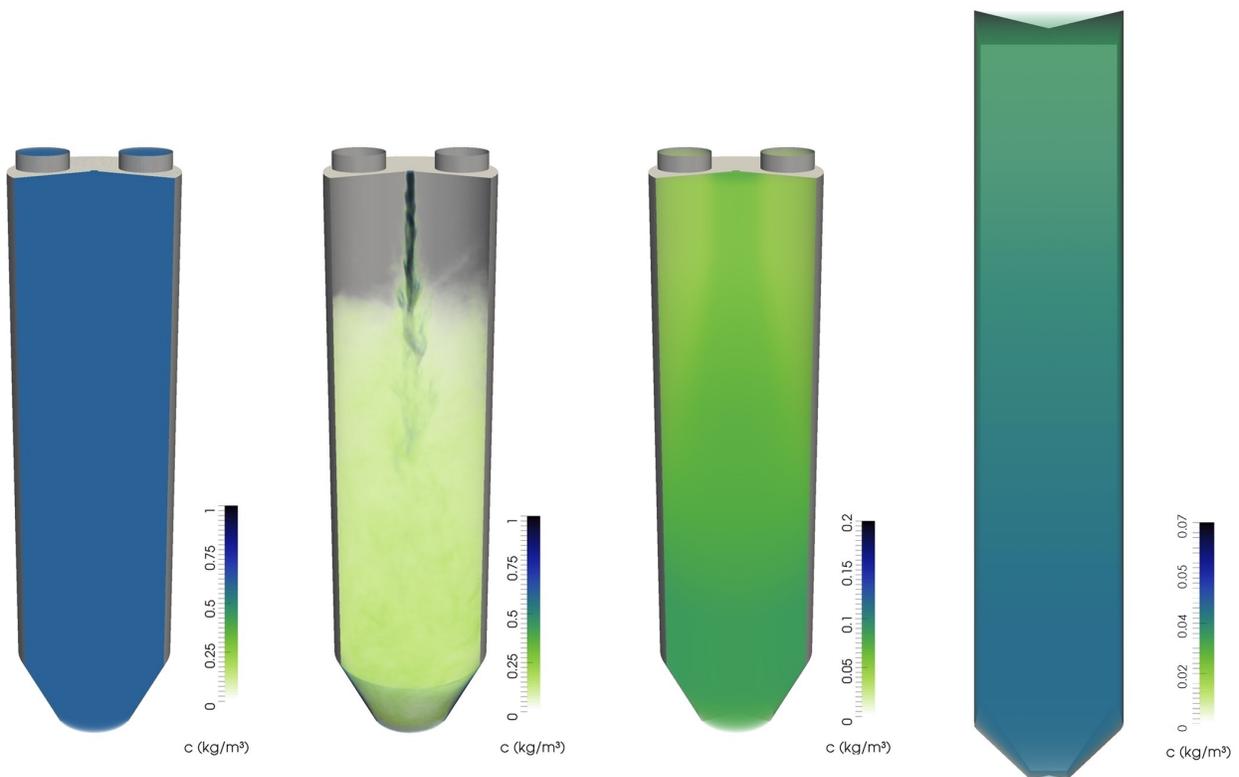
Durch die Grenzkorngröße von  $645 \mu\text{m}$  wurden 78% der Partikel innerhalb des Feinanteils der Pellets durch die Messung erfasst. Dem gegenüber steht die Fraktion an der die UEG ermittelt wurde. Hierbei handelt es sich gerade mal um 8 % des Massenanteils. Bezogen auf den Grenzkorndurchmesser beträgt der Massenanteil der Partikel mit einer Korngröße  $< 63 \mu\text{m}$  innerhalb der Staubwolke gerade mal 10 %, wodurch sich die gemessene Staubkonzentration für die relevante Fraktion von  $86 \text{ g}/\text{m}^3$  auf gerundet  $9 \text{ g}/\text{m}^3$  reduziert. Im Umkehrschluss bedeutet dies, dass die ausgewiesenen unteren Explosionsgrenzen für die real vorhandenen Fraktionen innerhalb der Staubwolke viel zu niedrig ausgewiesen sind, wodurch sich ebenfalls ein weiterer Sicherheitsfaktor in der Bewertung der Ergebnisse einstellt.

Es soll eine weitere Bewertung angeführt werden, für den Fall, dass der Feinanteil einmal höhere Werte annehmen könnte. In Abbildung 4.3 werden die Messergebnisse in Relation zu Annahmen gesetzt, welche für die Auslegung von konstruktiven Explosionsschutzmaßnahmen Anwendung finden. Betrachtet werden hierbei die Messergebnisse der Versuche, bei denen in die leeren Silos gefördert wurde, wobei sich die höchsten Staubkonzentrationen ausbildeten. Bei der ersten Annahme handelt es sich um die homogene Staubverteilung im ganzen Silo ohne spezifische Fördereinrichtung. Bei diesem Ansatz herrscht im gesamten Silo auf jedem inneren Koordinatenpunkt die gleiche Staubkonzentration. Diese befindet sich hierbei in dem optimalen Bereich bezüglich des maximalen  $K_{St}$ -Werts.

Die zweite Situation beschreibt die Staubkonzentration innerhalb des Silos wenn die Förderung pneumatisch zentral von oben erfolgt. Dabei ist eine nach DIN EN 14491 [14] spezielle Situation beschrie-

ben, für die bereits nachgewiesen ist, dass sich kein kritisches Staubkonzentrationsprofil ausbildet. In dem in Abbildung 4.3 gezeigten Fall wurde ein Staubkonzentrationsprofil simuliert, wie es sich bei der pneumatischen Förderung von 1 kg Maisstärke in das AZO Silo hinein, ausbreitet.

An dieser Stelle muss auf den in Abbildung 4.3 verwendeten Messbereich hingewiesen werden. Für die ersten beiden beschriebenen Situationen wurde eine Skala von  $c_{MB} = 0 \text{ g/m}^3 - 1000 \text{ g/m}^3$  gewählt um die entsprechend hohe Konzentration abbilden zu können. Für die Darstellung der Messergebnisse wurde ein Messbereich von  $c_{MB} = 0 \text{ g/m}^3 - 200 \text{ g/m}^3$  beim AZO Silo und  $c_{MB} = 0 \text{ g/m}^3 - 70 \text{ g/m}^3$  bei den ZG Silozellen verwendet, um überhaupt eine Ortsabhängigkeit der Staubkonzentration sichtbar zu machen.



**Abbildung 4.3** – **Links:** Theoretische Annahme der homogenen Konzentrationsverteilung.  
**2.v.l.:** Simulierte Konzentrationsverteilung bedingt durch pneumatische Förderung mit zentraler Einleitung.  
**2.v.r.:** Konzentrationsverteilung welche bei den Messungen am AZO Silo mit EN B Pellets ermittelt wurde.  
**rechts:** Konzentrationsverteilung welche bei den Messungen in den ZG Silozellen mit Gerste ermittelt wurde.

Hierdurch ist gut erkennbar, dass die Messergebnisse sowohl durch die Versuche im Technikum als auch in der betrieblichen Praxis weit entfernt von der theoretischen angenommen homogenen Staubverteilung

lung liegen. Auch die pneumatische Förderung zentral ins Silo bedingt leicht höhere Staubkonzentrationen als in dem untersuchten Fall mit mechanischer Beschickung. Diese Feststellung ist elementar für die folgende Überlegung:

Für die Beurteilung der Schwere einer möglichen Auswirkung ist nicht alleine die Tatsache relevant, ob irgendwo im Silo die UEG überschritten wird oder werden kann, sondern insbesondere auch die Frage nach der räumlichen Ausdehnung eines explosionsfähigen Staub-Luft-Gemisches. Mit den Versuchen ist nachgewiesen, dass im Normalbetrieb einerseits die Staubkonzentration an keinem Punkt die produktspezifische UEG überschreitet und andererseits das Staubkonzentrationsprofil keine homogene Staubverteilung innerhalb des Silos aufweist. Welche Auswirkung kann nun allerdings eine leichte punktuelle Erhöhung der Staubkonzentration über die UEG bedeuten? Diese Situation wäre infolge von seltenen Störfällen durchaus möglich. Den Messergebnissen folgend wäre aufgrund der Inhomogenität eine Überschreitung der UEG am ehesten in der Nähe des Schüttkegels denkbar, wobei in anderen Teilen des Silos die Konzentration auch steigen könnte, diese allerdings Werte unterhalb der UEG annehmen würde. Im Mittel würde auf das Gesamtvolumen des Silos bezogen somit eine Konzentration entstehen, welche deutlich unterhalb der optimalen Konzentration liegt, wodurch Staubexplosionsschutzeinrichtungen nicht auf Basis der maximalen Staubexplosionskenngrößen ausgelegt werden müssten. Demnach könnte in Fällen in denen die Risikoanalyse der zu schützenden Anlage zeigt, dass eine Erhöhung der Konzentration aufgrund von sehr seltenen Störungen nicht auszuschließen ist, ein geringerer K-Wert in Form eines  $K'$  (siehe Abbildung 4.4) für Auslegung der konstruktiven Schutzeinrichtungen angewendet werden, wodurch sich beispielsweise die Größe von Druckentlastungsflächen reduzieren ließe.

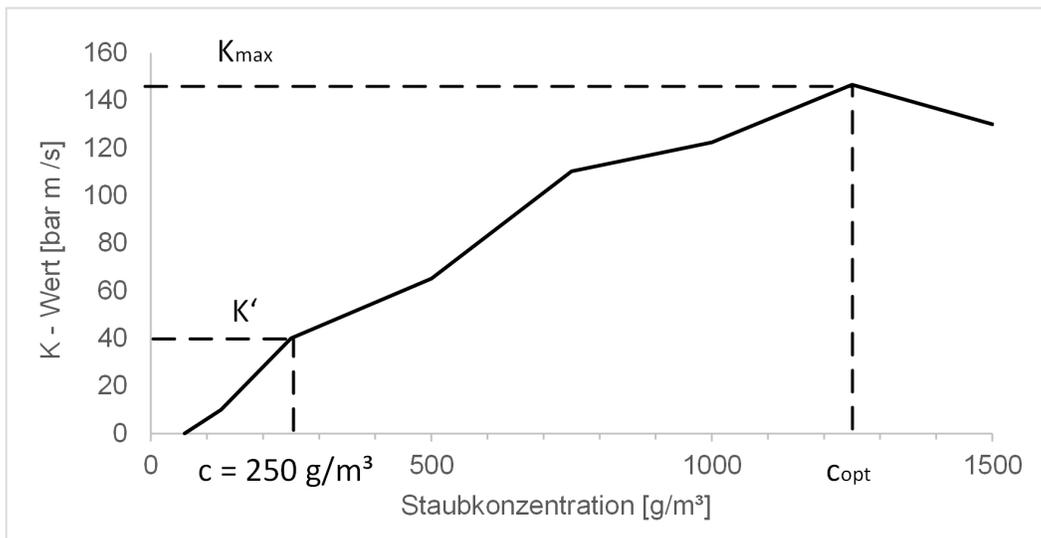


Abbildung 4.4 – K-Wert in Abhängigkeit der Staubkonzentration.

Die höchste nachgewiesene UEG der Feinanteile der untersuchten Schüttgüter als genormtes Muster betrug  $c_{UEG} = 125 \text{ g/m}^3$ , was bedeutet, dass das Staub-Luft-Gemisch hier bei den Untersuchungen nicht mehr zur Zündung gebracht wurde. Wählt man nun die Fraktion, bei der es zur Zündung kam (welche hier  $250 \text{ g/m}^3$  beträgt) so lässt die Differenz zum tatsächlichen Messwert (ca.  $9 \text{ g/m}^3$  für Partikelgrößen  $< 63 \mu\text{m}$ ) genug Varianz zu um einerseits den Worst-case abzubilden und andererseits die Entlastungsfläche auch nicht zu klein zu dimensionieren.

Entsprechend der in diesem Kapitel diskutierten Ergebnisse und getroffenen Annahmen, lassen sich folgende Aussagen zusammenfassen:

- Die untere Explosionsgrenze bezogen auf das genormte Muster wird im Normalbetrieb nicht überschritten
- Da die untere Explosionsgrenze des Urmusters naturgemäß größere Werte annimmt als die des genormten Musters, ist hier im Normalbetrieb auch nicht von einer Überschreitung auszugehen.
- Die größten Werte nimmt die Staubkonzentration in der Nähe des Schüttkegels an.
- Sollte sich die Staubkonzentration bedingt durch eine sehr seltene Störung über die untere Explosionsgrenze hinaus erhöhen, so ist nicht davon auszugehen, dass dabei die optimale Konzentration erreicht wird. Hierdurch ließen sich für die Auslegung von Explosionsdruckentlastungsflächen Explosionskenngrößen heranziehen, welche bei geringeren Staubkonzentrationen als der optimalen Konzentration auftreten.

# Literaturverzeichnis

- [1] W. BARTKNECHT: „Explosionsschutz - Grundlagen und Anwendung“, Springer, 1993.
- [2] VDI: VDI Richtlinie 2263 - „Staubbrände und Staubexplosionen, Gefahren - Beurteilung - Schutzmaßnahmen“, Juli 2018.
- [3] S. RADANDT: Private Mitteilung, Forschungsgesellschaft für angewandte Systemsicherheit und Arbeitsmedizin e.V., 2015.
- [4] DIN: DIN EN ISO 17225-2:2014-09 „Biogene Festbrennstoffe - Brennstoffspezifikation und -klassen - Teil 2: Klassifizierung von Holzpellets (ISO 17225-2:2014); Deutsche Fassung EN ISO 17225-2:2014“, September 2014.
- [5] K. MEYER: Private Mitteilung, Neuero Farm- und Fördertechnik GmbH, Melle-Buer, 2015.
- [6] DIN: DIN EN ISO 17225-4:2014-09 „Biogene Festbrennstoffe - Brennstoffspezifikation und -klassen - Teil 4: Klassifizierung von Holzhackschnitzeln (ISO 17225-4:2014); Deutsche Fassung EN ISO 17225-4:2014“, September 2014.
- [7] B. SCHMIDT: „Untersuchung der Staubwolkenentstehung durch Befüllvorgänge mit Holzpellets“, Hochschule Mannheim und Forschungsgesellschaft für angewandte Systemsicherheit und Arbeitsmedizin e.V., Oktober 2015.
- [8] VDI / VDE: VDI / VDE Richtlinie 2640, Blatt 3:1983-11 „Netzmessungen in Strömungsquerschnitten; Bestimmung des Gasstromes in Leitungen mit Kreis-, Kreisring- oder Rechteckquerschnitt.“, Berlin November 1983.
- [9] DIN: DIN EN 14034-3:2006 „Bestimmung der Explosionskenngrößen von Staub/Luft-Gemischen - Teil 3: Bestimmung der unteren Explosionsgrenze UEG von Staub/Luft-Gemischen;Klassifizierung; Deutsche Fassung EN 14034-3:2006“, August 2006.
- [10] K. LAUER: „Untersuchung des Einflusses der elektrostatischen Aufladung von Stäuben auf die Neigung dieser Stäube zur Staubwolkenbildung.“, Forschungsgesellschaft für angewandte Systemsicherheit und Arbeitsmedizin e.V. und Hochschule Mannheim, 2003.

- [11] R. DOBASHI: „Risk of explosions of cumbustible nanomaterials“, Journal of Physics.: Conf. Ser. 170 012029, 2009.
- [12] F. HAUERT ET.AL. : „Staubverteilung und Geschwindigkeitsparameter in einem pneumatisch befüllten Silo mit numerischen Simulationen.“, Berufsgenossenschaft für Nahrungsmittel Mannheim und Battelle, Ingenieurtechnik, Eschborn, VDI Berichte ,1996.
- [13] W. FRITZ: „Mechanische Verfahrenstechnik 1“, Skriptum zur Vorlesung, Mannheim 2011.
- [14] DIN: DIN EN 14491:2012-10 „Schutzsysteme zur Druckentlastung von Staubexplosionen; Deutsche Fassung EN 14491:2012“, Oktober 2012.

# Abbildungsverzeichnis

1.1	Bildlicher Zusammenhang der Kriterien einer Staubexplosion . . . . .	2
2.1	SKG 5 Typ 7 und Typ 18 . . . . .	7
2.2	Mechanische Befüllung . . . . .	9
2.3	Schwerelinienverfahren . . . . .	10
2.4	Anordnung der Messgeräte bei Versuchen im Praxisbetrieb . . . . .	13
3.1	Reproduzierbarkeit der Versuche . . . . .	17
3.2	Einfluss der Luftfeuchte auf die Staubkonzentration . . . . .	17
3.3	Einfluss des Füllstands . . . . .	18
3.4	Einfluss der Förderleistung . . . . .	20
3.5	Vergleich der Staubkonzentrationsprofile . . . . .	21
3.6	Einfluss der Elevatorabsaugung . . . . .	23
3.7	Ergebnisse Praxisbetrieb . . . . .	24
4.1	Vereinfachte Annahme der Strömungsvektoren innerhalb des Silos. . . . .	29
4.2	Partikelgrößenverteilung des Abriebs der EN B Pellets . . . . .	31
4.3	Vergleich theoretische Annahme, Simulation und Messung . . . . .	32
4.4	K-Wert in Abhängigkeit der Staubkonzentration . . . . .	33
A.1	Montageplan AZO Silo . . . . .	40
A.2	Extinktionskoeffizient EN B Pellets . . . . .	41
A.3	Extinktionskoeffizient DIN A Plus Pellets . . . . .	42

A.4	Extinktionskoeffizient Holzhackschnitzel . . . . .	43
A.5	Extinktionskoeffizient Weizenkörner . . . . .	44
A.6	Extinktionskoeffizient Gerste . . . . .	45
A.7	Extinktionskoeffizient Maisabrieb . . . . .	46

Anhang A

Anhang



FSA	Bestimmung der Staubungsverhaltens von Schüttgütern nach VDI 2263 Blatt 9					Datum: 25.06.2015		
						Prüfer: Schoenherr		
Produkt-identifikation	Produktbezeichnung	Pelletabrieb <i>ENB</i>						
	ProduktNr.	F-05-1401	Probenort	MA				
	Lieferant	EVO / Benjamin Schmidt Dynamostr. 7 68165 - Mannheim						
Produkt-eigenschaften	Produktfeuchte	Wert in %				Prüfverfahren		
		7				Trockenschrank		
	Schüttdichte	Wert in g/cm <sup>3</sup>				Prüfverfahren		
		0,405				SMG 53466		
	Korngrößenverteilung	Werte Q3 in %				Prüfverfahren		
<500µm		<250µm	<125µm	<63µm	<32µm	Luftstrahlsieb		
	30,1	15,5	8,1	5,0	3,0			
Umgebungseigenschaften	Lufttemperatur	21 °C						
	relative Luftfeuchte	56 %						
Probenaufbereitung	keine							
Kalibrierung	Staubsaammplättchen	1	2	3	4	5		
	Staubmasse in mg	0,9	2,80	4,1	8,5	11,9		
	Messspannung mV	170	336	535	821	896		
	Koeffizienten	ε in m <sup>2</sup> /g		B <sub>2</sub>		B <sub>1</sub>		
0,160		-0,03205363		-1000				
Messung	Nummer	1		2		3		
	Rückwaage in kg	2,176		2,268		2,224		
	Staubungszahl S <sub>i</sub>	7,86		8,08		8,31		
Staubungszahl		8,08						
Standardabweichung in %		2,27						
Staubungsgruppe		3						
Abweichung vom Verfahren		Produkt wurde mehrmals in den Probenbehälter gegeben						

Abbildung A.2 – Extinktionskoeffizient EN B Pellets

FSA	Bestimmung der Staubungsverhaltens von Schüttgütern nach VDI 2263 Blatt 9					Datum: 09.06.2017		
						Prüfer: Benjamin Schmidt		
Produkt-identifikation	Produktbezeichnung	Holzpellets A plus (Abrieb)						
	ProduktNr.	Intern	Probenort	Kappelrodeck				
	Lieferant	Wohl und Warm / /-						
Produkt-eigenschaften	Produktfeuchte	Wert in %				Prüfverfahren		
	Schüttdichte	Wert in g/cm <sup>3</sup>				Prüfverfahren		
		0,343						
	Korngrößenverteilung	Werte Q3 in %				Prüfverfahren		
<500µm		<250µm	<125µm	<63µm	<32µm			
Umgebungseigenschaften	Lufttemperatur	22,6 °C						
	relative Luftfeuchte	49,3 %						
Probenaufbereitung	Urmuster							
Kalibrierung	Staubsaammelplättchen	1	2	3	4	5		
	Staubmasse in mg	1,2	2,7	3,2	4,2	5,3		
	Messspannung mV	95	311	384	556	651		
	Koeffizienten	ε in m <sup>2</sup> /g			B <sub>2</sub>		B <sub>1</sub>	
0,148			-0,02956619		-1000			
Messung	Nummer	1		2		3		
	Rückwaage in kg	1810		1768		1731		
	Staubungszahl S <sub>i</sub>	8,08		8,60		7,92		
Staubungszahl		8,20						
Standardabweichung in %		3,58						
Staubungsgruppe		3						
Abweichung vom Verfahren								

Abbildung A.3 – Extinktionskoeffizient DIN A Plus Pellets

FSA	Bestimmung der Staubungsverhaltens von Schüttgütern nach VDI 2263 Blatt 9					Datum: 27.09.2019
						Prüfer: Benjamin Schmidt
Produkt-identifikation	Produktbezeichnung	Feinanteil Holz hackschnitzel				
	ProduktNr.		Probenort			
	Lieferant	Benjamin Schmidt Ganseck 4 77876 - Kappelrodeck				
Produkt-eigenschaften	Produktfeuchte	Wert in %				Prüfverfahren
	Schüttdichte	Wert in g/cm <sup>3</sup>				Prüfverfahren
	Korngrößenverteilung	Werte Q3 in %				Prüfverfahren
		<500µm	<250µm	<125µm	<63µm	<32µm
Umgebungseigenschaften	Lufttemperatur	°C				
	relative Luftfeuchte	%				
Probenaufbereitung						
Kalibrierung	Staubsaammelplättchen	1	2	3	4	5
	Staubmasse in mg	2,8	8,0	15,4	21,7	34,8
	Messspannung mV	433	790	940	976	981
	Koeffizienten	ε in m <sup>2</sup> /g		B <sub>2</sub>		B <sub>1</sub>
0,173		0,03370672		1000		
Messung	Nummer	1		2	3	
	Rückwaage in kg	1323,7		1362,4	1384,6	
	Staubungszahl S <sub>i</sub>	6,48		7,39	7,94	
Staubungszahl		7,27				
Standardabweichung in %		8,30				
Staubungsgruppe		3				
Abweichung vom Verfahren						

Abbildung A.4 – Extinktionskoeffizient Holz hackschnitzel

FSA	Bestimmung der Staubungsverhaltens von Schüttgütern nach VDI 2263 Blatt 9					Datum: 22.05.2018		
						Prüfer: Benjamin Schmidt		
Produkt-identifikation	Produktbezeichnung	Weizenkörner ungereinigt						
	ProduktNr.		Probenort	Kappelrodeck				
	Lieferant	-						
Produkt-eigenschaften	Produktfeuchte	Wert in %					Prüfverfahren	
		-						
	Schüttdichte	Wert in g/cm <sup>3</sup>					Prüfverfahren	
		-						
	Korngrößenverteilung	Werte Q3 in %					Prüfverfahren	
<500µm		<250µm	<125µm	<63µm	<32µm			
-		-	-	-	-			
Umgebungseigenschaften	Lufttemperatur	21 °C						
	relative Luftfeuchte	60,1 %						
Probenaufbereitung	Urmuster							
Kalibrierung	Staubsaammelplättchen	1	2	3	4	5		
	Staubmasse in mg	0,2	0,9	3,1	7,4	9,2		
	Messspannung mV	59	209	341	834	870		
	Koeffizienten	ε in m <sup>2</sup> /g			B <sub>2</sub>		B <sub>1</sub>	
0,174			-0,03483709		-1000			
Messung	Nummer	1		2		3		
	Rückwaage in kg							
	Staubungszahl S <sub>i</sub>	1,94		2,19		2,07		
Staubungszahl		2,07						
Standardabweichung in %		5,10						
Staubungsgruppe		2						
Abweichung vom Verfahren								

Abbildung A.5 – Extinktionskoeffizient Weizenkörner

FSA	Bestimmung der Staubungsverhaltens von Schüttgütern nach VDI 2263 Blatt 9					Datum: 28.08.2020		
						Prüfer: B. Schmidt		
Produkt-identifikation	Produktbezeichnung	Gerstenkörner						
	ProduktNr.		Probenort					
	Lieferant	ZG Raiffeisen (Vertrieb)						
Produkt-eigenschaften	Produktfeuchte	Wert in %				Prüfverfahren		
	Schüttdichte	Wert in g/cm <sup>3</sup>				Prüfverfahren		
	Korngrößenverteilung	Werte Q3 in %				Prüfverfahren		
		<500µm	<250µm	<125µm	<63µm	<32µm		
Umgebungseigenschaften	Lufttemperatur	°C						
	relative Luftfeuchte	%						
Probenaufbereitung								
Kalibrierung	Staubensammelplättchen	1	2	3	4	5		
	Staubmasse in mg	0,9	1,1	2,4	5,3	8,9		
	Messspannung mV	83	228	370	607	815		
	Koeffizienten	ε in m <sup>2</sup> /g			B <sub>2</sub>		B <sub>1</sub>	
0,161			0,03144426		1000			
Messung	Nummer	1		2		3		
	Rückwaage in kg							
	Staubungszahl S <sub>i</sub>	2,05		2,29		2,10		
Staubungszahl		2,14						
Standardabweichung in %		4,87						
Staubungsgruppe		2						
Abweichung vom Verfahren								

Abbildung A.6 – Extinktionskoeffizient Gerste

**Staubkonzentrationsmessung - Kalibrierung mit Ethanol-Methode**

Produkt: Maisabrieb  
 Auftraggeber: Benjamin Schmidt

Datum: 05.05.2021

Menge Ethanol 96%: 240 ml  
 Küvette: 91 mm

**Messung der Probe: Maisabrieb gesiebt <250 µm**

**1. Durchgang**

Einwaage [mg]	C [g/m <sup>3</sup> ]	U [mV]
0	0	0
6	25	210
6	50	390
12	100	623
24	200	826
24	300	908
72	600	955

e= 0,104 m2/g  
 B1= 1000  
 B2= 0,02030047

**2. Durchgang**

Einwaage [mg]	C [g/m <sup>3</sup> ]	U [mV]
0	0	0
6	25	224
6	50	393
12	100	619
24	200	828
24	300	908
72	600	958

e= 0,105 m2/g  
 B1= 1000  
 B2= 0,02046726

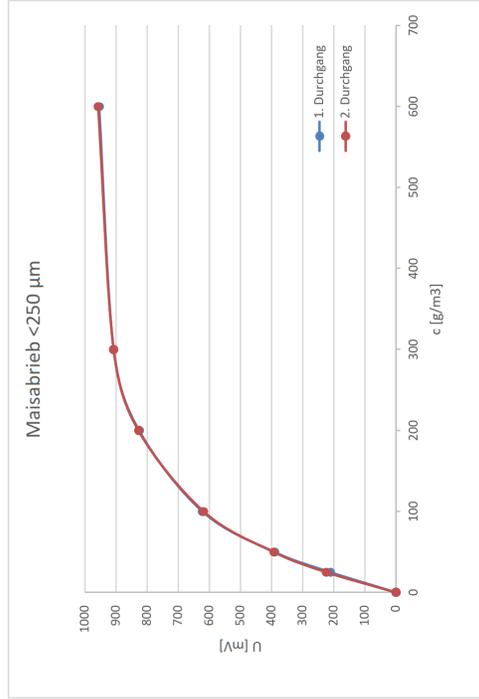


Abbildung A.7 – Extinktionskoeffizient Maisabrieb