

Anwendbarkeit der Auslegungskriterien für  
die Schutzmaßnahme  
„Explosionsdruckentlastung“ gemäß VDI  
2263-8.1 bzw. CEN/TR 16829 auf  
Rundschachtelevatoren

**Masterarbeit**

von

Tobias König

Hochschule Mannheim

und

Forschungsgesellschaft für angewandte Systemsicherheit und  
Arbeitsmedizin (FSA)

Kappelrodeck, April 2021

# Erklärung

Hiermit versichere ich, dass ich die vorliegende Arbeit selbständig verfasst und keine anderen als die angegebenen Quellen und Hilfsmittel verwendet habe.

Kappelrodeck, 26. April 2021

-----  
(Tobias König)

# Vorwort

Diese Arbeit wurde bei der Forschungsgesellschaft für angewandte Systemsicherheit und Arbeitsmedizin (FSA e.V) am Standort Kappelrodeck erarbeitet. Ziel dieser Arbeit ist es, die Anwendbarkeit der in VDI 2263-8.1 bzw. CEN/TR 16829 beschriebenen Kriterien zur Dimensionierung und Anordnung von Druckentlastungseinrichtungen an Rechteckelevatoren, auf Elevatoren mit runden Schächten zu untersuchen.

Ich möchte mich bei allen, die mich während meines Studiums und beim Gelingen dieser Arbeit tatkräftig unterstützt haben, vielmals bedanken.

Ich danke Prof. Dr. Bernhard Hoffner für die Bereitschaft diese Arbeit seitens der Hochschule Mannheim zu betreuen.

Ganz besonders danke ich Peter Schepp für die freundliche, herzliche und sehr kompetente Unterstützung sowie das entgegengebrachte Vertrauen. Er hat die Arbeit für die FSA betreut und ermöglichte das selbständige wissenschaftliche Arbeiten in hervorragender Arbeitsatmosphäre.

Weiterhin bedanke mich besonders bei Dr. Albrecht Vogl für die entgegengebrachte Unterstützung und Hilfsbereitschaft jeglicher Art.

Des Weiteren bedanke ich mich bei Hans Wolf, Felix Deibel, Markus Roth und Wendelin Fischer für die freundliche und fachlich sehr kompetente Unterstützung bei der Vorbereitung und Durchführung von Explosionsversuchen sowie generell für die große Hilfsbereitschaft und gute Arbeitsatmosphäre .

Die Arbeit der vergangenen Monate hat mir ausgesprochen große Freude bereitet. Ich konnte spannende Sachverhalte untersuchen und mir viel neues Wissen in diversen Bereichen aneignen. Hierfür möchte ich mich bei allen Kolleginnen und Kollegen der FSA/BGN Mannheim herzlich bedanken.

# Inhaltsverzeichnis

<b>Symbolverzeichnis</b>	<b>III</b>
<b>Glossar</b>	<b>V</b>
<b>Zusammenfassung</b>	<b>1</b>
<b>1 Einleitung</b>	<b>3</b>
1.1 Zielsetzung . . . . .	4
1.2 Lösungsweg . . . . .	4
1.3 Aktueller Kenntnisstand . . . . .	4
<b>2 Kennzahlermittlung und Produktauswahl</b>	<b>8</b>
2.1 Kennzahlermittlung . . . . .	8
2.1.1 untere Explosionsgrenze (UEG) . . . . .	9
2.1.2 Mindestzündenergie (MZE) . . . . .	9
2.1.3 Mindestzündtemperatur (MZT) . . . . .	9
2.1.4 Staubungsneigung ( $S_N$ ) . . . . .	9
2.2 Produktauswahl . . . . .	10
2.3 Versuchsdurchführung . . . . .	11
2.4 Datenauswertung und Ergebnisse . . . . .	13
<b>3 Explosionsversuche am Rundschachtelevator</b>	<b>16</b>
3.1 Versuchsaufbau . . . . .	16
3.2 Versuchsdurchführung . . . . .	20
3.2.1 Versuchsprogramm . . . . .	20
3.2.2 Versuchsablauf . . . . .	20
3.3 Datenauswertung . . . . .	23
3.3.1 Explosionsdruck . . . . .	23
3.3.2 Flammenlaufzeit und mittlere Flammengeschwindigkeit . . . . .	25

<b>4</b>	<b>Ergebnisse</b>	<b>27</b>
4.1	Flammenausbreitung . . . . .	27
4.2	Mittlere Flammengeschwindigkeit . . . . .	32
4.3	Maximaler Explosionsdruck . . . . .	34
4.4	Maximaler Explosionsdruck von Rund- und Rechteckschachtelevator . .	38
<b>5</b>	<b>Diskussion</b>	<b>43</b>
5.1	Konsequenz für die Anwendbarkeit von geltenden Auslegungskriterien für Rundschachtelevatoren . . . . .	47
5.2	Ausblick . . . . .	49
	<b>Abbildungsverzeichnis</b>	<b>53</b>
	<b>Tabellenverzeichnis</b>	<b>57</b>
<b>A</b>	<b>Messergebnisse explosionstechnische Kenngrößen</b>	<b>59</b>
<b>B</b>	<b>Messergebnisse Rundschachtelevator</b>	<b>61</b>
<b>C</b>	<b>Messergebnisse Rechteckschachtelevator</b>	<b>67</b>
<b>D</b>	<b>Abbildungen - Vergleich von Rund- und Rechteckschachtelevator</b>	<b>72</b>
<b>E</b>	<b>Zeichnungen und Datenblätter</b>	<b>77</b>

# Symbolverzeichnis

Symbol	Einheit	Bedeutung
$A$	$\text{m}^2$	Fläche
$a_B$	mm	Bechertiefe
$A_E$	$\text{m}^2$	Entlastungsfläche
$A_{E,K}$	$\text{m}^2$	Entlastungsfläche Elevatorkopf
$A_{E,S}$	$\text{m}^2$	Entlastungsfläche Elevatorschacht
$A_{E,F}$	$\text{m}^2$	Entlastungsfläche Elevatorfuß
$A_F$	$\text{m}^2$	Freie Querschnittsfläche
$a_S$	mm	Schachttiefe
$A_S$	$\text{m}^2$	Querschnittsfläche Elevatorschacht
$b_B$	mm	Becherbreite
$b_S$	mm	Schachtbreite
$B$	Becher/m	Becherbelegung
$B_Z$	-	Brennbarkeit
$c_S$	$\text{g}/\text{m}^3$	Staubkonzentration
$d$	mm	Schachtdurchmesser (Rundschacht)
$d_B$	mm	Becherabstand
$(dp/dt)_{\text{ex}}$	bar/s	maximaler zeitlicher Druckanstieg einer Versuchsreihe
$(dp/dt)_{\text{m}}$	bar/s	maximaler zeitlicher Druckanstieg eines Einzelversuches
$(dp/dt)_{\text{max}}$	bar/s	maximaler zeitlicher Druckanstieg
$e$	diverse	Messungenauigkeit $e = \sqrt{e_1^2 + e_2^2 + e_3^2}$
$E_i$	J	Zündenergie
$f$	mm	Folienstärke
$F$	Ma-%	Produktfeuchte
$GM$	-	Genormtes Muster
$GT$	$^{\circ}\text{C}$	Glimmtempetratur
$H$	m	Sensorabstand
$k$	diverse	Vertrauensintervall
$K$		Skalierungsfaktor
$K_{\text{St}}$	bar·m/s	Explosionstechnische Kenngröße
$L$	m	Gesamtlänge
$\dot{m}_P$	t/h	Förderleistung
$MZE$	mJ	Mindestzündenergie
$MZT$	$^{\circ}\text{C}$	Mindestzündtemperatur
$OEG$	$\text{g}/\text{m}^3$	obere Explosionsgrenze

$p$	bar	Explosionsdruck
$p_{ci}$	bar	Durch chemische Zünder verursachter Explosionsdruck
$p_{dyn}$	bar	dynamischer Ansprechdruck
$p_{ex}$	bar	maximaler gemessener Explosionsdruck einer Versuchsreihe
$p_m$	bar	maximaler gemessener Explosionsdruck eines Einzelversuches
$p_{m,P}$	bar	maximaler gemessener Explosionsdruck einer Messposition
$p_{max}$	bar	maximaler Explosionsdruck
$p_{min}$	bar	- explosionstechnische Kenngröße nach VDI 2263-8.1 bzw. CEN/TR 16829 geltende Mindestfestigkeit von Rechteckschachtelevatoren
$p_{red}$	bar	reduzierter Explosionsdruck
$p_{stat}$	bar	statischer Ansprechdruck
$\rho_S$	kg/m <sup>3</sup>	Schüttdichte
$s$	mm	Wandabstand
$s_h$	mm	Wandabstand hinten
$s_s$	mm	Wandabstand seitlich
$s_v$	mm	Wandabstand vorne
$S_N$	-	Staubungszahl/Staubungsneigung
$t_f$	ms	Flammenlaufzeit
$t_v$	ms	Zündverzögerungszeit
$t_{v,eff}$	ms	effektive Zündverzögerungszeit
$u$	diverse	Messunsicherheit $u = k \cdot e$ mit $k=2$ (95 %)
$U$	V	Spannung
$UEG$	g/m <sup>3</sup>	untere Explosionsgrenze
$UM$	-	Urmuster
$V$	m <sup>3</sup>	Volumen
$v_B$	m/s	Fördergeschwindigkeit
$V_B$	L	Bechervolumen
$\bar{v}_f$	m/s	mittlere Flammengeschwindigkeit
$\bar{v}_{f,ex}$	m/s	maximale mittlere Flammengeschwindigkeit einer Versuchsreihe
$\bar{v}_{f,m}$	m/s	maximale mittlere Flammengeschwindigkeit eines Einzelversuch
$\bar{v}_{f,max}$	m/s	maximale mittlere Flammengeschwindigkeit

# Glossar

<b>Begriff</b>	<b>Definition</b>
Becherwerk	Durch Umlenkrollen geführtes Gurtband eines Becherelevator mit daran befestigten Förderbechern.
explosionsfähige Atmosphäre	Gemisch aus Luft und brennbaren Stoffen (Hier in Form von Stäuben) unter atmosphärischen Bedingungen [2].
Elevatorfuß	Gehäuse mit Umlenk- oder Antriebsrolle und Produktaufnahme am unteren Ende eines Becherelevator.
Elevatorkopf	Gehäuse mit Umlenk- oder Antriebsrolle und Produktabwurf am oberen Ende eines Becherelevator.
Elevatorschacht	Unterteilt in Förder- und Rücklaufschacht. Siehe Glossar Förderschacht bzw. Rücklaufschacht.
Entlastungsflächenkonfiguration	Anordnung der mit Einrichtungen zur Explosionsdruckentlastung versehenen Entlastungsöffnungen.
Explosionsverlauf	Gemessene maximale Explosionsdrücke $p_{m,P}$ in Abhängigkeit der Messposition eines Einzelversuches.
Flammenlaufzeit	Ab dem Zündsignal gemessene Zeit, die eine Flamme zum Erreichen eines Flammensensor benötigt.
Förderschacht	Rechteckiges oder rundes Gehäuse zwischen Elevatorkopf und Elevatorfuß eines Becherelevator, in dem sich das Gurtband mit montierten Förderbechern aufwärts bewegt.
Genormtes Muster (GM)	Nach [3] / [4] standardisierte Staubprobe zur Bestimmung der explosionstechnischen Kenngrößen $p_{max}$ und $K_{St}$ .
$K_{St}$ -Wert	Explosionstechnische Kenngröße zur Charakterisierung der Druckanstiegsgeschwindigkeit in Behältern und Räumen bei Staubexplosionen [1].



maximaler Explosionsdruck	Maximaler Überdruck bei einer Staubexplosion im geschlossenen Behälter bei optimaler Staubkonzentration [1].
Messposition	Position am Versuchselevator verbauter Druck- und Flammensensoren.
mittlere Flammengeschwindigkeit	Berechnet aus dem Quotienten der Flammenlaufzeit zwischen zwei Flammensensoren und dem Abstand der entsprechenden Messpositionen.
Mindestfestigkeit	Mindestens erforderliche Festigkeit eines Becherelevator bei Druckstoßfester Bauweise in Kombination mit Explosionsdruckentlastung.
Normalbetrieb	Betriebszustand eines Becherelevator in dem kontinuierlich Produkt transportiert wird.
Rücklaufschacht	Rechteckiges oder rundes Gehäuse zwischen Elevatorkopf und Elevatorfuß eines Becherelevator, in dem sich das Gurtband mit montierten Förderbechern abwärts bewegt.
reduzierter Explosionsdruck	Maximaler Überdruck bei einer Staubexplosion im druckentlasteten Behälter [1].
statischer Ansprechdruck	Differenzdruck bei dem sich der Verschluss einer Druckentlastungseinrichtung öffnet.
Zündverzögerungszeit	Zeit zwischen Zugabe des Staub/Luft-Gemisches und dem Wirksamwerden der Zündquelle [1].
UEG: untere Explosionsgrenze	stoffspezifische, minimale Staubkonzentration, bei der eine Staubexplosion möglich ist.
Urmuster (UM)	Unveränderte Staubprobe zur Bestimmung der explosionstechnischen Kenngrößen $p_{max}$ und $K_{St}$ .
Versuchsserie	Mit identischem Produkt und Variation der Entlastungsflächenkonfiguration durchgeführte Versuche.
Versuchsreihe	Mit identischem Produkt und identischer Entlastungsflächenkonfiguration durchgeführte Versuche.
wirksame Zündquelle	Zündquelle mit hinreichend großer Energiemenge um eine explosionsfähige Atmosphäre zu entzünden [1].

zündwilligste  
Zusammensetzung

Staub-Luft-Gemisch mit der für die Entstehung von  
Staubexplosionen günstigsten Staubkonzentration.

# Zusammenfassung

Ziel dieser Arbeit war die Untersuchung der Fragestellung wie sich Staubexplosionen in Rundschachtelevatoren ausbreiten, und ob die in geltenden Richtlinien und Technical Reports (VDI 2263-8-1 bzw. CEN/TR 16829) definierten Auslegungsempfehlungen für Explosionsdruckentlastung von Becherelevatoren mit rechteckigen Schächten in Kombination mit explosionsdruckstoßfester Bauweise, auch auf Becherelevatoren mit runden Schächten anwendbar sind. Hierfür wurde ein Versuchsprogramm erarbeitet, welches bereits vorhandene Messdaten von Explosionsversuchen an Rundschachtelevatoren ergänzte. Dabei wurden verschiedene *Entlastungsflächenkonfigurationen*<sup>1</sup> berücksichtigt. Es wurden mögliche geeignete Produkte für Explosionsversuche an einem Rundschachtelevator recherchiert, untersucht und bewertet. Zwei geeignete Produkte wurden beschafft, und die explosionstechnischen Kenngrößen  $p_{\max}$  und  $K_{St}$  wurden in einer 20 L Laborapparatur bestimmt. Anschließend wurden die geplanten Explosionsversuche im Realmaßstab an einem Versuchselevator vorbereitet und durchgeführt. Die erhaltenen Messdaten wurden ausgewertet.

Bei den durchgeführten Versuchen wurden fünf verschiedene Formen der Flammenausbreitung mit unterschiedlichen Häufigkeiten beobachtet. Es wurde festgestellt, dass die auftretenden *maximalen mittleren Flammengeschwindigkeiten* mit Abnahme der Anzahl der Entlastungsflächen und der Zunahme des  $K_{St}$ - Werts des Staubes zunehmen. Das Auftreten der maximalen Flammengeschwindigkeiten wurde in 69 % der durchgeführten Versuche in einer Höhe zwischen  $H=1$  m und  $H=4$  m in den Elevatorschächten beobachtet. Es wurde keine Korrelation zwischen der Flammenausbreitung und dem Ort der maximalen Flammengeschwindigkeit festgestellt.

Es wurde beobachtet, dass der *maximale gemessene Explosionsdruck*  $p_{ex}$  mit Abnahme der Anzahl der Entlastungsflächen und Zunahme des  $K_{St}$ - Werts des Staubes ebenfalls zu nimmt. Es konnte eine Korrelation des Orts der maximalen Flammengeschwindigkeit und des Ort des maximalen Explosionsdrucks beobachtet werden. Weiterhin wurde festgestellt, dass die maximalen gemessenen Explosionsdrücke der im Rahmen dieser Arbeit durchgeführten Explosionsversuche für beide verwendeten Produkte (ungetrocknete Weizenstärke und getrocknete Maisstärke) niedriger waren, als bei vergleichbaren älteren Explosionsversuchen.

Unter Einbezug von älteren Messdaten wurde festgestellt, dass bei den Entlastungsflächenkonfigurationen 1 (Druckentlastung: *Elevatorkopf, -schächte* und *-fuß*) und 2 (Druckentlastung: Elevatorschächte und *-fuß*) alle bei Explosionsversuchen am Rundschachtelevator beobachteten maximalen Explosionsdrücke die sich aus den Ausle-

---

<sup>1</sup> *Kursiv* gestellte Begriffe sind im Glossar erläutert.

gungsempfehlungen für Becherelevatoren mit rechteckigen Schächten in VDI 2263-8-1 bzw. CEN/TR 16829 ergebenden Maximaldrücke unterschreiten. Es konnte bei diesen Entlastungsflächenkonfigurationen keine Erhöhung des maximalen reduzierten Explosionsdrucks in Rundschachtelevatoren gegenüber Rechteckschachtelevatoren beobachtet werden. Die Anwendung der Kurven 2 und 4 nach VDI 2263-8-1 bzw. CEN/TR 16829 ist demnach auch für Rundschachtelevatoren legitim.

Bei Entlastungsflächenkonfiguration 3 (Druckentlastung: nur Elevatorkopf, bzw. Kurve 5 nach CEN/TR 16829 u. VDI 2263-8-1) wurde in früheren Untersuchungen mit Malzstaub ein erhöhter maximaler Explosionsdruck im Rundschachtelevator im Vergleich zum Rechteckschachtelevator festgestellt. Der beobachtete maximale Explosionsdruck am Rundschachtelevator überschreitet dabei die für Rechteckschachtelevatoren geltende *Mindestfestigkeit*. Deshalb kann die Anwendbarkeit von Kurve 5 nach CEN/TR 16829 bzw. VDI 2263-8-1 auf Rundschachtelevatoren zum aktuellen Zeitpunkt nicht sicher bestätigt werden.

# Kapitel 1

## Einleitung

Becherelevatoren werden im Allgemeinen zur kontinuierlichen Senkrechtförderung von Schüttgütern eingesetzt. Bei der Förderung von brennbaren Stäuben oder staubhaltigen und brennbaren Schüttgütern mit Becherelevatoren, können *explosionsfähige Atmosphären* entstehen. Sind dabei die Maßnahmen zur Vermeidung von wirksamen Zündquellen nicht ausreichend realisierbar, oder kann nicht ausgeschlossen werden dass Explosionen aus angrenzenden Anlagenteilen den Becherelevator beaufschlagen, ist die Gefahr einer Staubexplosion gegeben [13].

Die Auswirkungen von Staubexplosionen in Becherelevatoren können verheerend sein, weshalb zum Schutz von Menschen und Anlagenteilen Schutzmaßnahmen ergriffen werden. Eine mögliche Schutzmaßnahme sind Explosionsdruckentlastungseinrichtungen. Diese lassen zwar eine Explosion zu, beschränken aber deren Auswirkungen auf ein unbedenkliches Maß. Explosionsdruckentlastungseinrichtungen werden in die Förderschächte, den Elevatorkopf oder den *Elevatorfuß* integriert. Bei einem Staubexplosionsereignis geben sie ihre Entlastungsfläche  $A_E$  beim Erreichen eines definierten *statischen Ansprechdrucks*  $p_{stat}$  frei. Durch Entlassen von unverbranntem Staub/Luft-Gemisch und Verbrennungsprodukten aus dem Becherelevator steigt der Druck in diesem lediglich auf den Wert des *reduzierten Explosionsdrucks*  $p_{red}$  an. Die Auslegung von Explosionsdruckentlastungseinrichtungen muss so gestaltet werden, dass der reduzierte Explosionsdruck die Explosionsdruckstoßfestigkeit des zu schützenden Becherelevators nicht überschreitet [11] [13] [14].

Dimensionierungsvorschläge und Auslegungsempfehlungen für Explosionsdruckentlastungseinrichtungen nach [7] und [14] gelten für Becherelevatoren mit rechteckigen Schächten. Auf Grund der geringeren notwendigen Materialstärke von runden Förderschächten gegenüber eckigen Förderschächten bei gleicher Festigkeit, finden zunehmend Becherelevatoren mit runden Schächten Verwendung. Werden runde Förderschächte in Kombination mit rechteckigen Förderbechern verwendet, erhöht sich der freie Schachtquerschnitt im Vergleich zu rechteckigen Förderschächten in Kombination mit rechteckigen Förderbechern. Dies kann die Ausbreitung von Staubexplosionen begünstigen und damit einen erhöhten reduzierten Explosionsdruck zur Folge haben [7] [14].

## 1.1 Zielsetzung

Das Ziel dieser Arbeit ist die Untersuchung, ob die in VDI 2263-8.1 und CEN/TR 16829 erstellten Dimensionierungsvorschläge für Becherelevatoren mit rechteckigen Schächten auch für Becherelevatoren mit runden Schächten anwendbar sind. Folgende Fragestellungen sollen deshalb beantwortet werden:

1. Wie verhalten sich Staubexplosionen in Rundschachtelevatoren?
2. Ist eine Änderung des reduzierten Explosionsdruck bei Staubexplosionen in Rundschachtelevatoren im Vergleich zu Rechteckschachtelevatoren auf Grund von veränderter Schachtgeometrie nachweisbar?

## 1.2 Lösungsweg

Vorhandene Daten und Messergebnisse zu Explosionsversuchen von Rechteckschachtelevatoren und Rundschachtelevatoren werden gesichtet. Auf Grundlage dieser Daten werden weitere Versuche an einem Rundschachtelevator geplant. Hierfür werden mögliche geeignete Produkte recherchiert und gemäß ihrer Explosionstechnischen Kenngrößen (vergleiche Kapitel 2.1) untersucht. Zeitgleich wird ein geeignetes Versuchsprogramm erarbeitet, in welchem drei verschiedene Entlastungsflächenkonfigurationen berücksichtigt werden. Anschließend werden die Explosionsversuche im Realmaßstab vorbereitet. Hierfür wird der Rundschachtelevator in Betrieb genommen und die benötigte Messtechnik verbaut und kalibriert. Die festgelegten *Versuchsreihen* werden durchgeführt und die Messdaten ausgewertet. Mit Hilfe der erhaltenen Ergebnisse und unter Einbezug von bereits vorhandenen Ergebnissen werden Aussagen zu den in Abschnitt 1.1 formulierten Fragestellungen erarbeitet. Abschließend wird bewertet ob die Auslegungskriterien für die Schutzmaßnahme Explosionsdruckentlastung gemäß [7] bzw. [14] für Rundschachtelevatoren anwendbar sind.

## 1.3 Aktueller Kenntnisstand

Becherelevatoren werden üblicherweise zur Förderung von Schüttgütern eingesetzt. Bei der Förderung von brennbaren Schüttgütern wie beispielsweise Maiskörnern entsteht durch das sich bewegende Gurtband mit Bechern Produktabrieb. Dieser lagert sich an den innenliegenden Oberflächen wie beispielsweise Elevatorschächten und Bechern ab. Beim Elevatorleerlauf, also dem An- oder Abfahren des Becherelevator, wird dieser durch das laufende *Becherwerk* aufgewirbelt. Dabei werden bevorzugt kleine Partikeln mit hoher Turbulenz in dem freien Volumen des Becherelevator verteilt und in Schwebelage gehalten. Dies begünstigt im Vergleich zum *Normalbetrieb* des Becherelevator die Entstehung und Ausbreitung von Staubexplosionen [9] [10].

Deshalb basiert der aktuelle Kenntnisstand zu Explosionsdruckentlastung in Kombination mit explosionsfester Bauweise an Becherelevatoren auf praxisnahen Explosions-

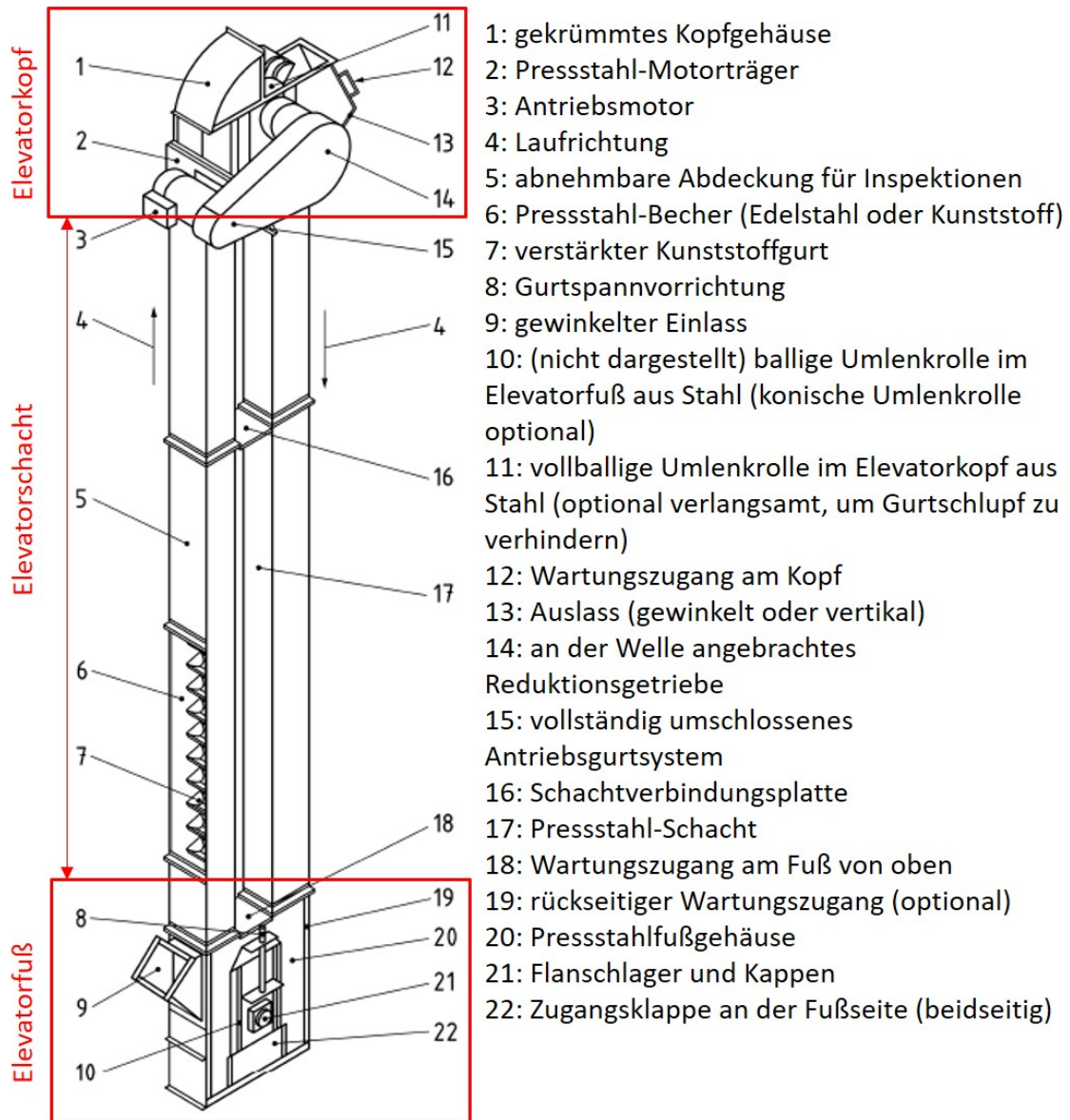


Abbildung 1.1: Skizze eines nach [7] empfohlenen Aufbau eines Rechteckschachtelevators [7].

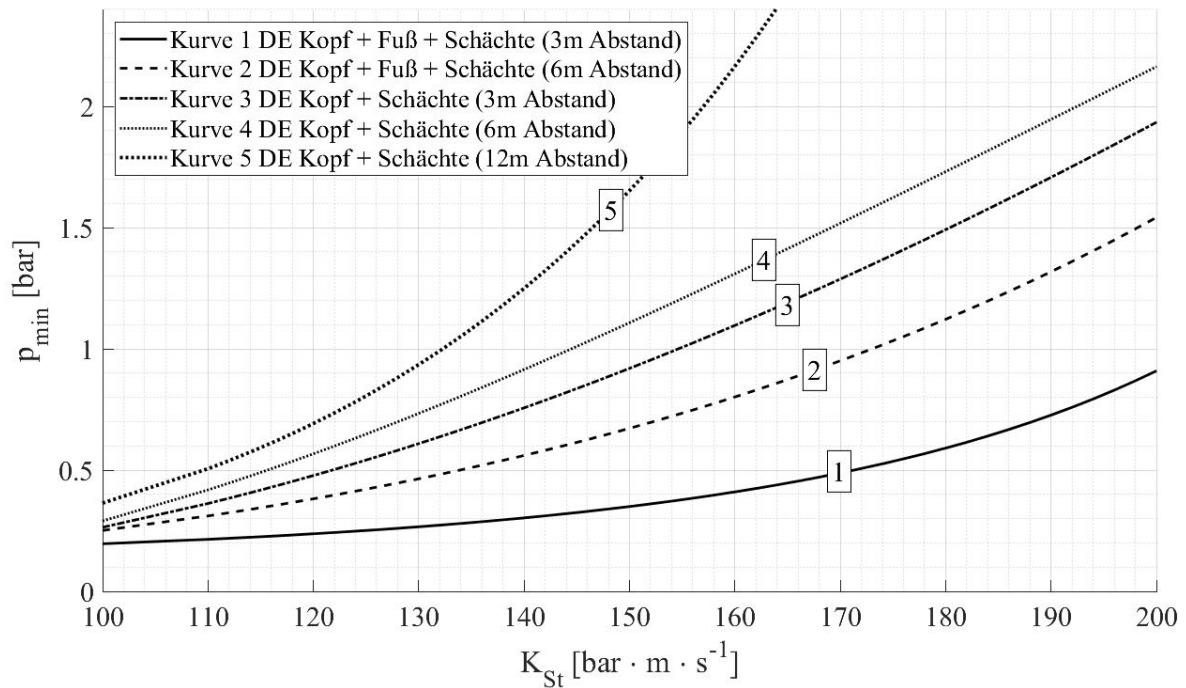


Abbildung 1.2: Erforderliche Mindestfestigkeit  $p_{\min}$  eines Rechteschachtelevators bei explosionsfester Bauweise in Kombination mit Explosionsdruckentlastung [7].

versuchen im Realmaßstab, die das An- bzw. Abfahren des Becherelevators simulieren. Abbildung 1.1 zeigt exemplarisch einen üblichen, dem Versuchselevator ähnlichen Rechteschachtelevator. Die angewandte Versuchsdurchführung basiert dabei auf dem so genannten Kreislaufbetrieb, bei dem eine definierte Menge eines brennbaren Staubes in einem Versuchselevator im Kreislauf gefahren und anschließend ausgelesen wird. Der dadurch an den Elevatorbechern und -schächten abgelagerte Staub simuliert den bei der Förderung von groben Schüttgütern entstehenden Produktabrieb. Beim anschließenden Leerlaufbetrieb wird, identisch zum An- bzw. Abfahren eines Becherelevators, der abgelagerte Staub durch das laufende Becherwerk aufgewirbelt. Die dabei entstehende explosionsfähige Atmosphäre wird mit Hilfe einer *Zündquelle* hinreichender Energie entzündet. Die anschließende Ausbreitung der Explosion innerhalb des Versuchselevators wird messtechnisch erfasst.

Der verwendete Versuchselevator (geometrische Abmessungen und weitere Daten in Tabelle E.1 im Anhang dargestellt) wurde am Elevatorfuß, in den Elevatorschächten und im Elevatorkopf druckentlastet. Der Abstand der Entlastungsflächen in den Schächten betrug dabei 6 m. Über mehrere *Versuchsserien* wurde für verschiedene Produkte systematisch die Entlastungsflächenkonfiguration verändert. Als Stäube wurden stark staubende Produkte mit feinen Partikeln, wie beispielsweise Stärken und Mehle verwendet. Diese repräsentieren auf Grund ihrer Korngrößenverteilung und Staubbungsneigung die für Staubexplosionen kritischsten Produktabriebe. Becherelevatoren werden üblicherweise bis zu einem  $K_{St}$ -Wert<sup>1</sup> des Produktabriebes von bis zu  $K_{St} = 150 \text{ bar} \cdot \text{m} / \text{s}^{-1}$  eingesetzt. Deshalb wurden, unter Einbezug von Sicherheiten, die in Tabelle 1.2 dargestellten brennbaren Stäube mit einem  $K_{St}$ -Wert im Bereich  $100 \leq K_{St} \leq 200$

<sup>1</sup>Der  $K_{St}$ -Wert ist in Abschnitt 2.1 Kennzahlermittlung näher erläutert.



verwendet [7] [10] [14].

Auf Basis der Ergebnisse dieser Explosionsversuche (diese sind in Anhang C.1 bis C.4 dargestellt) wurden schließlich Auslegungsempfehlungen für verschiedene Anordnungen von Druckentlastungsflächen abgeleitet. Hierfür wurde jeweils der beobachtete maximale Explosionsdruck einer Versuchsreihe, also der beobachtete „worst case“ betrachtet. Der maximale Explosionsdruck wurde anschließend in Abhängigkeit des  $K_{St}$ -Wert für die entsprechenden Entlastungsflächenkonfigurationen aufgetragen. Mittels einhüllenden Kurven und unter Berücksichtigung von Sicherheiten, wurden schließlich die in Abbildung 1.2 dargestellten Mindestfestigkeiten  $p_{\min}$  für Becherelevatoren in Abhängigkeit des  $K_{St}$ -Wert des entsprechenden Produktes festgelegt. Die in Abbildung 1.2 dargestellten Mindestfestigkeiten für verschiedene Entlastungsflächenkonfigurationen lassen sich durch Formel 1.1 mit den in Tabelle 1.1 dargestellten Koeffizienten beschreiben [7] [10] [14].

$$p_{\min} = \exp(a \cdot K_{St}^c + b) \quad (1.1)$$

Kurve Nr.	Konfiguration der Druckentlastungsöffnungen Einbauabstand	Koeffizient (a)	Koeffizient (b)	Exponent (c)
1	Kopf + Fuß + Schächte (3 m Abstand)	$3,292 \cdot 10^{-6}$	-1,957	2,5
2	Kopf + Fuß + Schächte (6 m Abstand)	0,438	-5,761	0,5
3	Kopf + Schächte (3 m Abstand)	-67,98	5,467	-0,5
4	Kopf + Schächte (6 m Abstand)	-401,6	2,78	-1
5	Kopf + Schächte (12 m Abstand) oder nur Kopf mit einer höchstmöglichen Schachtlänge von 12 m.	0,673	-7,74	0,5

Tabelle 1.1: Koeffizienten für die mittels Formel 1.1 in Abbildung 1.1 dargestellten Mindestfestigkeiten für Elevatoren [7].

Staub	$p_{max}$ [bar]	$K_{St}$ [bar · m/s <sup>1</sup> ]	UEG [g/m <sup>3</sup> ]	MZE [mJ]	MZT [°C]	$S_N$ [-]
Weizenmehl Typ 550	6,8	$109 \pm 12\%$	60	$10 < MZE < 50$	380	0,6
Malzstaub 1	7,9	$143 \pm 12\%$	60	$10 < MZE < 10$	370	29
Malzstaub 2	8,4	$159 \pm 12\%$	60	$10 < MZE < 10$	370	13,2
Maisstärke	8,7	$204 \pm 10\%$	60	$4 < MZE < 5$	380	10,2

Tabelle 1.2: Explosionstechnische Kenngrößen der zur Durchführung von Explosionsversuchen an einem Becherelevator mit rechteckigen Schächten verwendeten Stäube [10].

# Kapitel 2

## Kennzahlermittlung und Produktauswahl

### 2.1 Kennzahlermittlung

Zur Einordnung der in Abschnitt 3 beschriebenen Explosionsversuche an einem Rundschachtelevator muss die Vergleichbarkeit der Messergebnisse mit bereits vorhandenen Datensätzen möglich sein. Als Kriterium hierfür gilt neben einer identischen Versuchsdurchführung eine vergleichbare Verbrennungsgeschwindigkeit bzw. Heftigkeit der Explosion der verwendeten Stäube unter standardisierten Bedingungen. Als Vergleichsgröße dient hierfür der maximale Explosionsdruck  $p_{max}$  bzw. die maximale Druckanstiegsgeschwindigkeit  $K_{St}$ . Der maximale Explosionsdruck  $p_{max}$  beschreibt den Maximalwert des zeitlichen Druckverlaufes bei der Deflagration eines Staub/Luft-Gemisches mit optimaler Staubkonzentration in einem geschlossenen Behälter. Der  $K_{St}$ -Wert hingegen beschreibt die maximale Druckanstiegsgeschwindigkeit  $dp/dt_{max}$  bei eben diesem Verbrennungsvorgang. Er ist ein Maß für die Verbrennungsgeschwindigkeit bzw. die Heftigkeit der Explosion eines Staub/Luft-Gemisches. Für den  $K_{St}$ -Wert gilt das sog. kubische Gesetz (Formel 2.1), welches die Unabhängigkeit des  $K_{St}$ -Wert vom Behältervolumen  $V$  zum Ausdruck bringt [2].

$$K_{St} = \sqrt[3]{V} \left( \frac{dp}{dt} \right)_{\max} \quad (2.1)$$

Da Faktoren wie Produktfeuchte und Partikelgrößenverteilung des Staubes die Kenngrößen  $p_{max}$  und  $K_{St}$  beeinflussen, werden *genormte Muster* (GM) der Stäube erstellt. Dabei werden die Proben in einem Luftstrahlsieb auf eine Partikelgröße  $< 63 \mu\text{m}$  abgesiebt und anschließend für mindestens 3 Stunden in einem Trockenschrank bei  $105^\circ\text{C}$  getrocknet. Produktproben die unverändert zur Kennzahlermittlung herangezogen werden, werden *Urmuster* (UM) genannt. Eine Kennzahlermittlung kann sowohl in einer 20 L Laborapparatur als auch in einem  $1\text{m}^3$  Behälter durchgeführt werden. Um die Vergleichbarkeit der Kenngrößen  $K_{St}$  und  $p_{max}$  der im Rahmen dieser Arbeit verwendeten Produkte mit älteren Versuchsergebnissen gewährleisten zu können, wurde als Bestimmungsverfahren eine 20 L Laborapparatur mit aufbereiteter Probe (GM)

verwendet. Die Proben wurden dabei wie in Abschnitt 2.3 beschrieben untersucht [1] [3] [4].

Zur Charakterisierung der verwendeten Produkte dienen weitere, im Folgenden erläuterte, explosionstechnische Kenngrößen. Deren Bestimmung wurde aus Zeitgründen in einem externen Staublabor der BGN Mannheim in Auftrag gegeben.

### 2.1.1 untere Explosionsgrenze (UEG)

Die *untere Explosionsgrenze* beschreibt die minimale Konzentration eines Staubes in Luft bei der eine Explosion möglich ist. Zur Bestimmung wird die in Abschnitt 2.3 beschriebene Versuchsanordnung verwendet, welche ebenfalls zur Bestimmung von  $p_{max}$  und  $K_{St}$  Verwendung findet. Dabei wird ausgehend von einem zündfähigen Staub-Luft-Gemisch die Staubkonzentration schrittweise verringert, bis keine Entzündung des entsprechenden Gemisches beobachtet werden kann [5] [12].

### 2.1.2 Mindestzündenergie (MZE)

Die Mindestzündenergie beschreibt die niedrigste Energiemenge die ausreichend ist, um eine explosionsfähige Atmosphäre in seiner *zündwilligsten Zusammensetzung* bei Raumtemperatur und Atmosphärendruck zu entzünden. Als Prüfverfahren wird in der Regel die modifizierte Hartmann-Apparatur verwendet. Hierbei dient als Zündquelle die Entladung der in einem Hochspannungskondensator gespeicherten elektrischen Energie über eine Funkenstrecke. Durch Variation der gespeicherten elektrischen Energie im Kondensator wird die Mindestzündenergie bestimmt [8][12].

### 2.1.3 Mindestzündtemperatur (MZT)

Die Mindestzündtemperatur beschreibt unter Hinweis auf das Bestimmungsverfahren die geringste Temperatur einer heißen Oberfläche bei der sich das zündwilligste Staub-Luft-Gemisch unter Flammenerscheinung entzündet. Als Bestimmungsverfahren wird üblicherweise der BAM-Ofen oder der Ofen nach Goodbert-Greenwald verwendet [12].

### 2.1.4 Staubungsneigung ( $S_N$ )

Die Staubungsneigung, welche mit der dimensionslosen Staubungszahl  $S_N$  quantifiziert wird, beschreibt die Neigung eines Staubes zur Staubwolkenbildung. Zur Bestimmung wird der zu untersuchende Staub über eine Dosiereinheit in eine Dosierkammer gefördert. Dabei wird die Staubkonzentration der sich in Schwebelage befindenden Staubpartikeln in Luft in Abhängigkeit von der Zeit gemessen. Nach einem definierten Zeitintervall wird die Dosierung beendet. Die Staubkonzentrationsmessung wird jedoch bis zur vollständigen Sedimentation der Partikeln fortgesetzt. Die Staubungszahl  $S_N$  beschreibt dann die Fläche unterhalb der erstellten Messkurve im definierten Zeitintervall, also dem entsprechenden Integral der Messkurve [12].

## 2.2 Produktauswahl

Um die in Abschnitt 1.1 definierten Fragestellungen zu untersuchen, wurden bereits vorhandene Datensätze von Explosionsversuchen an einem Rundschachtelevator durch weitere Versuche ergänzt. Hierzu mussten zwei geeignete Produkte identifiziert werden. Auf Grundlage von Datensätzen von Explosionsversuchen an Rechteckschachtelevatoren welche zur Erstellung von [7] und [14] herangezogen wurden und auf Grundlage vorhandener Daten zu Explosionsversuchen an Rundschachtelevatoren wurden folgende Kriterien für geeignete Produkte definiert.

- a)  $K_{St}$ -Wert im Bereich  $130 \text{ bar} \cdot \text{m/s} \leq K_{St} \leq 200 \text{ bar} \cdot \text{m/s}$ .
- b) Medianwert der massenbezogenen Partikelgrößenverteilung  $< 63 \text{ } \mu\text{m}$ .
- c) für Mensch und Umwelt unbedenklich.
- d) Benötigte Menge aus einer Produktcharge abesackt lieferbar.
- e) Produktprobe aus dieser Produktcharge lieferbar.
- f) vertretbare Kosten.

Durch Datenbankrecherche und Anfragen an Hersteller bzw. Lieferanten wurden die unten aufgeführten potenzielle Produkte festgelegt.

1. ungetrocknete Kartoffelstärke (P20.2-KS), Lieferant: Hafen-Mühlen-Werke GmbH
2. ungetrocknete Weizenstärke (P20.4-WS), Lieferant: Azelis Deutschland GmbH
3. ungetrocknete Maisstärke (P20.3-MS), Lieferant: Azelis Deutschland GmbH
4. getrocknete Maisstärke (P19.1-MS), Lieferant: Sabamühle GmbH

Von diesen Produkten wurden Produktproben geordert und die explosionstechnischen Kenngrößen  $p_{\max}$  und  $K_{St}$  in einem  $1 \text{ m}^3$  Behälter bestimmt. Die Vorgehensweise war dabei analog zum Vorgehen der Kennzahlermittlung in einer 20 L Laborapparatur (vgl. Abschnitt 2.1) und wurde wie in [3] und [4] beschrieben durchgeführt. Da zu diesem Zeitpunkt der Arbeit der Versuchsaufbau der 20 L Kugel noch in der Aufbauphase war, wurde auf den  $1\text{m}^3$  Behälter zur Kennzahlermittlung zurückgegriffen. Der so bestimmte  $K_{St}$ -Wert wurde zur Bewertung des Kriterium a) in Abschnitt 2.2 herangezogen. Die Produkte Nr. 1 (ungetrocknete Kartoffelstärke) und Nr. 3 (ungetrocknete Maisstärke) erfüllten demnach das Kriterium a) nicht. Deshalb wurden die Produkte Nr.2 und Nr.4 zur Durchführung von Elevatorversuchen ausgewählt und in entsprechender Menge beschafft. Anschließend wurden  $p_{\max}$  und  $K_{St}$  wie in Abschnitt 2.1 beschrieben erneut bestimmt.

## 2.3 Versuchsdurchführung

Für die in Abschnitt 2.2 ausgewählten Produkte wurden nach Anlieferung der abgesackten Großmenge Proben entnommen und nach der im Folgenden beschriebenen Vorgehensweise die explosionstechnischen Kenngrößen  $p_{\max}$  und  $K_{St}$  bestimmt. Hierbei wurden für Weizenstärke sowohl Produktproben mit Aufbereitung nach Norm (GM) als auch Produktproben im Anlieferungszustand (UM) untersucht. Da bei getrockneter Maisstärke (P19.1-MS) die Produktprobe mit Aufbereitung nach Norm der Produktprobe im Anlieferungszustand entspricht (F sehr gering, 100 % der Partikeln  $< 63 \mu\text{m}$ , siehe Tabelle 2.1 und 2.3) wurde keine Kennzahlermittlung des Urmusters (UM) durchgeführt.

Zur Bestimmung von  $p_{\max}$  und  $K_{St}$  wurde die in Abbildung 2.1 dargestellte 20 L-Laborapparatur verwendet. Diese bestand im Wesentlichen aus einer explosionsfesten Kugel (7) mit entsprechendem Verschluss (3). Über eine Doppelwand wurde mittels Wasserkühlung (9) die bei Explosionsversuchen freigesetzte Wärme abgeführt und so die Temperatur der Versuchsapparatur während einer Versuchsreihe konstant gehalten. Über einen Staubvorratsbehälter (13) wurde die zu untersuchende Staubmenge aufgegeben. Die chemischen Zünder (1) ( $2 \times E_i=5 \text{ kJ}$ ) wurden mittels entsprechenden Klemmsteckern (2) in die Zünderstangen (4) eingesteckt. Anschließend wurden die Zünderstangen in die 20 L Kugel eingeführt und der Verschluss geschlossen. Danach wurden die Zündkabel (6) von oben in die Zünderstangen eingesteckt (vgl. Abbildung 2.1).

Mit einer Vakuumpumpe wurde die Versuchsapparatur auf einen durch Vorversuche bestimmten Unterdruck evakuiert. Zur Bestimmung dieses Unterdruckes wurden Einblasvorgänge ohne Staub und chemische Zünder durchgeführt. Hierzu wurde der Staubvorratsbehälter mit 20 bar Druckluft beaufschlagt, welche anschließend in die Laborapparatur ein geblasen wurde. Systematisch wurde der zuvor eingestellte Unterdruck soweit reduziert, dass nach dem Einblasvorgang kein Unter- oder Überdruck in der Versuchsapparatur beobachtet werden konnte. Dadurch wurde gewährleistet, dass nach dem Einblasen des Staub/Luft-Gemisches, also zum Zündzeitpunkt, Atmosphärendruck vorlag.

Nach der Evakuierung der Laborapparatur wurden die Absperrhähne (16) zum Unterdruckmanometer (15) und zur Vakuumpumpe geschlossen. Anschließend wurde der Versuch über den Messcomputer (5) gestartet. Über das Steuergerät (12) wurde der Staubvorratsbehälter mit 20 bar Druckluft beaufschlagt. Über ein Manometer (14) konnte der eingestellte Überdruck überprüft werden. Über ein pneumatisch gesteuertes Ventil (11) wurde anschließend der vorgelegte Staub in die Versuchsapparatur eingeblasen. Eine Fächerdüse (17) gewährleistete eine gleichmäßige und reproduzierbare Dispergierung des Staubes innerhalb der Versuchsapparatur. Mit einer *Zündverzögerungszeit* von  $t_v=60 \text{ ms}$  wurden die chemischen Zünder mit Spannung beaufschlagt und das Staub/Luft-Gemisch entzündet. Der in der Apparatur vorherrschende Druck in Abhängigkeit von der Zeit wurde mittels zwei piezoelektrischen Druckaufnehmern (8) und einem Transientenrekorder (10) gemessen und auf dem Messcomputer gespeichert. Anschließend wurden die Verbrennungsgase innerhalb der Laborapparatur über eine Absaugung ausgetragen und der Verschluss geöffnet. Verbrennungsrückstände wurden

1	Chemische Zünder (5 kJ)
2	Klemmstecker
3	Verschluss
4	Zünderstange
5	PC mit Messsoftware
6	Zündkabel
7	20 L Kugel
8	Druckaufnehmer
9	Wasserkühlung
10	Transientenrekorder
11	Pneumatisches Ventil
12	Steuergerät
13	Staubvorratsbehälter
14	Überdruck-Manometer
15	Unterdruck-Manometer
16	Absperrhahn
17	Fächerdüse

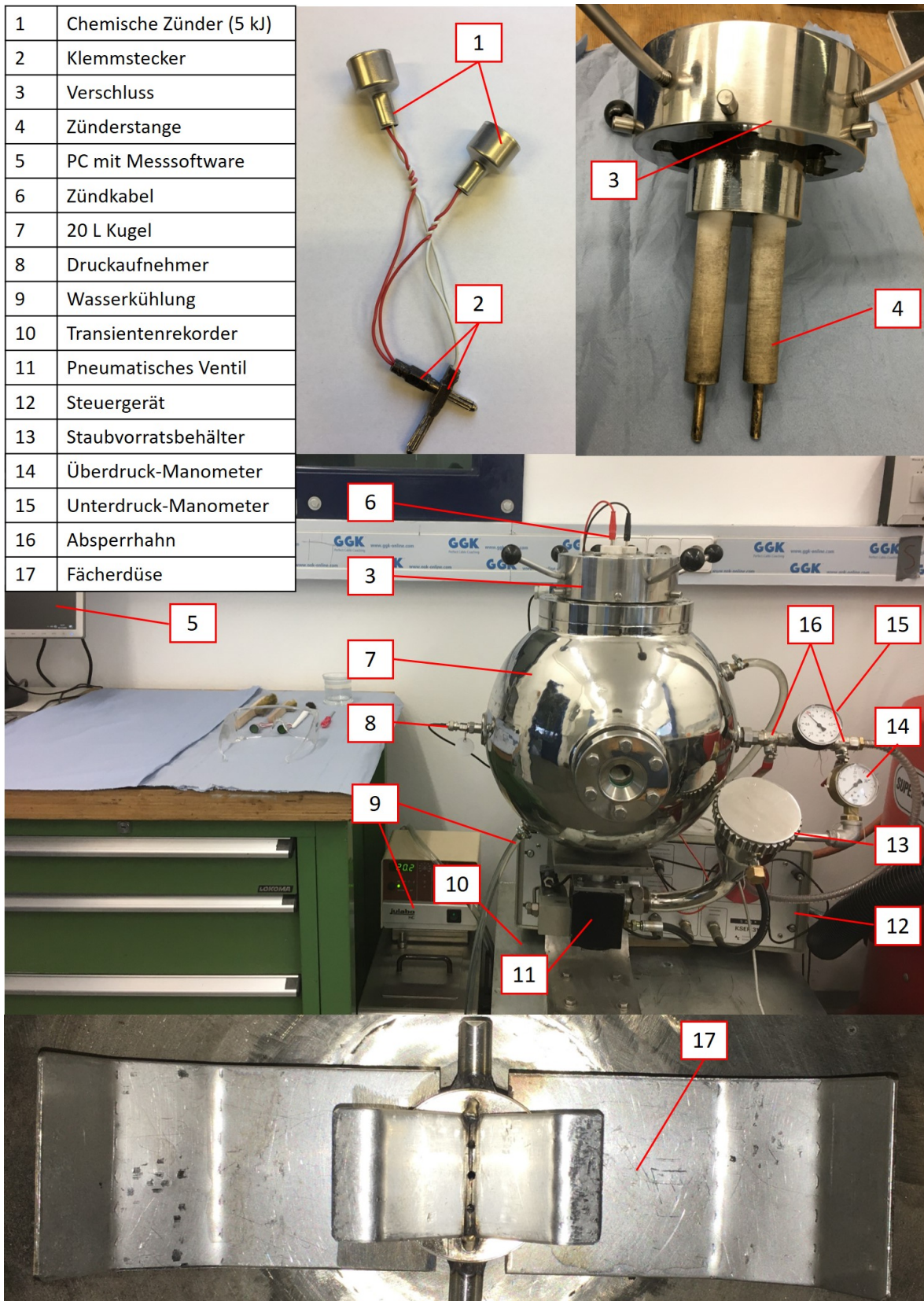


Abbildung 2.1: Oben links: verwendete chemische Zünder mit je 5 kJ Energiemenge. Oben rechts: Verschluss mit Zünderstangen. Mitte: Zur Bestimmung von  $p_{max}$  und  $K_{St}$  verwendete 20 L Laborapparatur mit Messtechnik. Unten: In der Laborapparatur verbaute Fächerdüse.

beseitigt und die Laborapparatur für weitere Versuche vorbereitet.

Nach der beschriebenen Vorgehensweise wurden drei Versuchsreihen durchgeführt. Dabei wurden in Versuchsreihe 1) Staubkonzentrationen im Bereich von  $c_S = 250 \text{ g/m}^3$  bis  $c_S = 1750 \text{ g/m}^3$  untersucht. Dabei wurde die Staubkonzentration, beginnend bei  $c_S = 250 \text{ g/m}^3$ , schrittweise um  $250 \text{ g/m}^3$  erhöht. Anschließend wurde die Staubkonzentration mit dem maximalen Explosionsdruck der Versuchsreihe  $p_{ex}$  und dem maximalen zeitlichen Druckanstieg der Versuchsreihe  $(dp/dt)_{ex}$  (siehe Abschnitt 2.4 Datenauswertung) bestimmt. Danach wurden mit Versuchsreihe 2) und 3) die in Versuchsreihe 1) festgelegte Staubkonzentration und jeweils mindestens zwei aufeinanderfolgende Staubkonzentrationen unter- und oberhalb der festgelegten Staubkonzentration untersucht und nach Abschnitt 2.4 ausgewertet. Trat also beispielsweise bei Versuchsreihe 1)  $p_{ex}$  und  $(dp/dt)_{ex}$  bei  $c_S = 1250 \text{ g/m}^3$  auf, wurden in Versuchsreihe 2) und 3) jeweils die Staubkonzentrationen  $c_S = 750 \text{ g/m}^3$  bis  $c_S = 1750 \text{ g/m}^3$  untersucht [3] [4].

## 2.4 Datenauswertung und Ergebnisse

Für die Aufzeichnung und Auswertung der Messwerte wurde die Software „KSEP 7.1“ der Cesana-AG verwendet. Diese bestimmt automatisiert den maximalen Explosionsdruck  $p_m$  und den maximalen zeitlichen Druckanstieg  $(dp/dt)_m$  jedes Einzelversuches. Abbildung 2.2 zeigt exemplarisch anhand dem gemessenen zeitlichen Druckverlauf einer Weizenstärkeexplosion in einer 20 L Laborapparatur bei einer Staubkonzentration von  $c_S = 1000 \text{ g/m}^3$  die dabei angewandte Vorgehensweise.

Der maximale Explosionsdruck des Einzelversuches  $p_m$  ist der maximale gemessene Druck während des Explosionsvorganges. Der maximale zeitliche Druckanstieg des Einzelversuches  $(dp/dt)_m$  entspricht der Steigung der Geraden im Wendepunkt der ansteigenden Flanke des gemessenen Druckverlaufes. Der maximale Explosionsdruck einer Versuchsreihe wird als  $p_{ex}$  bezeichnet. Der maximale Druckanstieg einer Versuchsreihe ist  $(dp/dt)_{ex}$ .

Der maximale Explosionsdruck  $p_{max}$  berechnet sich als arithmetischer Mittelwert der maximalen Explosionsdrücke der jeweiligen Versuchsreihen  $p_{ex}$ . Für  $p_{max} < 5,5 \text{ bar}$  wird wegen des geringen Volumens der 20 L Kugel die Druckentwicklung der chemischen Zünder berücksichtigt. Dies kommt durch Formel 2.2 zum Ausdruck. Der durch die Zünder verursachte Explosionsdruck  $p_{ci}$  berechnet sich nach Formel 2.3 und ist von der freigesetzten Energie der chemischen Zünder  $E_i$  abhängig. Für  $p_{max} > 5,5 \text{ bar}$  gilt auf Grund der Kühlwirkung die Korrekturformel 2.4 [3] [4].

$$p_{max,korr} = \frac{5,5 \cdot (p_{max} - p_{ci})}{(5,5 - p_{ci})} \quad (2.2)$$

$$p_{ci} = \frac{1,6 \cdot E_i}{10000} \quad (2.3)$$

$$p_{max,korr} = 0,775 \cdot p_{max}^{1,15} \quad (2.4)$$

Der maximale Druckanstieg  $(dp/dt)_{\max}$  wird ebenfalls als arithmetischer Mittelwert der maximalen Druckanstiege der jeweiligen Versuchsreihen  $(dp/dt)_{\text{ex}}$  bestimmt. Hierbei wird keine Korrektur durchgeführt. Die explosionstechnische Kenngröße  $K_{\text{St}}$  wird anschließend unter Einbezug des Behältervolumens  $V$  nach Formel 2.1 in Kapitel 2.1 bestimmt [4]. Nach [3] und [4] werden  $p_{\max}$  und  $(dp/dt)_{\max}$  mit einer „maximal zulässigen Abweichung“ angegeben. Diese gibt nicht die eigentliche Messunsicherheit wieder, wird aber als maximaler Messfehler betrachtet. Die „maximal zulässige Abweichung“ wird für  $(dp/dt)_{\max}$  in Abhängigkeit des ermittelten Wertes nach Tabelle 2.2 angegeben. Für  $p_{\max}$  und  $UEG$  gilt pauschal ein Wert von 10 % relativer Abweichung [3] [4].

Alle im Rahmen dieser Arbeit bestimmten  $K_{\text{St}}$ -Werte und maximalen Explosionsdrücke  $p_{\max}$  sind in Tabelle 2.1 dargestellt. Die weiteren explosionstechnischen Kenngrößen der verwendeten Produkte, die durch das Staublabor der BGN Mannheim bestimmt wurden, sind ebenfalls in Tabelle 2.1 dargestellt. Tabelle 2.3 zeigt zusätzlich die Ergebnisse einer durchgeführten Siebgrößenanalyse der Produktproben im Anlieferungszustand. Die entsprechenden Ergebnisse der Einzelversuche zur Bestimmung von  $p_{\text{ex}}$  und  $K_{\text{St}}$  sind in Anhang A.1 bis A.3 zu finden.

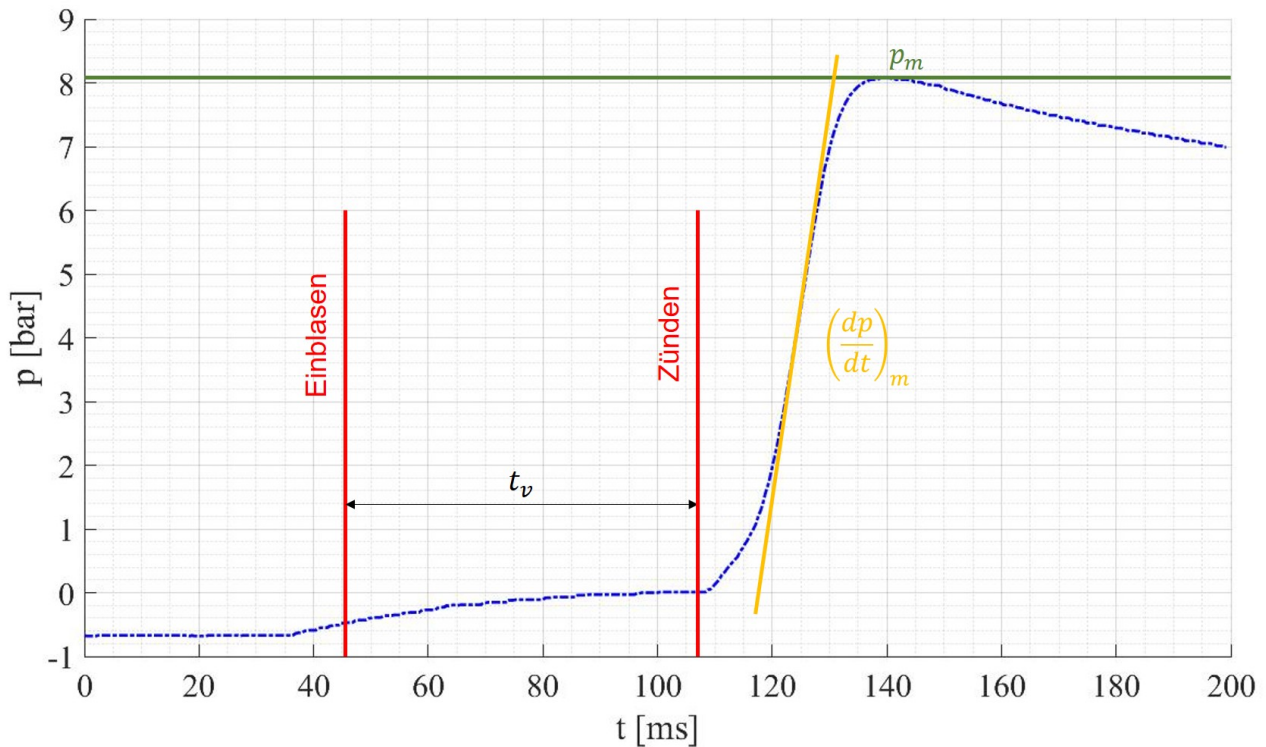


Abbildung 2.2: Gemessener Druckverlauf einer Weizenstärkeexplosion in einer 20L Laborapparatur bei einer Staubkonzentration von  $c_S = 1000 \text{ g/m}^3$



Produkt	$K_{St}$ [bar·m/s]	$p_{max}$ [bar]	UEG [g/m <sup>3</sup> ]	MZE [mJ]	MZT [°C]	$S_N$ [-]	F [Ma-%]
GM getr. Maisstärke P19.1-MS	190 ± 12 %	9,0 ± 10 %	60 ± 10 %	3 - 10	5	-	0
UM getr. Maisstärke P19.1-MS	-	-	-	-	-	-	1,1
GM ungetr. Weizenstärke P20.5-WS	145 ± 12 %	8,2 ± 10 %	60 ± 10 %	10 - 30	5	-	0
UM ungetr. Weizenstärke P20.5-WS	113 ± 12 %	8,5 ± 10 %	-	-	-	6,3	11,4

Tabelle 2.1: Explosionstechnische Kenngrößen der für Explosionsversuche am Rundschachtelevator ausgewählten Produkte.

$(dp/dt)_{max}$ [bar · s <sup>-1</sup> ]	relative Abweichung %
≤ 50	± 30
> 50 ≤ 100	± 20
> 100 ≤ 200	± 12
> 200	± 10

Tabelle 2.2: Maximal zulässige Abweichungen von  $(dp/dt)_{max}$  [3].

UM getrocknete Maisstärke P19.1-MS						
Fraktion [µm]	< 1000	< 500	< 250	< 125	< 63	< 32
Anteil [Ma-%]	100	100	100	100	100	97
UM ungetrocknete Weizenstärke P20.5.WS						
Fraktion [µm]	< 1000	< 500	< 250	< 125	< 63	< 32
Anteil [Ma-%]	100	100	100	100	99	96

Tabelle 2.3: Ergebnisse von Siebanalysen der für Explosionsversuche am Rundschachtelevator ausgewählten Produkte.

# Kapitel 3

## Explosionsversuche am Rundschachtelevator

### 3.1 Versuchsaufbau

Der Versuchsaufbau zur Durchführung von Explosionsversuchen besteht aus dem in Abbildung 3.1 dargestellten Rundschachtelevator auf dem Versuchsgelände der BGN/FSA in Kappelrodeck. Der Versuchsaufbau entspricht, bis auf die Elevatorschächte und die Entlastungsflächen dem in [10] verwendeten Rechteckschachtelevator.

Über einen Produkt Eintrag (29) (vgl. Abbildung 3.1) kann der Versuchselevator chargenweise mit Produkt beaufschlagt werden. Dieses wird von dem Becherwerk den *Förderschacht* (20) hinauf transportiert und am Elevatorkopf (18) abgeworfen. Über ein Fallrohr (22) wird das abgeworfene Produkt dem Elevatorfuß (26) erneut zugeführt und so im Kreislauf gefördert. Durch Betätigen einer Klappe (24) wird das im Fallrohr herabfallende Produkt dem Produktaustrag (25) zugeführt und der Versuchselevator entleert. Über eine Absaugung (31) am oberen Ende der Elevatorschächte kann dem Versuchselevator vom laufenden Becherwerk aufgewirbelter Staub entzogen werden. Über einen Zyklon (28) wird der ausgetragene Staub abgeschieden.

Vor Beginn der Versuchsserien wurde der Versuchselevator vollständig gereinigt. Um ein worst-case Szenario abzubilden, wurde der Elevatorkopf (18) geöffnet und die verbauten Förderbecher aus Metall durch Kunststoffbecher ersetzt. Kunststoffbecher weisen eine geringere Wärmeleitfähigkeit sowie Wärmekapazität als Metallbecher auf. Dies ermöglicht eine im Vergleich zu Metallbechern verschlechterte Abfuhr der durch den Verbrennungsvorgang freigesetzten Wärme. Dies kann sich auf den *Explosionsverlauf* auswirken und im Vergleich zu Metallbechern erhöhte Flammengeschwindigkeiten und Explosionsdrücke zur Folge haben [10] [9].

Um Aussagen über das Explosionsgeschehen innerhalb des Versuchselevators machen zu können wurde dieser mit 13 piezoelektronischen Druckaufnehmern und 14 Flammensensoren ausgestattet. Deren Position und Benennung ist in Abbildung 3.2 dargestellt. Die Bezeichnung „P“ steht dabei für Drucksensoren, die Bezeichnung „F“ gibt Flammensensoren wieder. Im *Förderschacht* verbaute Sensoren sind mit ganzen Zahlen nummeriert, Sensoren im *Rücklaufschacht* sind zusätzlich mit der Bezeichnung „.1“ benannt.

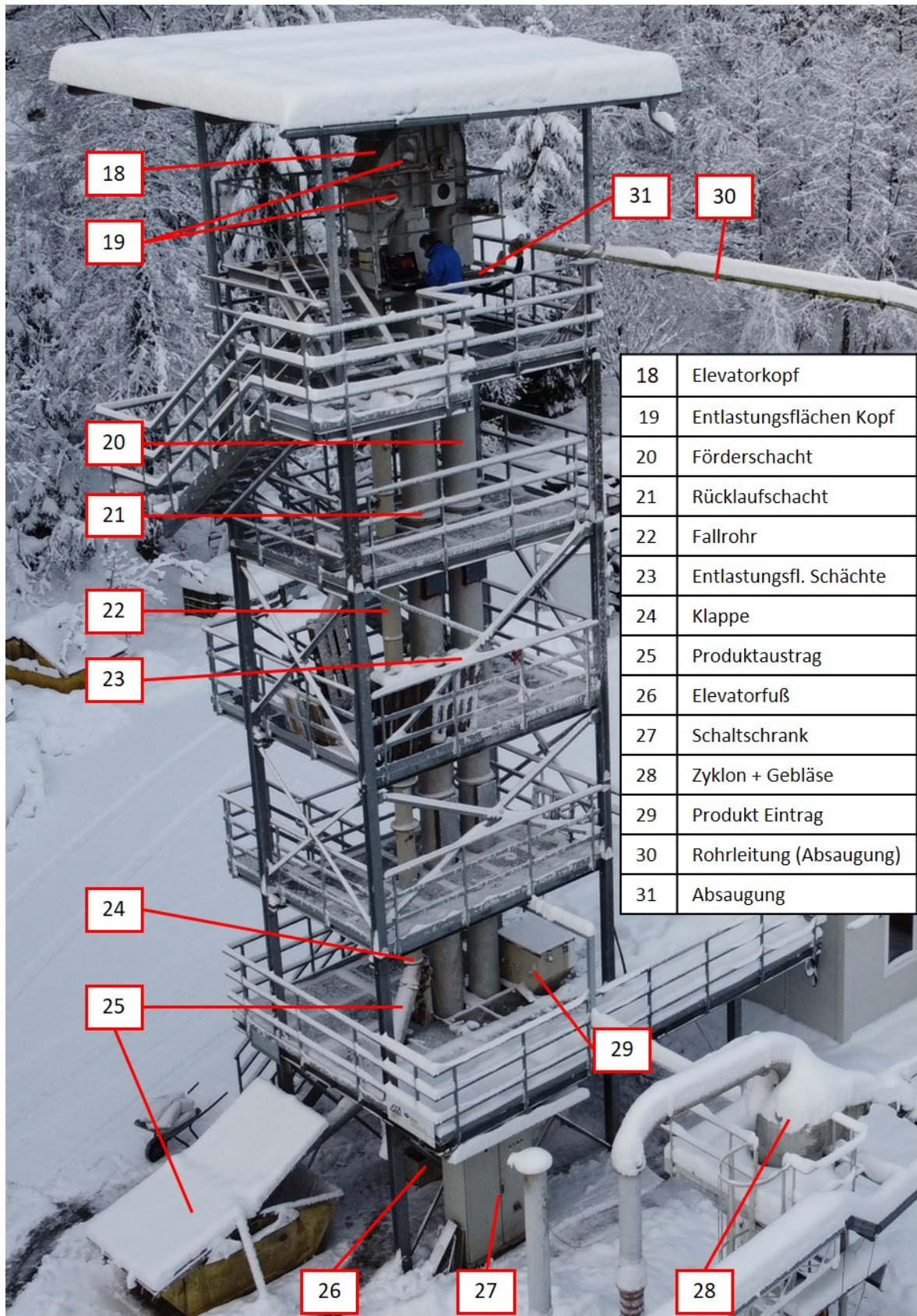


Abbildung 3.1: Rundschachtelevator auf dem Versuchsgelände der FSA in Kappelrodeck. Perspektive: Vorderseite

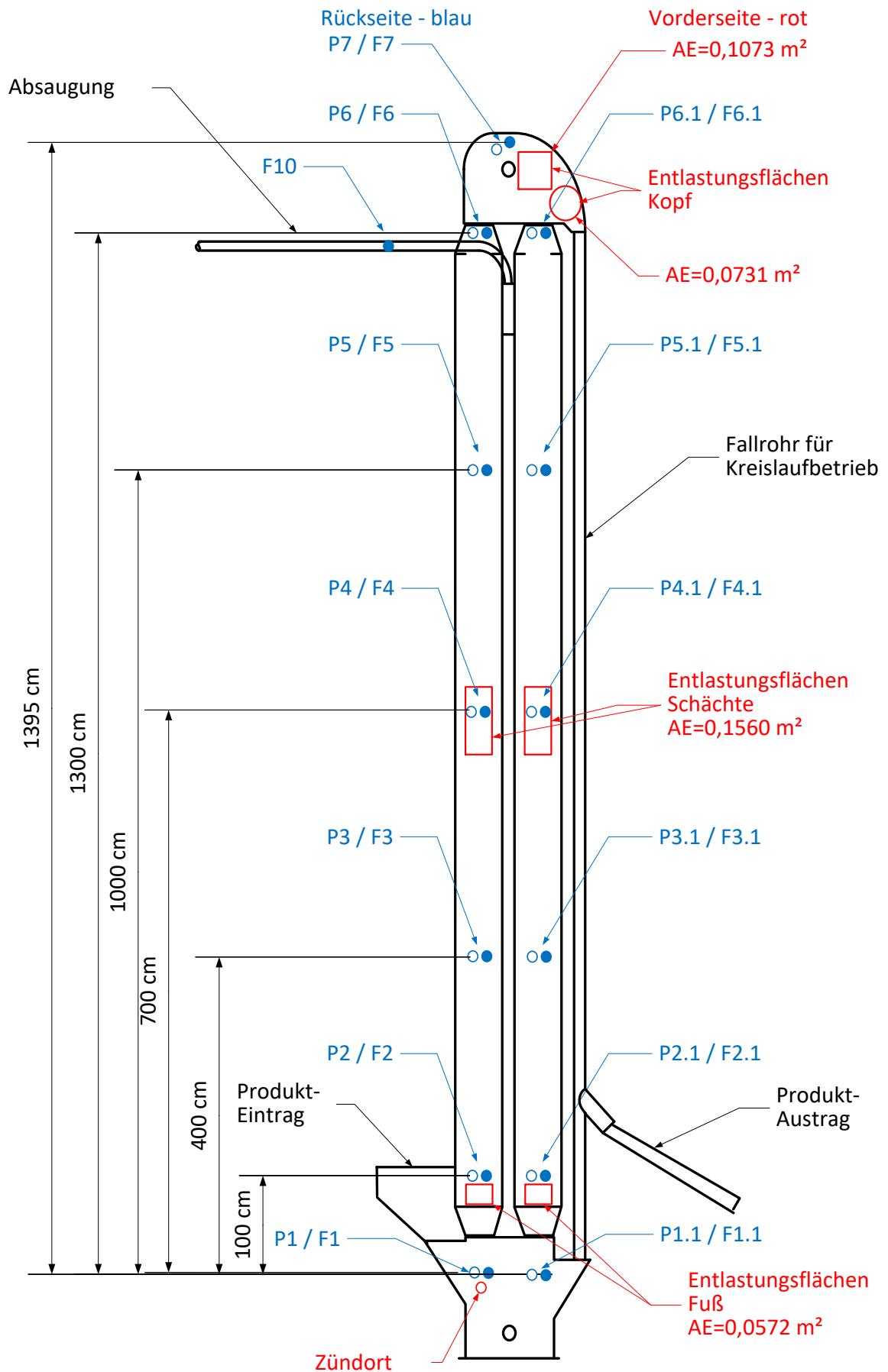


Abbildung 3.2: Skizze des Rundschachtelevators mit Messpositionen und Entlastungsflächen. Perspektive: Rückseite.

Die in Abbildung 3.2 skizzierte Höhe der Sensoren bezieht sich stets auf die Sensoren im Elevatorfuß (P1/F1 und P1.1/F1.1). Beispielsweise befindet sich der Drucksensor P3 in  $H = 4$  m über dem Elevatorfuß im Förderschacht, der Sensor P3.1 dagegen in  $H = 4$  m im Rücklaufschaft. Druck- und Flammensensoren wurden stets in Kombination auf der Elevatorrückseite verbaut. Das bedeutet, dass an jeder *Messposition* jeweils ein Drucksensor und ein Flammensensor nebeneinander montiert wurden (vgl. (40) und (42) in Abbildung 3.4). Um Störsignale zu vermeiden, wurden alle Sensoren mit Hilfe eines Kunststoffadapters (41) am Versuchselevator befestigt. Dies ermöglichte eine Befestigung der Sensoren ohne elektrischen Kontakt zwischen Sensorgehäuse und Versuchselevator. Alle Flammensensoren wurden mit einer speziellen Hülse mit integrierter Glaslinse (39) verbaut. Diese Hülse wurde zwischen Versuchselevator und Flammensensor platziert und verhinderte ein Verschmutzen der optischen Einheit und somit eine verschlechterte Funktionalität des Sensors. Alle Sensoren mit Messposition und zugehöriger Messkette sind in der Messstellenübersicht im Anhang E.2 und E.3 aufgelistet.

Die in Abbildung 3.2 skizzierten Entlastungsflächen sind auf der Elevatorvorderseite verbaut. Der statische Ansprechdruck  $p_{\text{stat}}$  der Entlastungsflächen wurde mittels PE-Folien realisiert und beträgt  $p_{\text{stat}} = 0,1$  bar. Der statische Ansprechdruck für die Entlastungsflächen in Kombination mit entsprechender Folie wurde durch Versuche der FSA nach der in [6, s.10] beschriebenen Vorgehensweise bestimmt. Demnach wurde für die Entlastungsflächen an Elevatorkopf und Elevatorfuß eine Folienstärke von  $f = 0,08$  mm festgelegt. Die Folienstärke der Entlastungsflächen an den Elevatorschächten betrug  $f = 0,1$  mm. Die PE-Folien wurden, wie in Abbildung 3.3 dargestellt, auf die Entlastungsflächen (38) aufgebracht und mit Hilfe eines Flansches mit dem Versuchselevator verschraubt. Um verschiedene Entlastungsflächenkonfigurationen (vgl. Abschnitt 3.2 Versuchsdurchführung) zu realisieren, konnten die Entlastungsflächen der Elevatorschächte und des Elevatorfuß mit Blinddeckeln (33) verschlossen werden. Auf die Flansche aufgebrachte Dichtungen verhinderten das Austreten von Verbrennungsgasen. Das Fallrohr (22) und der Produkteintrag (29) konnten mit explosionsfesten Schiebern (32)(34)(35) verschlossen werden. Dies verhinderte bei einer Entzündung des Staub/Luft ein Ausbreiten der Staubexplosion in die genannten Anlagenkomponenten.

Die Zündung der explosionsfähigen Atmosphäre innerhalb des Versuchselevators erfolgte mit einem chemischen Zünder ( $E_i = 5$  kJ) am Elevatorfuß. Über einen angebrachten Messstutzen (36) wurde dieser auf der Elevatorvorderseite in den Elevatorfuß eingebracht. Durch ein Zündgerät (46) konnte der chemische Zünder mit Spannung beaufschlagt, und entzündet werden. Mit einem Multimeter (49) wurde die korrekte elektrische Verbindung der Zündkabel und damit das Nicht-Auslösen des chemischen Zünders auf Grund von fehlerhaften elektrischen Kontakten überprüft. Das Beaufschlagen des Zünders mit Spannung triggerte zusätzlich die Messdatenerfassung.

Die während des Explosionsablaufes von den Druck- und Flammensensoren erzeugten Messsignale wurden von einem Transientenrekorder (45) mit Messsoftware aufgezeichnet und gespeichert. Die Messsignale der piezoelektrischen Druckaufnehmer wurden durch Ladungsverstärker (43) mit Tiefpassfilter verstärkt. Vor Beginn der Versuchsserien wurden alle Druckmessketten, also piezoelektrische Druckaufnehmer + Ladungsverstärker + Transientenrekorder, mit einem Kalibriermanometer hoher Genauigkeit

auf den zu erwartenden Messbereich kalibriert (Druckmesskettenkalibrierung Anhang E.4). Der zu erwartende Messbereich wurde dabei auf  $p=2$  bar und  $t=5$  s festgelegt.

## 3.2 Versuchsdurchführung

### 3.2.1 Versuchsprogramm

Um die in Abschnitt 1.1 definierten Fragestellungen beantworten zu können, wurde ein Versuchsprogramm erarbeitet, welches bereits vorhandene Messdaten ergänzt. Dabei wurden die in Abschnitt 2.2 ausgewählten Produkte in Kombination mit den folgenden Entlastungsflächenkonfigurationen berücksichtigt.

- (1) Druckentlastung an Elevatorkopf, beiden Elevatorschächten und Elevatorfuß.
- (2) Druckentlastung an Elevatorkopf und beiden Elevatorschächten.
- (3) Druckentlastung nur am Elevatorkopf.

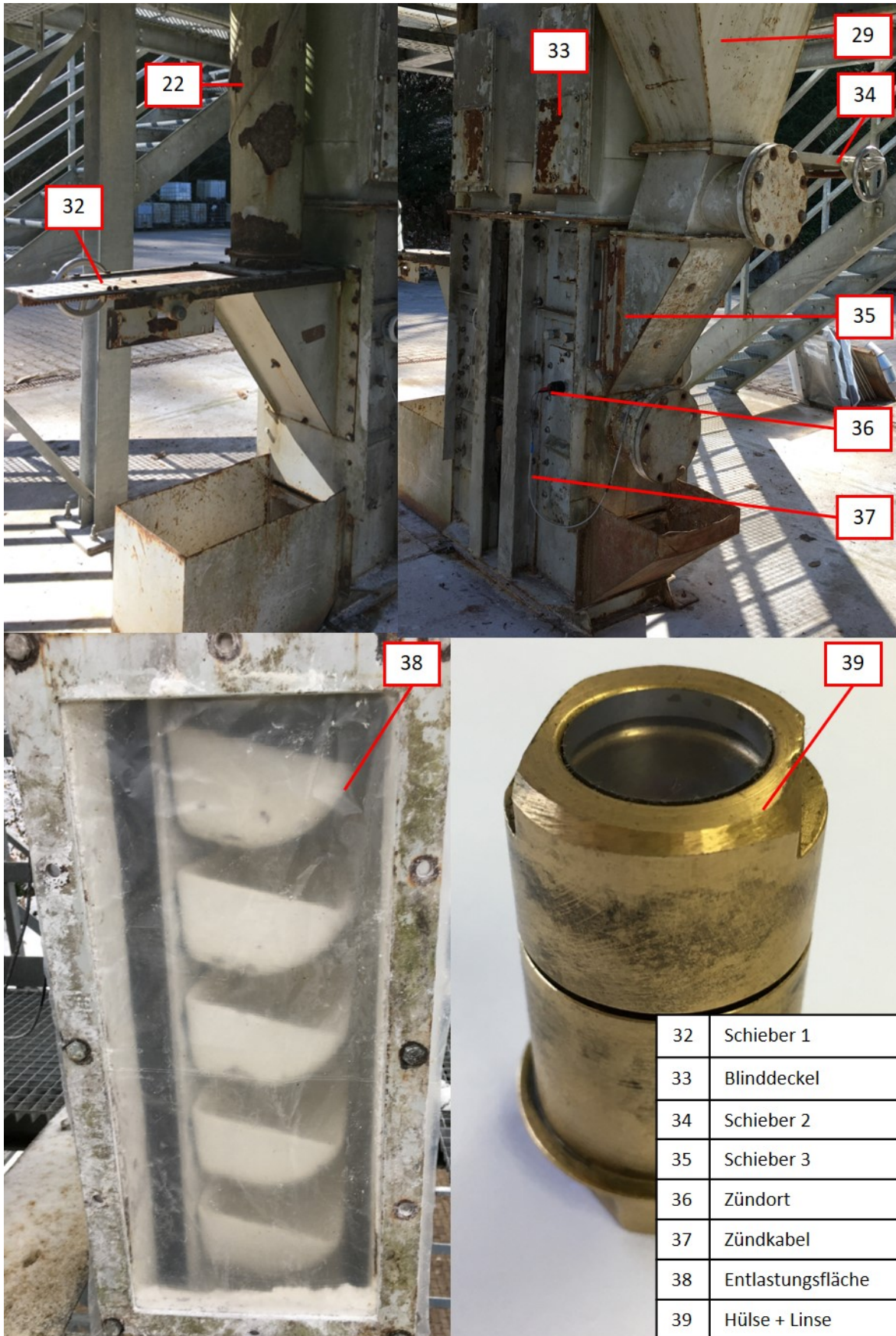
Um das Versuchsprogramm in der zur Verfügung stehenden Zeit durchführen und die erhaltenen Messdaten auswerten zu können wurde die Versuchsanzahl je Parameterkonfiguration auf 3 bis 4 Versuche festgelegt. Bei getrockneter Maisstärke (P19.1-MS) wurde auf Grund möglicher zu erwartender hoher Explosionsüberdrücke bei Entlastungsflächenkonfiguration (3) und damit Schaden des Versuchsaufbaus auf diese Parameterkombination verzichtet. Somit wurde das in Tabelle 3.1 dargestellte Versuchsprogramm erstellt. Insgesamt wurden im Rahmen dieser Arbeit 19 Explosionsversuche am Rundschachtelevator nach der in Abschnitt 3.2.2 beschriebenen Vorgehensweise durchgeführt.

Produkt	Druckentlastung	Versuchsanzahl	Versuchserie
ungetr. Weizenstärke (P20.4-WS)	Kopf, Schächte, Fuß	4	F
ungetr. Weizenstärke (P20.4-WS)	Kopf, Schächte	4	F
ungetr. Weizenstärke (P20.4-WS)	Kopf	4	F
getr. Maisstärke (P19.1-MS)	Kopf, Schächte, Fuß	3	G
getr. Maisstärke (P19.1-MS)	Kopf, Schächte	4	G

Tabelle 3.1: Im Rahmen dieser Arbeit durchgeführtes Versuchsprogramm.

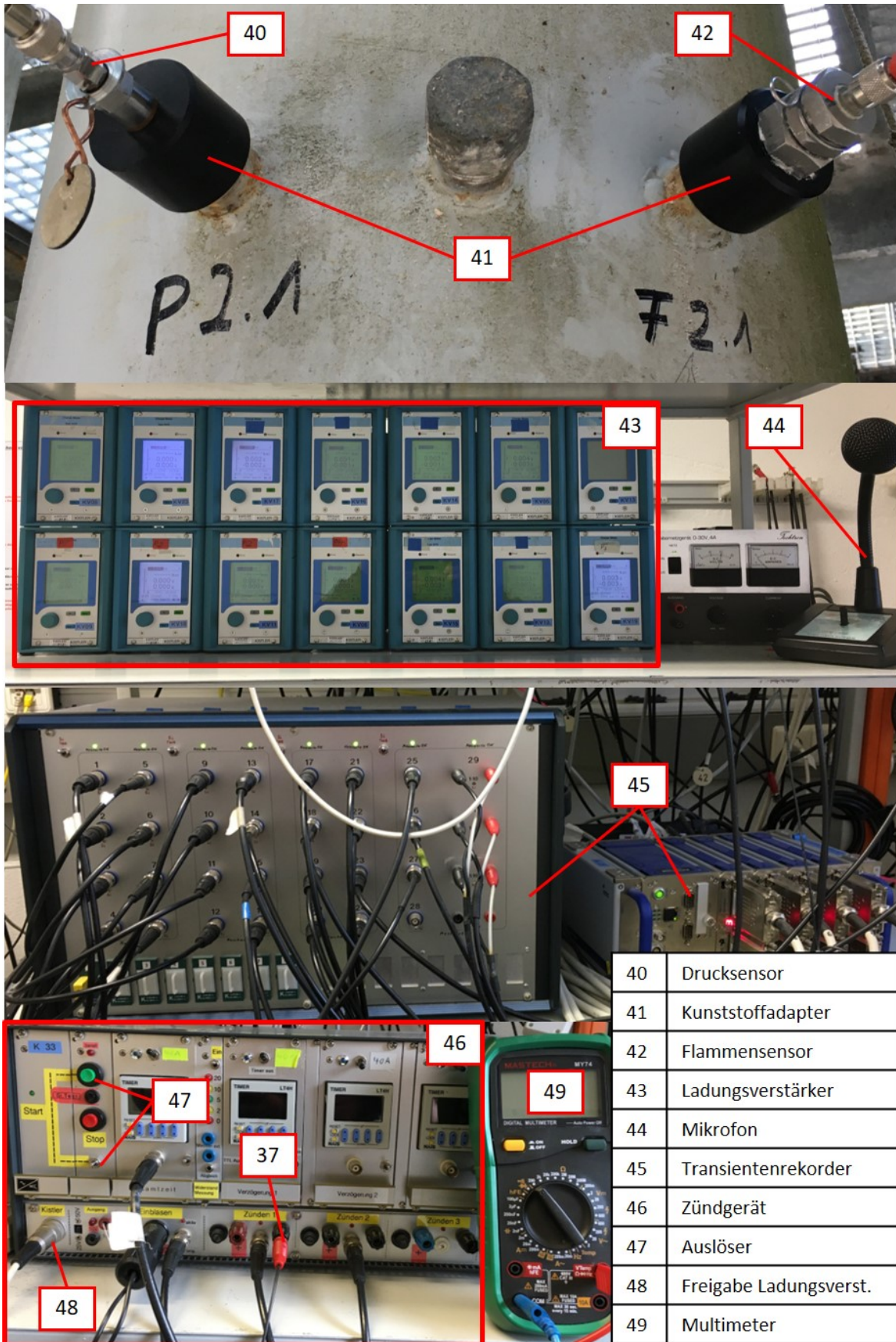
### 3.2.2 Versuchsablauf

Der Versuchsablauf der im Rahmen dieser Arbeit durchgeführten Versuche entspricht dem Versuchsablauf von älteren Versuchen am Rund- und Rechteckschachtelevator. Dabei wird, wie in Abschnitt 1.3 beschrieben, der für Staubexplosionen in Becherelevatoren besonders kritischste Betriebszustand des Elevatorleerlauf simuliert. Dabei



32	Schieber 1
33	Blindeckel
34	Schieber 2
35	Schieber 3
36	Zündort
37	Zündkabel
38	Entlastungsfläche
39	Hülse + Linse

Abbildung 3.3: Oben: Elevatorfuß mit Schiebern und Zündort. Unten links: Mit PE-Folie verschlossene Druckentlastungsfläche (Elevatorschacht). Unten rechts: Hülse mit Glaslinse.



40	Drucksensor
41	Kunststoffadapter
42	Flammensensor
43	Ladungsverstärker
44	Mikrofon
45	Transientenrekorder
46	Zündgerät
47	Auslöser
48	Freigabe Ladungsverst.
49	Multimeter

Abbildung 3.4: Verwendete Messtechnik und Zündgerät.



wird an den Oberflächen innerhalb des Versuchselevator abgelagerter Staub, der im Betriebszustand durch Produktabrieb von groben Schüttgütern entsteht, durch das laufende Becherwerk aufgewirbelt. Bei der Simulation dieses Betriebszustands wurde wie folgt vorgegangen.

Zunächst wurde der Versuchselevator im Stillstand mit Produkt befüllt. Hierzu wurden die Schieber 2 (34) und 3 (35) am Elevatorfuß geöffnet. Der Verschluss des Produkteintrages (29) wurde ebenfalls geöffnet und 100 kg Produkt (4 Säcke) in den Produkteintrag gegeben. Anschließend wurden die Schieber 2 und 3 geschlossen. Um einen Kreislaufbetrieb zu ermöglichen wurde Schieber 1 (32) des Fallrohres geöffnet. Anschließend wurde das Becherwerk des Elevators gestartet und für  $t = 10$  min mit maximaler Geschwindigkeit betrieben. In dieser Zeit wurde das zuvor eingefüllte Produkt kontinuierlich vom Becherwerk in den Elevatorkopf gefördert und rutschte anschließend über das Fallrohr in den Elevatorfuß herab. Das Produkt wurde für die vorgegebene Zeit im Kreislauf gefahren. Anschließend wurde die Klappe (24) des Fallrohres betätigt und das Produkt im Elevator dem Produktaustrag (25) zugeführt. War der Elevator vollständig entleert wurde das Becherwerk zum Stillstand gebracht. Danach wurden nacheinander alle Flammensensoren vom Versuchselevator entfernt, Produktablagerungen beseitigt und die Sensoren wieder angebracht. Dies begünstigte eine zuverlässige Funktionsweise und gute Messsignale der Sensoren. Anschließend wurde der Schieber des Fallrohres (32) geschlossen und der chemische Zünder (36) montiert. Mit einem Multimeter (49) wurde der elektrische Widerstand des chemischen Zünders mit Zündkabel gemessen.

Anschließend wurde die Messtechnik in Bereitschaft versetzt. Das Becherwerk und die Absaugung wurden zeitgleich eingeschaltet. Nach einer Verzögerungszeit von  $t_v = 60$  s nach dem Einschalten von Becherwerk und Absaugung wurde das aufgewirbelte Staub/Luft-Gemisch entzündet. Die erzeugten Messdaten wurden abgespeichert und nach der in Abschnitt 3.3 beschriebenen Vorgehensweise ausgewertet. Nach einem Zeitraum von  $t \approx 10$  min nach der Entzündung wurden Becherwerk und Absaugung ausgeschaltet. Der Versuchselevator wurde für weitere Versuche vorbereitet.

## 3.3 Datenauswertung

Die Messergebnisse aller durchgeführten Versuche wurden nach dem im Folgenden beschriebenen Verfahren ausgewertet.

### 3.3.1 Explosionsdruck

Für die Beurteilung von Explosionsabläufen und die Angabe und Bewertung von für Becherelevatoren nötigen Mindestfestigkeiten sind die auftretenden maximalen Drücke von Explosionsverläufen besonders relevant. Da in der Regel mehrere Messpositionen, Versuche und Versuchsreihen verglichen wurden, wurde der maximal auftretende Explosionsdruck wie folgend untergliedert.

- $p_{m,P}$ : maximaler Explosionsdruck einer Messposition

- $p_m$ : maximaler Explosionsdruck eines Einzelversuch
- $p_{ex}$ : maximaler Explosionsdruck einer Versuchsreihe

Das Vorgehen zur Bestimmung der genannten maximalen Explosionsdrücke ist in Abbildung 3.5 exemplarisch dargestellt. Diese zeigt den bei Versuch F11 an den Messpositionen P2 und P5, und den bei Versuch F12 an der Messposition P3.1 gemessenen Explosionsdruck  $p$  in Abhängigkeit von der Zeit. Die Versuche F11 und F12 sind mit ungetrockneter Weizenstärke im Rundschachtelevator durchgeführte Explosionsversuche mit Druckentlastung nur am Elevatorkopf. Diese Versuchsreihe umfasst dabei die Versuche F9 bis F12. Der in Abbildung 3.5 dargestellte maximale Explosionsdruck der Messposition P5 ( $p_{m,P5}$ ) ist der maximal gemessene Wert des grün dargestellten Explosionsdruck in Abhängigkeit von der Zeit und beträgt  $p_{m,P5} = 0,167$  bar.  $t_{m,P5}$  ist der zugehörige Zeitwert. Der maximale Explosionsdruck des Einzelversuches F11 ( $p_m$ ) ist das Maximum der in F11 bestimmten maximalen Explosionsdrücke der Messpositionen und wird in Versuch F11 an der Messposition P2 bestimmt (blaue Kurve). Deshalb ist  $p_m = p_{m,P2} = 0,228$  bar. Der maximale Explosionsdruck  $p_{ex}$  gibt den im Rahmen einer Versuchsreihe maximal gemessenen Explosionsdruck wieder. Dieser wurde im betrachteten Beispiel bei Versuch F12 an der Messposition P3.1 beobachtet (magentafarbene Kurve).

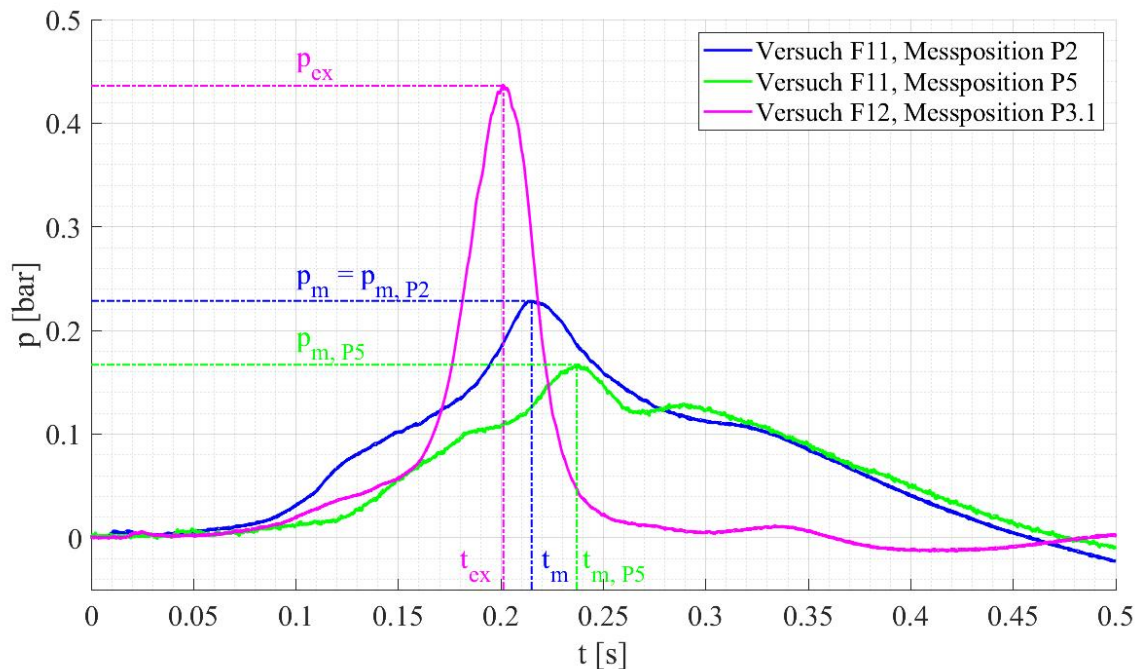


Abbildung 3.5: Exemplarische, an ausgewählten Messpositionen gemessene Druckverläufe einer Weizenstärkeexplosion im Versuchselevator bei Druckentlastung nur am Elevatorkopf.

### 3.3.2 Flammenlaufzeit und mittlere Flammengeschwindigkeit

Die *Flammenlaufzeit*  $t_f$  beschreibt den Zeitpunkt ab Messbeginn bei dem eine Flamme die entsprechende Messposition erreicht. Als Kriterium hierfür gilt das Überschreiten einer Spannung von  $U \approx 100$  mV die von dem entsprechenden Flammensensor ausgegeben wird (vgl. Abbildung 3.6). Einige Flammensensoren, die in geringer Entfernung zum Zündort verbaut sind (z.B. F1-F2, F1.1-F2.1) erfassten die bei der Auslösung des chemischen Zünders entstandene Flamme und überschritten dadurch eine Spannung von  $U \approx 100$  mV. Bei den Sensoren F1 und F1.1 ging in der Regel die durch den chemischen Zünder erzeugte Flamme ohne Abfall des Messsignal in die Flamme der Staubexplosion über. Im gemessenen Spannungsverlauf war an diesen Messpositionen also kein Unterschied zwischen Zündung und Staubexplosion erkennbar. Bei den Messpositionen F2 und F2.1, welche die entstehenden Flammen des chemischen Zünder ebenfalls erfassten, fiel die ausgegebene Spannung unmittelbar nach der Zündung in der Regel deutlich unter  $U = 100$  mV ab. Die eigentliche Flamme, welche durch Verbrennung des Staub/Luft Gemisches entstand, erreichte die Messposition einige Millisekunden später. Die von dem Sensor ausgegebene Spannung stieg dann erneut auf  $U > 100$  mV (Abbildung 3.6) Die Flammenlaufzeit wurde dann beim zweiten Überschreiten des Messsignal von  $U \approx 100$  mV definiert.

Bei einigen Explosionsversuchen wurden sekundäre Explosionen mit Flammenausbreitung oder das mehrfache zeitlich versetzte Passieren von Flammen an einer Messposition (vgl. Abschnitt 4 Ergebnisse) beobachtet. Aus diesem Grund ist es möglich, dass einer Messposition während eines Einzelversuches mehrere Flammenlaufzeiten zugeordnet wurden.

Aus den bestimmten Flammenlaufzeiten wurde nach Formel 3.1 die mittlere Flammengeschwindigkeit  $\bar{v}_f$  bestimmt. Dabei ist  $t_{f,2} - t_{f,1}$  die Differenz der Flammenlaufzeit von zwei aufeinanderfolgenden Flammensensoren.  $\Delta h$  ist der Abstand zwischen eben diesen Sensoren. Die mittlere Flammengeschwindigkeit wurde stets in Ausbreitungsrichtung der Flammen bestimmt und ist ein Maß für die Ausbreitungsgeschwindigkeit von Flammen im Bereich zwischen zwei Messpositionen. Die Ausbreitungsrichtung der Flammen wurde durch aufsteigende Sortierung der Flammenlaufzeit ermittelt. War beispielsweise  $t_{f,F1} < t_{f,F2} < t_{f,F3}$  breitete sich die Flamme von Messposition F1 über F2 nach Messposition F3 aus. Die maximal auftretende mittlere Flammengeschwindigkeit ist  $\bar{v}_{f,max}$ . Diese wurde, analog zum Explosionsdruck (vgl. Abschnitt 3.3.1), in die maximale mittlere Flammengeschwindigkeit eines Einzelversuches  $\bar{v}_{f,m}$  und die maximale mittlere Flammengeschwindigkeit einer Versuchsreihe  $\bar{v}_{f,ex}$  untergliedert.

$$\bar{v}_f = \frac{h}{t_{f,2} - t_{f,1}} \quad (3.1)$$

Bei einigen Explosionen konnten an Flammensensoren keine eindeutigen Flammensignale gemessen werden, obwohl die Flammenfront nachweislich diese Messpositionen erreichte. Gründe dafür waren oftmals die Belegung der Sensoren durch abgelagertes Produkt, was den Lichteinfall in die Sensoren behinderte und dadurch die von den Sensoren ausgegebene Spannung deutlich verminderte. Des Weiteren ist es möglich, dass sich Flammen zwischen Elevatorschacht und Gurtband so ausbreiteten, dass sich

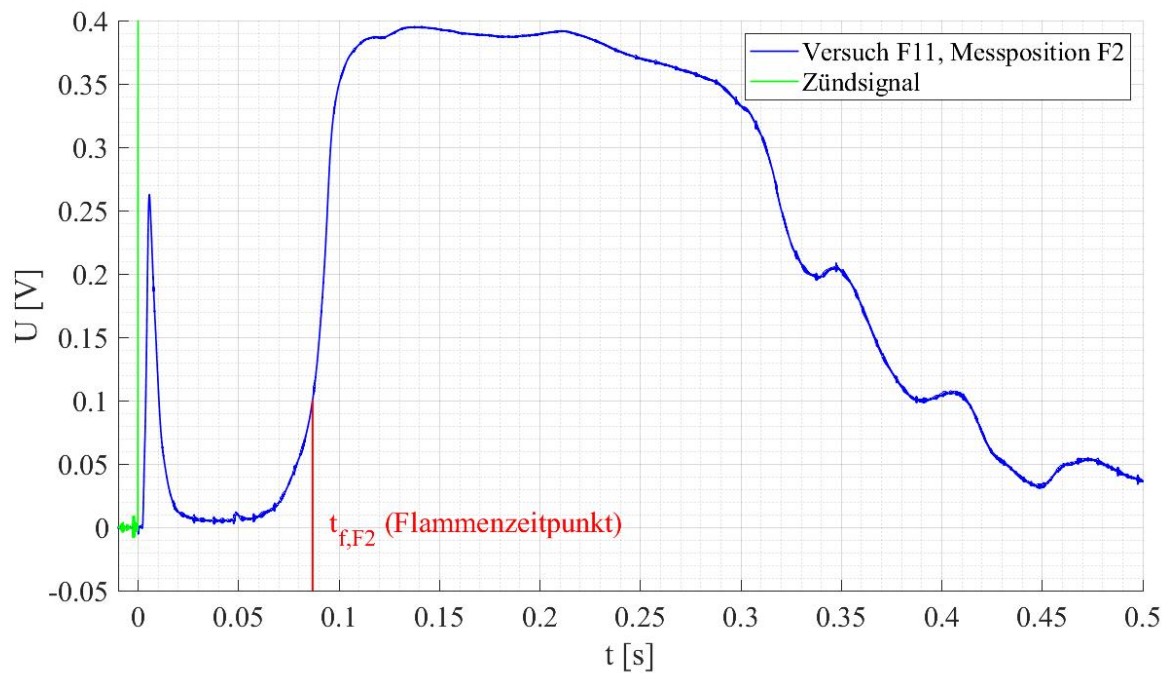


Abbildung 3.6: Exemplarischer gemessener Spannungs-Zeit Verlauf der Messposition F2 einer Weizenstärkeexplosion im Versuchselevator bei Druckentlastung nur am Elevatorkopf.

das Gurtband oder die Becher zwischen Lichtsensor und Flamme befand und dadurch den Lichteinfall in diesen deutlich reduzierte. Dies äußerte sich auf Grund der geringeren Lichtintensität besonders bei schwachen Explosionsverläufen. Deshalb konnten nicht immer eindeutige Flammenlaufzeiten und mittlere Flammengeschwindigkeiten bestimmt werden.

# Kapitel 4

## Ergebnisse

### 4.1 Flammenausbreitung

Anhand der bestimmten Flammenlaufzeiten  $t_f$  und den entsprechenden Messpositionen lässt sich die Ausbreitung der Flammen in Abhängigkeit von der Zeit einordnen. Bei den im Rahmen dieser Arbeit durchgeführten Versuchen (vgl. Abschnitt 3.2.1) wurden unabhängig von der Entlastungsflächenkonfiguration oder des verwendeten Produktes unterschiedliche, im Folgenden aufgelistete Flammenausbreitungen beobachtet. Die Flammen breiteten sich dabei stets vom Zündort im Elevatorfuß beginnend im Versuchselevator aus. Die Häufigkeit des Auftretens der jeweiligen Flammenausbreitungen variierte und ist in Tabelle 4.1 dargestellt. Wie in Tabelle 4.1 zu erkennen, traten die Flammenausbreitungen A), B) und C) am häufigsten, nämlich in jeweils 33 %, 26 % und 21 % der durchgeführten Versuche, auf. Flammenausbreitung D) und E) traten jeweils in 10 % der durchgeführten Versuche auf.

- A) Beide Elevatorschächte hinauf. Flamme erlischt nach einigen Metern im Rücklaufschacht, breitet sich allerdings vom Förderschacht über den Elevatorkopf den Rücklaufschacht herab aus.
- B) Förderschacht hinauf und über den Elevatorkopf den Rücklaufschacht herab.
- C) Beide Elevatorschächte hinauf, Flamme erlischt nach einigen Metern.
- D) Beide Elevatorschächte hinauf. Flamme erlischt nach einigen Metern im Förderschacht, breitet sich allerdings vom Rücklaufschacht über den Elevatorkopf den Förderschacht herab aus.
- E) Förderschacht hinauf, Flamme erlischt nach einigen Metern.

Flammenausbreitung	A)	B)	C)	D)	E)
Versuchszahl	6	5	4	2	2
Häufigkeit	33 %	26 %	21 %	10 %	10 %
Versuche	F9, F10, F12, G1, G2, G7	F3, F4, F5, G3, G6	F2, F6, F7, F8	G4, G5	F1, F11

Tabelle 4.1: Versuchszahl, Häufigkeit und Versuche der im Rahmen dieser Arbeit auftretenden Flammenausbreitungen.

Abbildung 4.1 zeigt an exemplarisch ausgewählten Versuchen die drei am häufigsten vorkommenden Flammenausbreitungen A) bis C). Dabei sind die Flammenlaufzeiten aus den Versuchen F5, F8 und F9 in Abhängigkeit von der Messposition dargestellt. Versuch F9 zeigt Flammenausbreitung A), Versuch F5 zeigt Flammenausbreitung B) und Versuch F8 zeigt Flammenausbreitung C). Bei Flammenausbreitung A) bzw. Versuch F9 breitete sich die Flammenfront am Zündort ( $H=0$  m) und zum Zündzeitpunkt ( $t_f=0$  s) beginnend, mit zunehmender Flammenlaufzeit  $t_f$  beide Elevatorschächte hinauf aus. Nach Messposition F4.1 und  $t \approx 220$  ms nach Zündung erloschte die Flamme im Rücklaufschacht, breitete sich allerdings den Förderschacht hinauf bis zum Elevatorkopf ( $H=13,5$  m) aus und wanderte, der Laufrichtung des Becherwerks folgend, über den Elevatorkopf den Rücklaufschacht hinab. Flammenausbreitung B) (Versuch F5) ist ähnlich zu Flammenausbreitung A). Im Gegensatz zu Versuch F9 breitete sich die Flamme nach der Zündung allerdings nicht im Rücklaufschacht aus. Bei Flammenausbreitung C) (Versuch F8) breitete sich die Flamme nach der Zündung ebenfalls in beiden Elevatorschächten aus, erloschte allerdings nach einigen Metern (in F8 nach  $H=4$  m) in den Schächten.

Bei einigen Versuchen, wie beispielsweise Versuch G4, wurden nachgelagerte Explosionen beobachtet, die zu einer weiteren Flammenausbreitung innerhalb der Schächte führten. Diese nachgelagerten Explosionen traten in allen beobachteten Fällen mehrere Sekunden nach der Zündung auf, also deutlich nachdem die durch Entzündung des chemischen Zünders verursachte Druck- und Flammenfront sich im Versuchselevator ausbreitete. Abbildung 4.2 zeigt exemplarisch für Versuch G4 diese Beobachtung. Dabei ist der an der Messposition P5.1 bzw. F5.1, also in  $H=10$  m im Rücklaufschacht gemessene Druck-Zeit-Verlauf und Spannungs-Zeit-Verlauf dargestellt. Es ist erkennbar, dass kurze Zeit nach der Zündung ( $t \approx 0,15$  s) der maximale Explosionsdruck  $p_{m,P}$  an dieser Messposition auftrat, aber keine Flammenfront die Messposition erreichte. Zum Zeitpunkt  $t \approx 2,7$  s war an dieser Messposition dann ein deutliches Flammensignal mit geringerem Explosionsdruck ( $p \approx 0,130$  bar) erkennbar. Betrachtet man die Flammenlaufzeiten  $t_f$  des Versuches G4 in Abhängigkeit von der Zeit (Abbildung 4.3) wird deutlich, dass die Flammenausbreitung nach der Zündung unterbrach ( $t \approx 0,15$  s) und zu einem späteren Zeitpunkt ( $t \approx 2,4$  s) an der Messposition P4.1 fortgesetzt wurde. Die Flammen erloschten also nach wenigen Metern (nach  $H=4$  m) in den Schächten breiteten sich dann aber, über 2 Sekunden später, weiter aus. Betrachtet man zusätzlich Ausschnitte aus einer Videoaufzeichnung des Explosionsablaufes ist erkennbar, dass zum Zeitpunkt  $t=0,15$  s, also dem Zeitpunkt von  $p_{m,P}$ , alle Entlastungsflächen geöffnet waren, und unverbranntes Produkt über die Entlastungsflächen

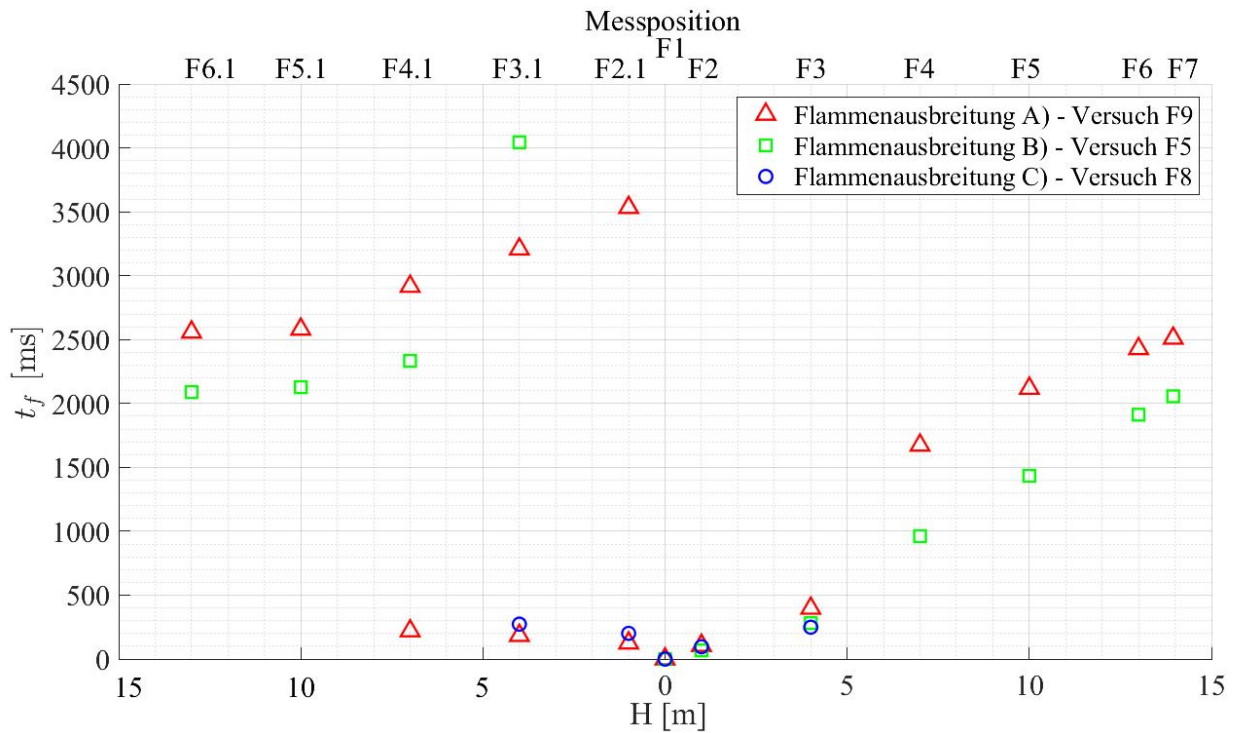


Abbildung 4.1: Exemplarische Darstellung der im Rahmen dieser Arbeit am Häufigsten vorkommenden Flammenausbreitungen.

ausgetragen wurde. Ungefähr 2,5 Sekunden später (bei  $t = 2,7$  s), also zum Zeitpunkt der weiteren Flammenausbreitung, war auf der Videoaufzeichnung eine Entzündung des ausgetragenen Staubes erkennbar. Wie in Abbildung 4.3 zu sehen, begann die weitere Flammenausbreitung an Messposition F4.1 also in der Höhe der Entlastungsflächen in den Elevatorschächten. Die Flammenfront wanderte anschließend den Rücklaufschacht hinauf, und über den Elevatorkopf den Rücklaufschacht bis zu Messposition F4 herab.

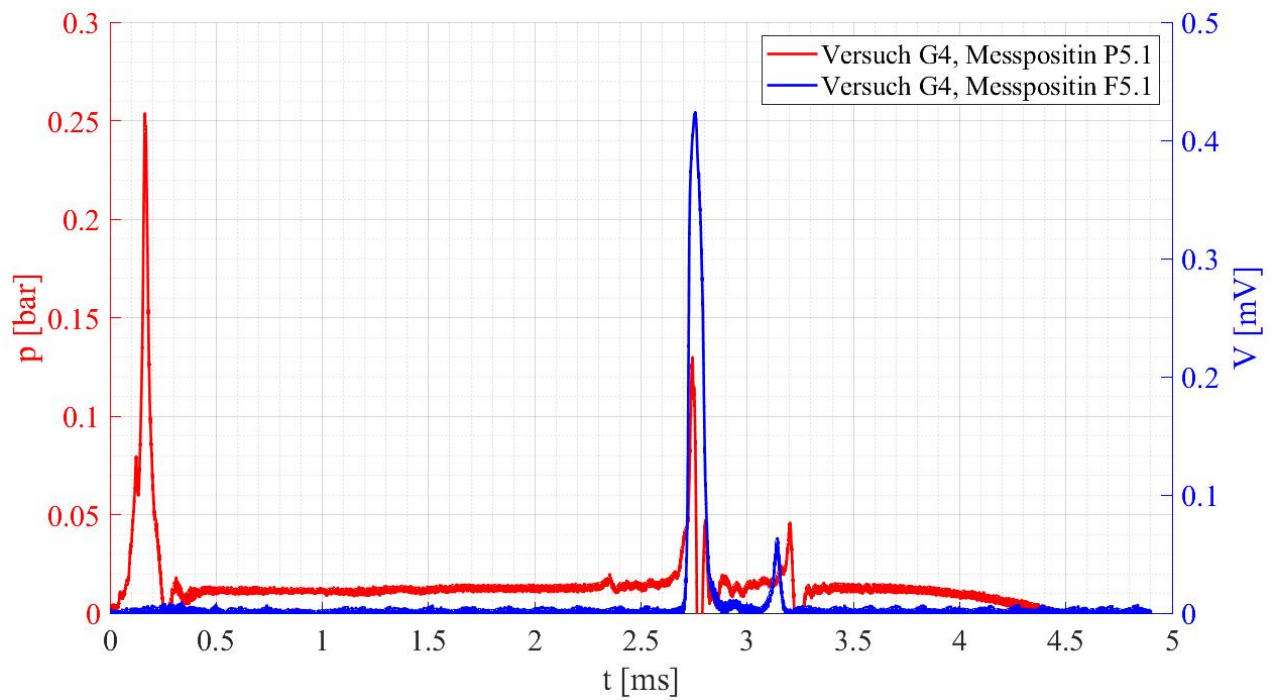


Abbildung 4.2: Bei Versuch G4 an der Messposition P5.1 und F5.1 gemessener Druck-Zeit-Verlauf und Spannungs-Zeit-Verlauf.

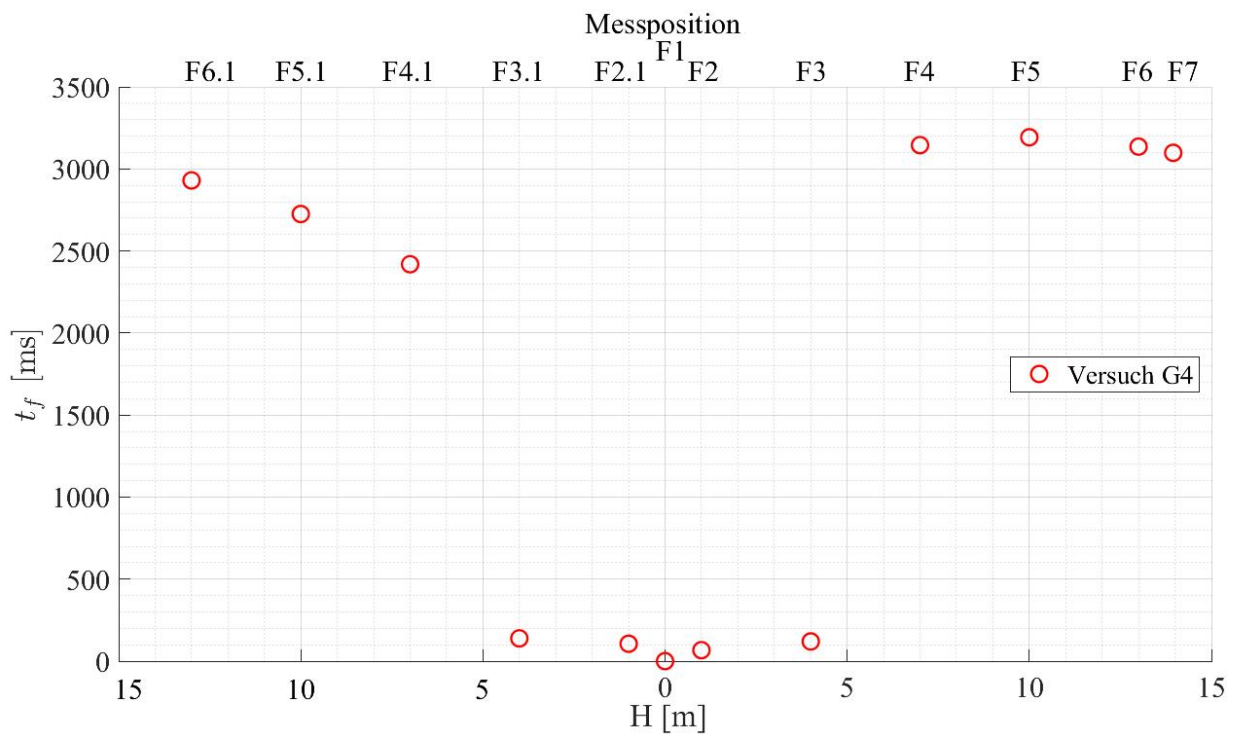


Abbildung 4.3: Bei Versuch G4 bestimmte Flammenlaufzeiten  $t_f$  in Abhängigkeit von der Messposition.





Abbildung 4.4: Ausschnitt der bei Versuch G4 erstellten Videosequenz zum Zeitpunkt  $t= 0,2$  s und  $t= 2,7$  s nach der Zündung.

## 4.2 Mittlere Flammengeschwindigkeit

Die beobachtete Geschwindigkeit mit der sich die Flammen innerhalb des Versuchselevators ausbreiteten variierte in Abhängigkeit des verwendeten Produktes und der Entlastungsflächenkonfiguration. Betrachtet man die in Abbildung 4.5 dargestellte maximale mittlere Flammengeschwindigkeit der Versuchsreihe  $\bar{v}_{f,ex}$  ist erkennbar, dass diese sowohl für ungetrocknete Weizenstärke (Versuchsserie F) als auch für getrocknete Maisstärke (Versuchsserie G) mit Abnahme der Zahl der Entlastungsflächen steigt.

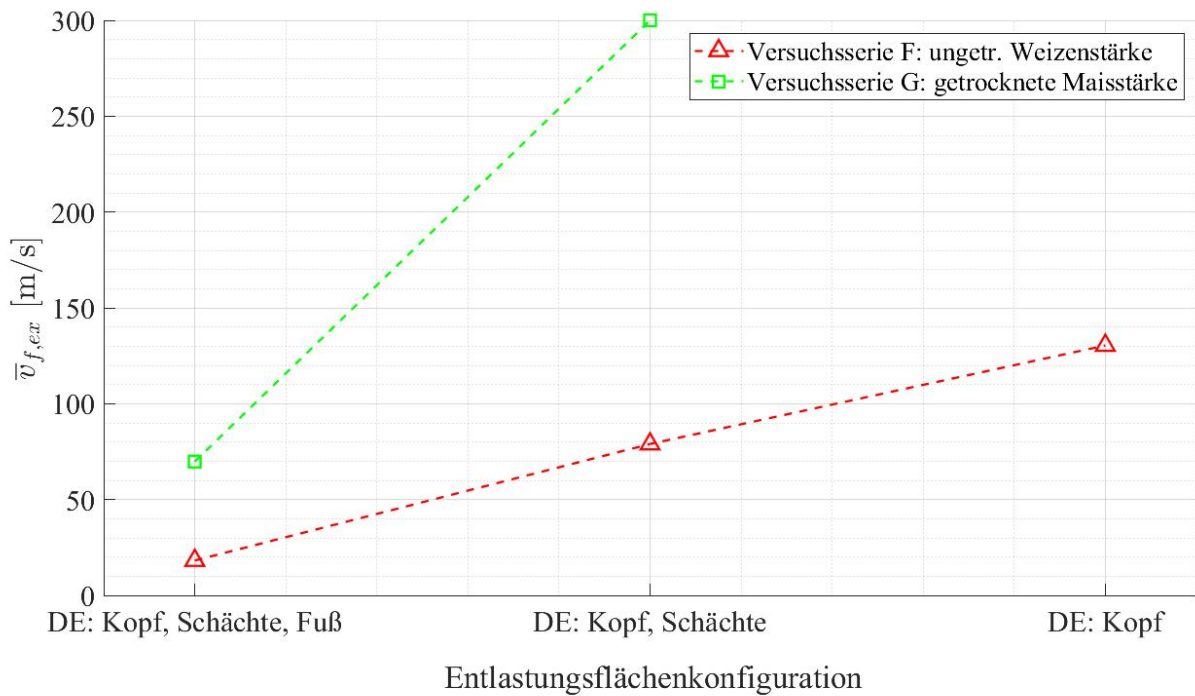


Abbildung 4.5: Maximale mittlere Flammengeschwindigkeit der Versuchsreihe in Abhängigkeit von der Entlastungsflächenkonfiguration für ungetrocknete Weizenstärke und getrocknete Maisstärke.

Bei ungetrockneter Weizenstärke nimmt  $\bar{v}_{f,ex}$  von  $\bar{v}_{f,ex} = 18,2$  m/s bei Druckentlastung an Elevatorkopf, -schächten, und -fuß (siehe Tabelle 4.2) über  $\bar{v}_{f,ex} = 78,9$  m/s bei Druckentlastung an Elevatorkopf und -schächten auf  $\bar{v}_{f,ex} = 130,4$  m/s bei Druckentlastung am Elevatorkopf zu. Bei getrockneter Maisstärke ist die Zunahme von  $\bar{v}_{f,ex}$  zwischen den Entlastungsflächenkonfigurationen höher. Dabei nimmt  $\bar{v}_{f,ex}$  von  $\bar{v}_{f,ex} = 69,8$  m/s bei Druckentlastung an Elevatorkopf, -schächten, und -fuß auf  $\bar{v}_{f,ex} = 300$  m/s bei Druckentlastung an Elevatorkopf und -schächten zu.

Bei identischer Entlastungsflächenkonfiguration und Zunahme des  $K_{St}$ - Wertes von  $K_{St} = 145$  bar·m/s bei ungetrockneter Weizenstärke (vgl. Tabelle 2.1) auf  $K_{St} = 190$  bar·m/s bei getrockneter Maisstärke steigt  $\bar{v}_{f,ex}$  ebenfalls. Die in Abbildung 4.5 dargestellten maximalen mittleren Flammengeschwindigkeiten der Versuchsreihen sind in Tabelle 4.2 aufgelistet.

Betrachtet man die in Tabelle 4.2 ebenfalls dargestellten Messorte zwischen denen  $\bar{v}_{f,ex}$

DE:	Kopf, Schächte, Fuß		Kopf, Schächte		Kopf
Produkt	Weizenst.	Maisst.	Weizenst.	Maisst.	Weizenst.
$\bar{v}_{f,ex}$ [m/s]	18,5	69,8	78,9	300,0	130,4
Messort $\bar{v}_{f,ex}$ zwischen	F2.1   F3.1	F2   F3	F5. 1  F6.1	F3.1   F4.1	F5.1   F6.1
Versuch	F2	G3	F5	G5	F9

Tabelle 4.2: Die in Abbildung 4.5 dargestellten Werte. Maximale mittlere Flammgeschwindigkeit einer Versuchsreihe  $\bar{v}_{f,ex}$  mit entsprechendem Versuch und Messort.

Messort $\bar{v}_{f,m}$ zwischen	F2   F3	F5   F6	F2.1   F3.1	F3.1   F4.1	F5.1   F6.1
Versuchszahl	7	1	6	2	3
Häufigkeit	37 %	5%	32%	10%	16%
Versuche	F1, G1, G2, G3,G6, G7, F11	F3	F2, F6, F7, F8, G4, F12	F4, G5	F5, F9, F10

Tabelle 4.3: Versuchsanzahl, Häufigkeit und zugehörige Versuche des Messort der maximalen Flammgeschwindigkeiten eines Einzelversuches  $\bar{v}_{f,m}$  der im Rahmen dieser Arbeit durchgeführten Versuche.

auftrat, ist erkennbar dass sowohl bei ungetrockneter Weizenstärke als auch bei getrockneter Maisstärke bei Druckentlastung an Elevatorkopf, -schächten und -fuß  $\bar{v}_{f,ex}$  zwischen  $H=1$  m und  $H=4$  m in den Elevatorschächten, also zwischen F2 und F3 im Förderschacht, bzw. zwischen F2.1 und F3.1 im Rücklaufschacht auftrat. Bei Druckentlastung an Elevatorkopf und -schächten trat  $\bar{v}_{f,ex}$  hingegen bei Weizenstärke zwischen  $H=4$  m und  $H=7$  m und bei Maisstärke zwischen  $H=10$  m und  $H=13$  m im Rücklaufschacht auf. Bei Druckentlastung am Elevatorkopf trat  $\bar{v}_{f,ex}$  ebenfalls zwischen  $H=10$  m (F5.1) und  $H=13$  m (F6.1) im Rücklaufschacht auf.

Betrachtet man zusätzlich die maximalen mittleren Flammgeschwindigkeit der Einzelversuche  $\bar{v}_{f,m}$  bzw. den Ort an dem diese auftraten, ist erkennbar, dass unabhängig des verwendeten Produktes die Häufigkeit des Auftretens von  $\bar{v}_{f,m}$  zwischen  $H=1$  m und  $H=4$  m in den Elevatorschächten am höchsten war. Wie in Tabelle 4.3 erkennbar, trat in 69 % der durchgeführten Versuche  $\bar{v}_{f,m}$  zwischen  $H=1$  m und  $H=4$  m in den Elevatorschächten (in 37 % der Versuche im Förderschacht und in 32% der Versuche im Rücklaufschacht) auf. In 21 % der durchgeführten Versuche trat  $\bar{v}_{f,m}$  zwischen  $H=10$  m und  $H=13$  m in den Elevatorschächten (in 5 % der Versuche im Förderschacht und in 16% der Versuche im Rücklaufschacht) auf. Lediglich bei zwei Versuchen (10 %) trat  $\bar{v}_{f,m}$  zwischen  $H=4$  m und  $H=7$  m im Rücklaufschacht auf.

Zwischen Druckentlastung an Elevatorkopf, -schächten, und -fuß und Druckentlastung an Elevatorkopf und -schächten ist kein Unterschied in der Häufigkeit des Auftretens von  $\bar{v}_{f,m}$  an einer Messposition erkennbar. Bei Druckentlastung nur am Elevatorkopf trat  $\bar{v}_{f,m}$  im Vergleich zu den übrigen Entlastungsflächenkonfigurationen vermehrt (in 50 % der Versuche) zwischen  $H=10$  m und  $H=13$  m auf. In 50 % der Versuche mit Druckentlastung Kopf wurde  $\bar{v}_{f,m}$  zwischen  $H=1$  m und  $H=4$  m in Förder- oder

Rücklaufschacht beobachtet. Die mittleren Flammengeschwindigkeiten aller Versuche sind in Anhang B.7 dargestellt.

Es konnte keine Korrelation zwischen dem Ort von  $\bar{v}_{f,m}$  und der Flammenausbreitung (vgl. Abschnitt 4.1) festgestellt werden. Allerdings wurde beobachtet, dass mittlere Flammengeschwindigkeiten von  $\bar{v}_{f,m} > 42$  m/s nur bei Flammenausbreitung A), B) oder D) auftreten. Demzufolge ist für höhere Flammengeschwindigkeiten ( $\bar{v}_{f,m} > 42$  m/s), unabhängig des Ortes von  $\bar{v}_{f,m}$ , eine Ausbreitung der Flammen über eine ausreichende Länge innerhalb der Elevatorschächte und damit eine hinreichende Beschleunigung der Flammen Voraussetzung. Erlischte die Flamme also nach einigen Metern in den Elevatorschächten (Flammenausbreitung C) und E))war die maximale mittlere Flammengeschwindigkeit  $\bar{v}_{f,m}$  entsprechend gering.

### 4.3 Maximaler Explosionsdruck

Zur Einordnung der während der durchgeführten Versuche auftretenden Überdrücke wurden die nach Abschnitt 3.3.1 definierten maximalen Explosionsdrücke verwendet. Diese geben die aus Sicherheitstechnischen Aspekten kritischsten Explosionsdrücke, also die jeweils beobachteten maximalen Explosionsdrücke, bzw. das so genannte „worst-case“-Szenario wieder.

Abbildung 4.6 zeigt die im Rahmen dieser Arbeit beobachteten maximalen Explosionsdrücke  $p_{ex}$  mit Messunsicherheit in Abhängigkeit von der Entlastungsflächenkonfiguration, für die verwendeten Produkte getrocknete Maisstärke und ungetrocknete Weizenstärke. Die dargestellten Explosionsdrücke sind in Tabelle 4.4 mit entsprechendem Versuch aufgelistet. Es ist erkennbar, dass  $p_{ex}$  bei getrockneter Maisstärke von Druckentlastung an Elevatorkopf, -schächten und -fuß ( $p_{ex} = 0,258$  bar) zu Druckentlastung an Elevatorkopf und -schächten ( $p_{ex} = 1,313$  bar) stark zu nahm. Bei ungetrockneter Weizenstärke war diese Zunahme von  $p_{ex}$  geringer. Bei ungetrockneter Weizenstärke nahm  $p_{ex}$  von  $p_{ex} = 0,260$  bar bei Druckentlastung an Elevatorkopf, -schächten und -fuß auf  $p_{ex} = 0,403$  bar bei Druckentlastung an Elevatorkopf und -schächten zu. Zwischen Druckentlastung an Elevatorkopf und -schächten und Druckentlastung ausschließlich am Elevatorkopf ist bei ungetrockneter Weizenstärke im Rahmen der Messunsicherheit lediglich eine Tendenz erkennbar.

DE:	Kopf, Schächte, Fuß		Kopf, Schächte		Kopf
Produkt	Weizenst.	Maisst.	Weizenst.	Maisst.	Weizenst.
$p_{ex}$ [bar]	0,254	0,258	0,403	1,313	0,436
Messort $p_{ex}$	Elevatorfuß	Elevatorfuß	Elevatorfuß	P3.1	P3.1
Versuch	F1	G3	F8	G5	F12

Tabelle 4.4: Die in Abbildung 4.6 dargestellten Werte. Maximaler Explosionsdruck  $p_{ex}$  mit entsprechendem Versuch und Ort von  $p_{ex}$ .

Bei Druckentlastung an Elevatorkopf, -schächten und -fuß ist zwischen getrockneter Maisstärke und ungetrockneter Weizenstärke im Rahmen der Messunsicherheit kein

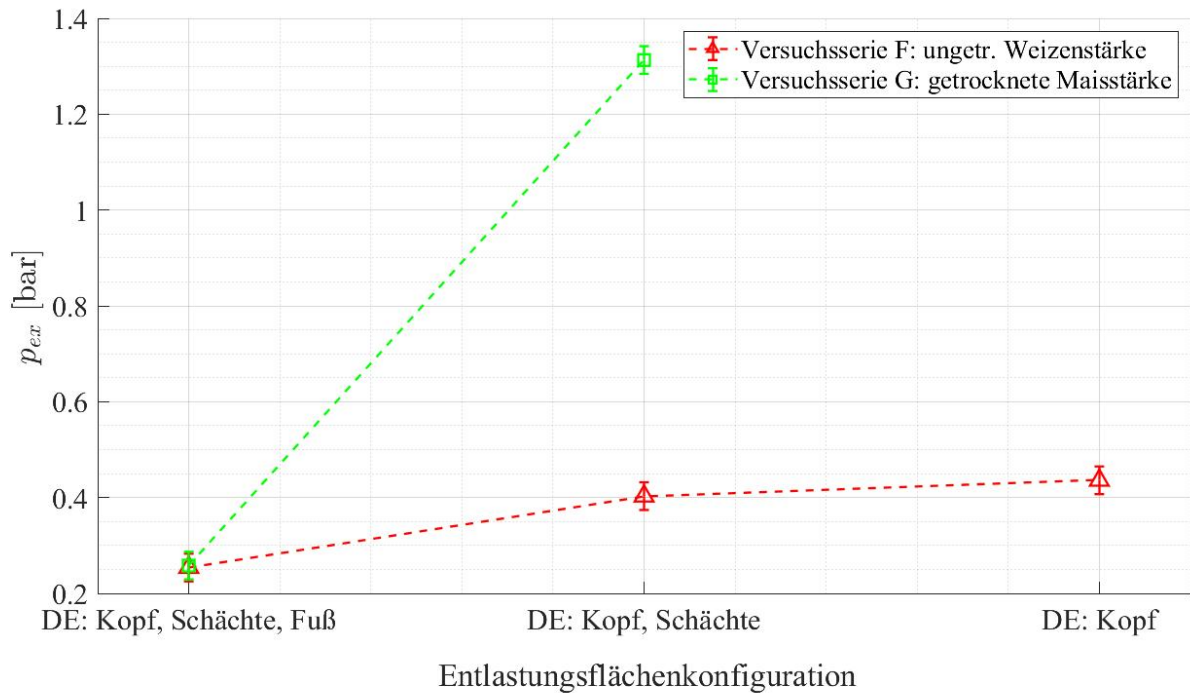


Abbildung 4.6: Maximaler Explosionsdruck  $p_{ex}$  in Abhängigkeit von der Entlastungsflächenkonfiguration für ungetrocknete Weizenstärke und getrocknete Maisstärke.

Unterschied von  $p_{ex}$  erkennbar. Bei Druckentlastung an Elevatorkopf und -schächten nimmt  $p_{ex}$  von  $p_{ex} = 0,403$  bar bei ungetrockneter Weizenstärke auf  $p_{ex} = 1,313$  bar bei getrockneter Maisstärke zu.

Betrachtet man den maximalen Explosionsdruck  $p_{m,P}$  in Abhängigkeit von der Messposition für die durchgeführten Versuche (exemplarisch in Abbildung 4.7 dargestellt, weitere Versuchsreihen siehe Anhang B.1 bis B.4.) ist erkennbar, dass sowohl  $p_{m,P}$  in Abhängigkeit von der Messposition als auch  $p_{ex}$  für Versuche mit identischer Versuchsdurchführung stark unterschiedlich war. Ein Grund hierfür kann unter anderem die im Allgemeinen schlechte Reproduzierbarkeit von Explosionsversuchen sein und wird in Abschnitt 4 näher diskutiert. In Abbildung 4.7 sowie in den Grafiken B.1 bis B.4 im Anhang ist ebenfalls gut erkennbar, dass unter Einbezug der Messunsicherheit der Ort von  $p_{m,P}$  oft nicht eindeutig auf eine Messposition begrenzt werden konnte. Oftmals konnte der Ort von  $p_{m,P}$  lediglich auf einen Bereich im Versuchselevator wie z.B. „Elevatorkopf“ oder „Elevatorkopf + Rücklaufschacht bis  $H = 4\text{m}$ “, nicht aber auf eine einzelne Messposition eingegrenzt werden. In Versuch F8 in Abbildung 4.7 war beispielsweise der Ort von  $p_{m,P}$  unter Einbezug der Messunsicherheiten im Bereich zwischen den Messpositionen P2.1, P1 und P2, also im Elevatorkopf vorzufinden. Besonders bei Versuchen mit vergleichsweise geringen maximalen Explosionsdrücken ist relativ betrachtet der Messfehler auf Grund des niedrigen Messwertes hoch. Bei einigen Versuchen mit geringer Druckentwicklung (F5 und F7 in Abbildung 4.7) war deshalb unter Einbezug der Messunsicherheit keine Messposition und kein Bereich innerhalb des Versuchselevators mit erhöhtem Druck erkennbar.

Die Messpositionen und Bereiche im Versuchselevator in denen die im Rahmen dieser Arbeit beobachteten maximalen Explosionsdrücke  $p_m$  auftraten, sind mit Häufigkeit,

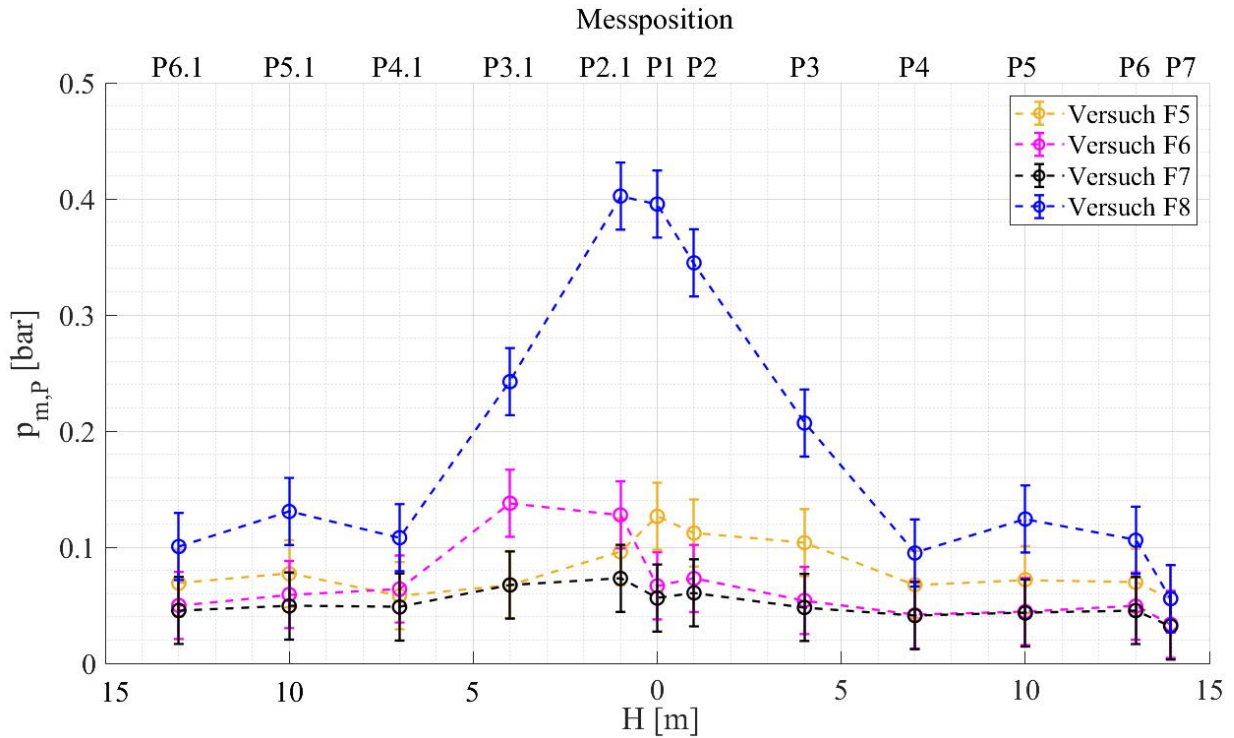


Abbildung 4.7: Maximaler Explosionsdruck  $p_{m,P}$  in Abhängigkeit von der Messposition für ungetrocknete Weizenstärke bei Druckentlastung an Elevatorkopf und -schächten.

Versuchsanzahl und entsprechenden Versuchen in Tabelle 4.5 dargestellt. Demnach konnte in 36 % der durchgeführten Versuche  $p_m$  keiner Messposition und keinem Bereich im Versuchselevator eindeutig zugeordnet werden. Dies betraf ausschließlich Versuche mit ungetrockneter Weizenstärke, unabhängig von der Entlastungsflächenkonfiguration. In 27 % der durchgeführten Versuche trat  $p_m$  im Bereich des Elevatorfuß und der Elevatorschächte bis  $H = 4$  m (Messposition P3 und P3.1) auf. Bei 26 % der durchgeführten Versuche wurde  $p_m$  an Messposition P3.1, in 11 % der Versuche dagegen nur am Elevatorfuß beobachtet.

Vergleicht man den Ort der maximalen Explosionsdrücke  $p_m$  mit dem Ort der maximalen Flammgeschwindigkeiten  $\bar{v}_{f,m}$  ist erkennbar, dass diese im Allgemeinen korrelierten (siehe Tabelle 4.6). Bei Versuchen mit vergleichsweise geringen mittleren Flam-

Messort $p_m$	-	El.fuß	El.fuß + P3	El.fuß + P3.1	P3.1
Versuchsanzahl	7	2	2	3	5
Häufigkeit	36 %	11%	11%	16%	26%
Versuche	F2, F3, F4 F5, F7, F10 F11	F8, G3	G1, G2	F1, F6, G6	G4, G5, G7, F9, F12

Tabelle 4.5: Versuchsanzahl, Häufigkeit des Auftretens und Versuche des Messort von  $p_m$  der im Rahmen dieser Arbeit durchgeführten Versuche.

mengeschwindigkeiten, war meist auch der maximale Explosionsdruck  $p_m$  gering. Bei vergleichsweise hohen mittleren Flammengeschwindigkeiten traten auch vergleichsweise hohe maximale Explosionsdrücke auf. Bei Versuch G5 wurde beispielsweise die im Rahmen dieser Arbeit höchste mittlere Flammengeschwindigkeit von  $\bar{v}_{f,m} = 300$  m/s und der im Rahmen dieser Arbeit höchste maximale Explosionsdruck  $p_m$  von  $p_m = 1,313$  bar beobachtet. Beide Maximalwerte traten dabei an Messposition P3.1 bzw. zwischen F3.1 und F4.1 im Rücklaufschacht auf. Bei einigen Versuchen wurde allerdings trotz geringer mittlerer Flammengeschwindigkeit und Flammenausbreitung C) oder E) (Flamme erlischt nach einigen Metern) ein relativ hoher maximaler Explosionsdruck von  $p_m > 0,2$  bar beobachtet (Versuche F1, F8 und F11). Demzufolge können Explosionsdrücke von  $p_m > 0,2$  bar auch bei geringen mittleren Flammengeschwindigkeiten und ohne Flammenausbreitung innerhalb der Elevatorschächte auftreten. Bei den im Rahmen dieser Arbeit durchgeführten Versuchen konnte kein allgemein gültiger Zusammenhang zwischen der Flammenausbreitung und dem maximalen Explosionsüberdruck  $p_m$  festgestellt werden. Es wurde jedoch beobachtet, dass (mit Ausnahme von Versuch F8) maximale Explosionsdrücke von  $p_m > 0,4$  bar nur bei Flammenausbreitung A), B) oder D) auftraten. Demzufolge führt eine Flammenausbreitung innerhalb der Elevatorschächte bzw. kein Erlöschen der Flammen nach wenigen Metern zu vergleichsweise hohen Explosionsdrücken.

Ver- such	Entlastungsflächen- konfiguration	Flam- menaus- breitung	$\bar{v}_{f,m}$ [m/s]	Ort von $\bar{v}_{f,m}$ zwischen	$p_m$ [bar]	Ort von $p_m$
F1	Kopf, Schächte, Fuß	E)	13,27	F2   F3	0,254	E.Fuß/P3.1
F2	Kopf, Schächte, Fuß	C)	18,52	F2.1   F3.1	0,070	-
F3	Kopf, Schächte, Fuß	B)	13,22	F5   F6	0,086	-
F4	Kopf, Schächte, Fuß	B)	15,71	F3.1   F4.1	0,081	-
G1	Kopf, Schächte, Fuß	A)	44,78	F2   F3	0,229	E.Fuß/P3
G2	Kopf, Schächte, Fuß	A)	57,69	F2   F3	0,218	E.Fuß/P3
G3	Kopf, Schächte, Fuß	B)	69,77	F2   F3	0,258	E.Fuß
F5	Kopf, Schächte	B)	78,95	F5.1   F6.1	0,130	-
F6	Kopf, Schächte	C)	31,58	F2.1   F3.1	0,138	E.Fuß/P3.1
F7	Kopf, Schächte	C)	26,09	F2.1   F3.2	0,073	-
F8	Kopf, Schächte	C)	41,67	F2.1   F3.3	0,403	E.Fuß
G4	Kopf, Schächte	D)	90,91	F2.1   F3.1	0,574	P3.1
G5	Kopf, Schächte	D)	300,00	F3.1   F4.1	1,313	P3.1
G6	Kopf, Schächte	B)	48,39	F2   F3	0,456	E.Fuß/P3.1
G7	Kopf, Schächte	A)	78,95	F2   F3	0,772	P3.1
F9	Kopf	A)	130,43	F5.1   F6.1	0,426	P3.1
F10	Kopf	A)	125,00	F5.1   F6.1	0,252	-
F11	Kopf	E)	20,27	F2   F3	0,226	-
F12	Kopf	A)	56,60	F2.1   F3.1	0,436	P3.1

Tabelle 4.6: Zusammenfassung der im Rahmen dieser Arbeit erzielten Messergebnisse. Entlastungsflächenkonfiguration, Flammenausbreitung,  $\bar{v}_{f,m}$ , Ort von  $\bar{v}_{f,m}$ ,  $p_m$  und Ort von  $p_m$  der im Rahmen dieser Arbeit durchgeführten Versuche.

## 4.4 Maximaler Explosionsdruck von Rund- und Rechteckschachtelevator

Wie in Abschnitt 1.3 beschrieben, basieren die für Rechteckschachtelevatoren geltenden Auslegungsempfehlungen für Explosionsdruckentlastung in Kombination mit explosionsdruckstoßfester Bauweise von Becherelevatoren mit rechteckigen Schächten, auf den im Rahmen von Explosionsversuchen beobachteten maximalen Explosionsdrücken. Hierfür wurden die maximalen Explosionsdrücke einer Versuchsreihe  $p_{\text{ex}}$  herangezogen. Tabelle 4.7 zeigt die im Rahmen dieser Arbeit beobachteten maximalen Explosionsdrücke  $p_{\text{ex}}$  mit  $K_{\text{st}}$ -Wert der entsprechenden Produkte. Die in Tabelle 4.7 ebenfalls dargestellte Mindestfestfestigkeit von Rechteckschachtelevatoren, wurden nach Formel 1.1 in Abschnitt 1.3 bestimmt. Hierfür wurde  $p_{\text{min}}$  für die in Tabelle 4.7 dargestellten  $K_{\text{st}}$ -Werte bei entsprechender Druckentlastungsflächenkonfigurationen bestimmt. Die in Formel 1.1 benötigten Koeffizienten wurden Tabelle 1.1 für die jeweilige Entlastungsflächenkonfiguration nach [7] entnommen. Dabei gilt:

- Druckentlastung an Elevatorkopf, -schächten und -fuß (Einbauabstand der Entlastungsflächen in den Schächten: 6 m) entspricht Kurve 2 in Tabelle 1.1 bzw. CEN/TR 16829.
- Druckentlastung an Elevatorkopf und -schächten (Einbauabstand der Entlastungsflächen in den Schächten: 6 m) entspricht Kurve 4 in Tabelle 1.1 bzw. CEN/TR 16829.
- Druckentlastung ausschließlich am Elevatorkopf (Einbauabstand der Entlastungsflächen in den Schächten: 12 m oder Druckentlastung ausschließlich am Elevatorkopf mit einer maximalen Schachtlänge von 12 m) entspricht Kurve 5 in Tabelle 1.1 bzw. CEN/TR 16829.

Betrachtet man nun die dargestellten Werte ist erkennbar, dass sowohl für ungetrocknete Weizenstärke als auch für getrocknete Maisstärke unter Einbezug der Messunsicherheit  $u$  für jede Entlastungsflächenkonfiguration gilt:  $p_{\text{ex}} < p_{\text{min}}$ . Somit unterschreiten die im Rahmen dieser Arbeit beobachteten maximalen Explosionsdrücke die für Rechteckschachtelevatoren in aktuellen Richtlinien und Technical Reports festgelegten Mindestfestigkeiten.

Betrachtet man weiterhin alle bisherigen am Rundschachtelevator durchgeführten Explosionsversuche, lassen sich folgende Aussagen treffen.

- 1) Bei Druckentlastung an Elevatorkopf, -schächten und Fuß (Kurve 2 nach [7]) ist kein erhöhter Explosionsdruck von Rundschachtelevatoren im Vergleich zu Rechteckschachtelevatoren erkennbar. Alle bei Versuchen am Rundschachtelevator beobachteten maximalen Explosionsdrücke unterschreiten bei dieser Entlastungsflächenkonfiguration die in CEN/TR 16829 definierten Mindestfestigkeiten für Rechteckschachtelevatoren.



Ver- such	Produkt	Druckentlastungs- flächenkonfiguration	Kst [ $\frac{\text{bar}\cdot\text{m}}{\text{s}}$ ]	$p_{\text{ex}}$ [bar]	$u$ [mbar]	$p_{\text{min}}$ [bar]
F1	Weizenst. P20.5-WS	Kopf, Schächte, Fuß	145	0,25	28,9	0,61
F8	Weizenst. P20.5-WS	Kopf, Schächte	145	0,4	28,9	1,01
F12	Weizenst. P20.5-WS	Kopf	145	0,44	28,9	1,44
G3	Maisst. P19.1-MS	Kopf, Schächte, Fuß	190	0,26	28,9	1,32
G5	Maisst. P19.1-MS	Kopf, Schächte	190	1,31	28,9	1,95

Tabelle 4.7: Maximale Explosionsdrücke  $p_{\text{ex}}$  mit Messunsicherheit  $u$  der im Rahmen dieser Arbeit durchgeführten Explosionsversuche, sowie nach [7] definierten Mindestfestigkeiten  $p_{\text{min}}$ .

- 2) Bei Druckentlastung an Elevatorkopf und -schächten (Kurve 4 nach [7]) ist ebenfalls kein erhöhter Explosionsdruck von Rundschachtelevatoren im Vergleich zu Rechteckschachtelevatoren erkennbar. Alle bei Versuchen am Rundschachtelevator bei dieser Entlastungsflächenkonfiguration beobachteten maximalen Explosionsdrücke unterschreiten die in CEN/TR 16829 definierten Mindestfestigkeiten für Rechteckschachtelevatoren.
- 3) Bei Druckentlastung ausschließlich am Elevatorkopf (Kurve 5 nach [7]) ist eine Tendenz für einen erhöhten Explosionsdruck von Rundschachtelevatoren im Vergleich zu Rechteckschachtelevatoren erkennbar. Für eine abschließende, belastbare Aussage ist die Datenlage bei dieser Entlastungsflächenkonfiguration nicht ausreichend.

Diese Aussagen basieren, unter Einbezug von allen bisher durchgeführten Explosionsversuchen auf dem Vergleich des maximalen Explosionsdruck  $p_{\text{ex}}$  von Versuchen an Rund- und Rechteckschachtelevator. Hierfür wurde  $p_{\text{ex}}$  von Versuchen an Rund- und Rechteckschachtelevator bei identischer Entlastungsflächenkonfiguration und vergleichbaren Produkten betrachtet. Als vergleichbare Produkte galten identische Stäube die einen im Rahmen der Messunsicherheit identischen  $K_{\text{St}}$ -Wert, sowie vergleichbare explosionstechnische Kenngrößen wie untere Explosionsgrenze und Staubungsneigung besitzen. Für einen direkten Vergleich von Messergebnissen wurden Versuche mit Weizenmehl, Malzstaub und getrocknete Maisstärke herangezogen. Für diese Produkte liegen sowohl für Versuche am Rund- als auch am Rechteckschacht ausreichend Messdaten vor. Die für Explosionsversuche am Rechteckschachtelevator verwendete Produkte (in Tabelle 1.2 dargestellt) sind mit den in Tabelle 4.8 gezeigten Produkten, die für Explosionsversuche am Rundschachtelevator verwendet wurden, direkt vergleichbar. Bei getrockneter Maisstärke wurde auf Grund der höheren maximalen Explosionsdrücke im Vergleich zu Versuchsreihe G am Rundschachtelevator, Versuchsreihe C betrachtet.

Abbildungen 4.8 und 4.9 zeigen exemplarisch den direkten Vergleich von Rund- und Rechteckschachtelevator für getrocknete Maisstärke für zwei Entlastungsflächenkonfigurationen. Für die Entlastungsflächenkonfiguration mit Druckentlastung ausschließlich am Elevatorkopf liegen für getrocknete Maisstärke keine Messdaten am Rundschachtelevator vor. Mit dieser Parameterkombination wurden keine Versuche durchgeführt, da aufgrund der zu erwartenden hohen Explosionsdrücke mit Beschädigung

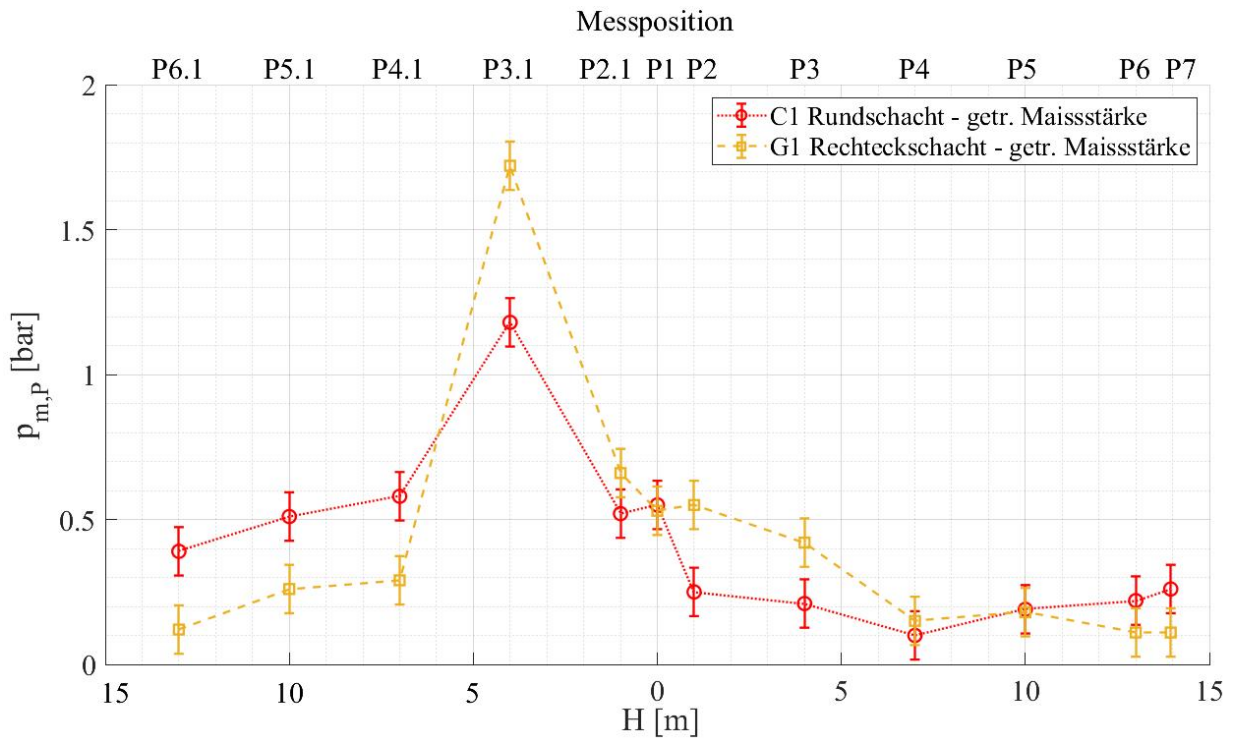


Abbildung 4.8: Maximaler Explosionsdruck  $p_{m,p}$  in Abhängigkeit von der Messposition der Versuche von  $p_{ex}$  für getrocknete Maisstärke an Rund- und Rechteckschachtelevator. Druckentlastung an Elevatorkopf, -schächten und -fuß. Versuch C1 (Rundscht):  $K_{st} = 183 \text{ bar} \cdot \text{m/s}^{-1}$ . Versuch G1 (Rechteckscht):  $K_{st} = 204 \text{ bar} \cdot \text{m/s}^{-1}$ .

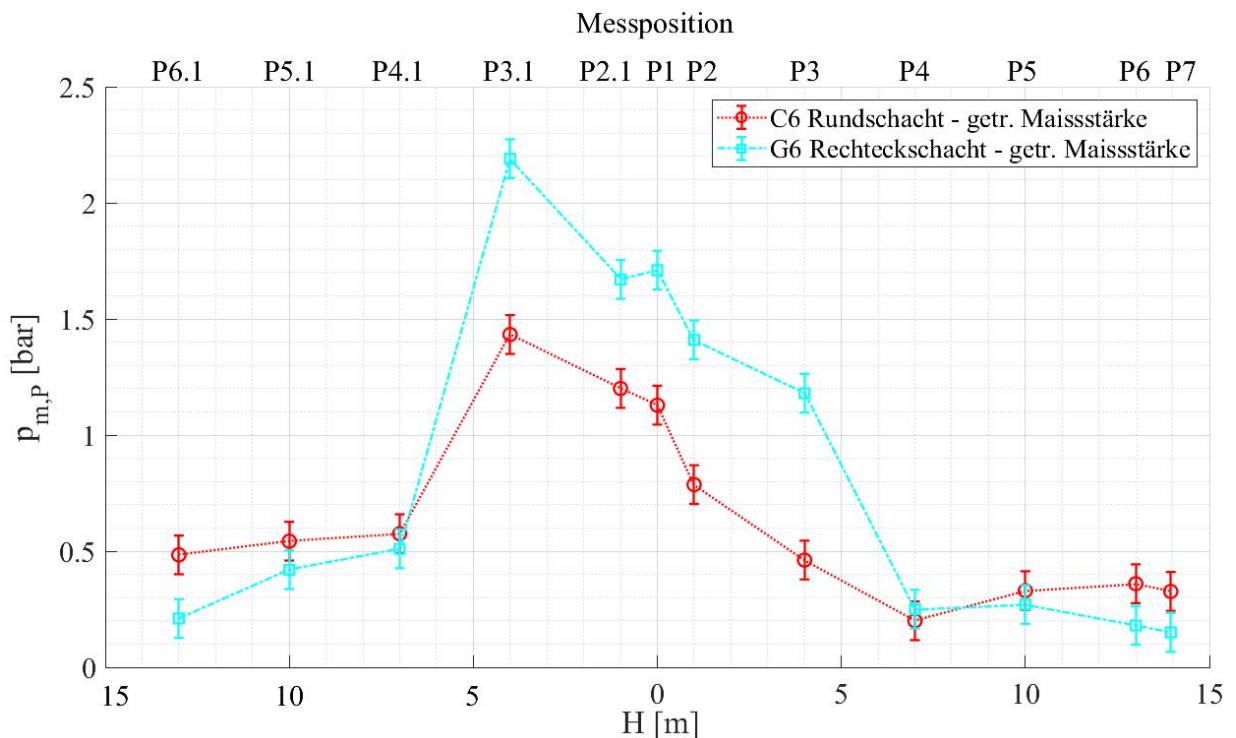


Abbildung 4.9: Maximaler Explosionsdruck  $p_{m,p}$  in Abhängigkeit von der Messposition der Versuche von  $p_{ex}$  für getrocknete Maisstärke an Rund- und Rechteckschachtelevator. Druckentlastung an Elevatorkopf und -schächten. Versuch C6 (Rundscht):  $K_{st} = 183 \text{ bar} \cdot \text{m/s}^{-1}$ . Versuch G6 (Rechteckscht):  $K_{st} = 204 \text{ bar} \cdot \text{m/s}^{-1}$ .

Staub	Versuchsreihe (Rundschacht)	$p_{\max}$ [bar]	$K_{st}$ [ $\frac{\text{bar} \cdot \text{m}}{\text{s}}$ ]	UEG g/m <sup>3</sup>
Weizenmehl	A	8,2	117	30
getr. Maisstärke	C	8,8	183	60
Malzstaub 4.1	D (D1,D4,D6,D7,D9)	8,5	143	30
Malzstaub 4.2	D (D3,D5,D8)	8,3	155	60
getr. Maisstärke P19.1-MS	G	9,0	190	60

Tabelle 4.8: Explosionstechnische Kenngrößen der zur Durchführung von Explosionsversuchen an einem Becherelevator mit runden Schächten verwendeten Stäube.

des Versuchselevators gerechnet werden musste. In den beiden Abbildungen sind die maximalen Explosionsdrücke  $P_{m,P}$  in Abhängigkeit von der Messposition für den Versuch, bei dem  $p_{\text{ex}}$  beobachtet wurde, sowohl für den Rundschacht- als auch für den Rechteckschachtelevator aufgetragen. In Anhang D.4 bis D.8 sind ferner die Explosionsverläufe mit dem maximalen Explosionsdruck  $p_{\text{ex}}$  von Weizenmehl und Malzstaub für Rund- und Rechteckschachtelevator zu finden.

Bei den dargestellten Explosionsverläufen von getrockneter Maisstärke ist erkennbar, dass sowohl bei Druckentlastung an Elevatorkopf, -schächten und -fuß (Abbildung 4.8), als auch bei Druckentlastung an Elevatorkopf und -schächten (Abbildung 4.9) der maximale Explosionsdruck  $p_{\text{ex}}$  am Rundschachtelevator  $p_{\text{ex}}$  am Rechteckschachtelevator nicht übersteigt. Bei den Produkten Weizenmehl (Abbildung D.4 im Anhang) und Malzstaub (Abbildung D.6 und D.7 im Anhang) ist dies ebenfalls der Fall.

Bei Druckentlastung ausschließlich am Elevatorkopf ist bei Malzstaub (Abbildung D.8 im Anhang) ein erhöhter Explosionsdruck am Rundschachtelevator im Vergleich zum Rechteckschachtelevator erkennbar. Bei Weizenstärke (Abbildung D.7 im Anhang) ist eine Tendenz für einen erhöhten Explosionsdruck am Rundschachtelevator erkennbar, diese geht allerdings in der vergleichsweise hohen Messunsicherheit unter. Trotz eines möglicherweise erhöhten Explosionsdruck im Vergleich zum Rechteckschachtelevator unterschreitet  $p_{\text{ex}}$  von Weizenmehl bei dieser Druckentlastungsflächenkonfiguration die geltenden Mindestfestigkeiten von Rechteckschachtelevatoren (Abbildung D.5).

In Abbildung 4.10 sind ferner alle maximalen Explosionsdrücke  $p_{\text{ex}}$  mit Messunsicherheit  $u$  in Abhängigkeit des  $K_{St}$ -Wert der am Rundschachtelevator durchgeführten Explosionsversuche dargestellt. Tabelle 4.9 zeigt die entsprechenden Werte. Die durch die Kurven 2, 4 und 5 in Abbildung 4.10 dargestellten Mindestfestigkeiten von Rechteckschachtelevatoren sind in Tabelle 4.9 für die  $K_{St}$ -Werte der entsprechenden Produkte ebenfalls dargestellt. Diese werden analog dem zuvor beschriebenen Vorgehen für die Werte in Tabelle 4.7 bestimmt. Es ist erkennbar, dass für Druckentlastung an Elevatorkopf, -schächten und fuß (Kurve 2 nach CEN/TR 16829) sowie für Druckentlastung an Elevatorkopf und -schächten (Kurve 4 nach CEN/TR 16829) die gemessenen maximalen Explosionsdrücke am Rundschachtelevator unter Einbezug der Messunsicherheit die für Rechteckschachtelevatoren geltenden Mindestfestigkeiten unterschreiten. Bei Druckentlastung ausschließlich am Elevatorkopf (Kurve 5 nach CEN/TR 16829) überschreiten bei den Versuchen mit Malzstaub (Versuche B7 und D6, in Tabelle 4.9 hervorgehoben) die gemessenen maximalen Explosionsdrücke die für Rechteckschachtelevatoren geltenden Mindestfestigkeiten.

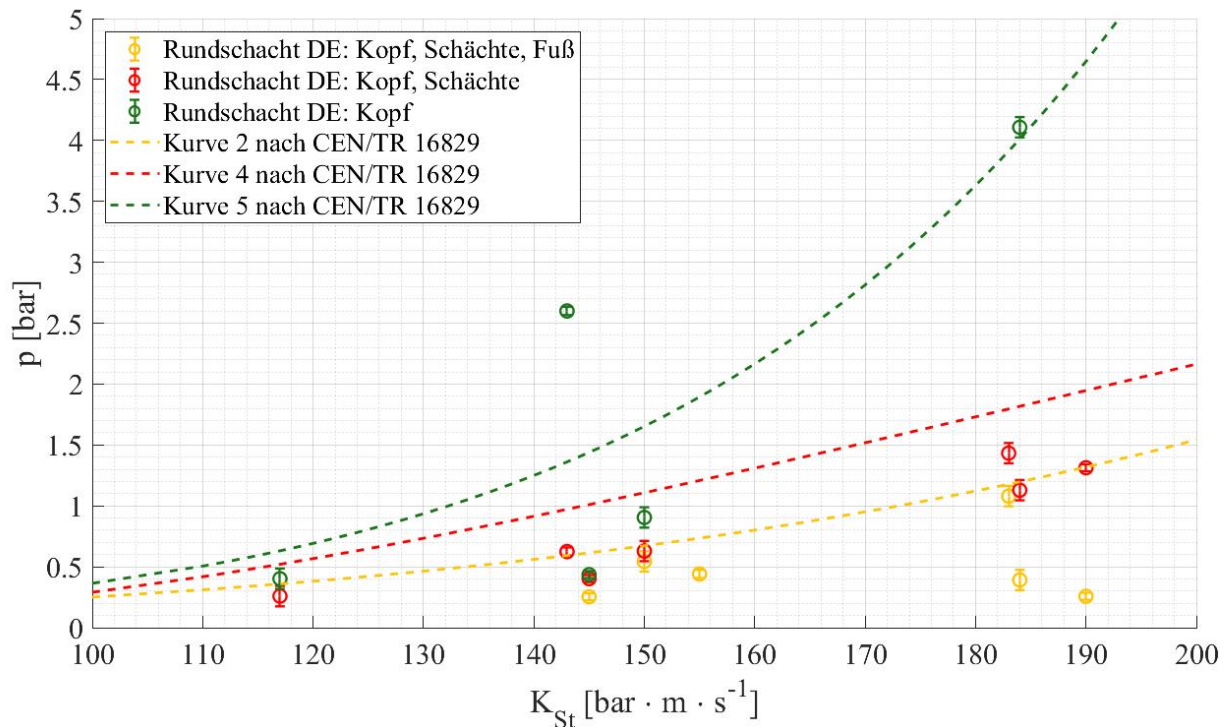


Abbildung 4.10: Maximaler Explosionsdruck  $p_{ex}$  mit Messunsicherheit  $u$  in Abhängigkeit des  $K_{St}$ -Wert aller am Rundschachtelevator durchgeführten Versuchsreihen. Die dargestellten Werte sind in Tabelle 4.9 aufgeführt.

Druckentlastung	Versuch	Produkt	$K_{St}$ [ $\frac{\text{bar} \cdot \text{m}}{\text{s}}$ ]	$p_{ex}$ [bar]	$u$ [mbar]	$p_{min}$ [bar]
Kopf, Schächte, Fuß	B1	Malzstaub 3	184	0,392	83,5	1,198
Kopf, Schächte, Fuß	C1	getr. Maisst.	183	1,08	83,5	1,178
Kopf, Schächte, Fuß	D3	Malzstaub 4.2	155	0,441	33,8	0,735
Kopf, Schächte, Fuß	E1	Maisst. 3402	150	0,544	83,5	0,673
Kopf, Schächte, Fuß	F1	Weizenst. P20.5-WS	145	0,254	28,9	0,615
Kopf, Schächte, Fuß	G3	getr. Maisst. P19.1-MS	190	0,258	28,9	1,318
Kopf, Schächte	A1	Weizenmehl	117	0,259	83,5	0,521
Kopf, Schächte	B4	Malzstaub 3	184	1,129	83,5	1,817
Kopf, Schächte	C6	getr. Maisst.	183	1,433	83,5	1,796
Kopf, Schächte	D4	Malzstaub 4.1	143	0,625	33,8	0,972
Kopf, Schächte	E4	Maisst. 3402	150	0,629	83,5	1,108
Kopf, Schächte	F8	Weizenst. P20.5-WS	145	0,403	28,9	1,010
Kopf, Schächte	G5	getr. Maisst. P19.1-MS	190	1,313	28,9	1,947
Kopf	A3	Weizenmehl	117	0,402	83,5	0,631
Kopf	B7	Malzstaub 3	184	<b>4,108</b>	83,5	<b>4,011</b>
Kopf	D6	Malzstaub 4.1	143	<b>2,6</b>	33,8	<b>1,361</b>
Kopf	E6	Maisst. 3402	150	0,905	83,5	1,653
Kopf	F12	Weizenst. P20.7-WS	145	0,436	28,9	1,439

Tabelle 4.9: In Abbildung 4.10 dargestellte Werte. Maximale Explosionsdrücke  $p_{ex}$  und  $K_{St}$ -Wert des entsprechenden Produktes aller am Rundschachtelevator durchgeführten Explosionsversuche, sowie nach Formel 1.1 bestimmte Mindestfestigkeit  $p_{min}$ .

# Kapitel 5

## Diskussion

Die in Abschnitt 4.1 beobachteten Flammenausbreitungen und der Zusammenhang des Auftretens von Flammenausbreitung C) und E) (Flamme erlischt nach wenigen Metern) mit überwiegend geringen Flammengeschwindigkeiten und geringen Explosionsdrücken ist plausibel. Ein Zusammenhang von ausgeprägter Flammenausbreitung (Flammenausbreitung A) B) D)) und Explosionsdrücken  $P_m > 0,4$  bar wurde bei vergleichbaren Elevatorversuchen ebenfalls beobachtet. Dass in 33 % der durchgeführten Versuche die Flammen nach wenigen Metern in den Schächten erlöschen, ist dagegen ein im Vergleich zu älteren Explosionsversuchen hoher Anteil [10].

Die im Rahmen dieser Arbeit beobachteten maximalen mittleren Flammengeschwindigkeiten  $\bar{v}_{f,ex}$  liegen in einem für Staubexplosionen an Becherelevatoren typischen Bereich. Deren Zunahme mit steigendem  $K_{St}$ -Wert des Produktes bzw. Abnahme der Anzahl der Entlastungsflächen ist zu erwarten und plausibel. Die Korrelation des Ortes der maximalen Flammengeschwindigkeit  $v_m$  und des Ortes des maximalen Explosionsdruck  $p_m$  konnte bei vergleichbaren älteren Versuchen ebenfalls festgestellt werden [10].

Die in dieser Arbeit beobachteten unterschiedlichen Explosionsverläufe und Streuungen der maximalen Explosionsdrücke  $p_m$  innerhalb einer Versuchsreihe wurde bei älteren Explosionsversuchen an Becherelevatoren ebenfalls festgestellt und kann auf verschiedene Gründe zurückzuführen sein. Die Reproduzierbarkeit von Explosionsversuchen ist im Allgemeinen, selbst unter standardisierten Laborbedingungen, wie beispielsweise in einer 20 L Laborapparatur, vergleichsweise schlecht. Der Grund ist unter anderem der komplexe Verbrennungsvorgang von Staub-Luft-Gemischen, bei dem nicht nur Eigenschaften des Staubes (Partikelgrößenverteilung, Oberflächenstruktur, Feuchtegehalt, etc.) sondern auch Aspekte wie Staubwolkenbildung, Interaktion von Partikeln sowie der Turbulenzzustand zum Zündzeitpunkt den Verbrennungsvorgang entscheidend beeinflussen können. Für die Heftigkeit von Staubexplosionen sind die Staubkonzentration, die Partikelgrößenverteilung des verwendeten Staubes und der Turbulenzzustand zum Zündzeitpunkt besonders relevant [1]. Im Gegensatz zu beispielsweise Explosionsversuchen in einer 20 L Laborapparatur können diese Aspekte bei Explosionsversuchen an einem Becherelevator nur bedingt beeinflusst werden. Bei Explosionsversuchen in geschlossenen Behältern wird eine Staubwolke mit definierter Staubkonzentration üblicherweise mittels unter Überdruck stehenden Staubvorratsbehältern, die eine quantifizierbare Staubmenge enthalten, erzeugt. Durch Einblasen über eine Düse wird aus

diesem Staub eine reproduzierbare Staubwolke bekannter Konzentration erzeugt, die bei einer Entzündung vollständig verbrennt (vergleiche Abschnitt 2.1 Kennzahlermittlung). Durch Veränderung der Zündverzögerungszeit  $t_v$  kann das Staub-Luft-Gemisch bei verändertem Turbulenzzustand entzündet werden. Bei Versuchen am Rundschachtelevator können diese Parameter dagegen nicht beeinflusst werden. Es ist nicht bekannt, welche Menge an Staub sich zum Zündzeitpunkt in Schwebelage befindet, bzw. welche Staubkonzentration vorherrscht. Da der überwiegende Teil des Produktes im Elevator verbleibt und nur ein geringer Anteil der Partikeln eine Staubwolke bildet, ist unbekannt welcher Anteil der Partikeln letztendlich an der Verbrennung teilnimmt. Obwohl das laufende Becherwerk bevorzugt feine Partikeln aufwirbelt und deshalb bevorzugt der Feinanteil des verwendeten Produktes eine Staubwolke bildet, ist die Reproduzierbarkeit der Staubwolkenbildung im Vergleich zu Einblasvorgängen über Staubvorratsbehälter an geschlossenen Behältern schlechter. Des Weiteren wird der Turbulenzzustand zum Zündzeitpunkt innerhalb des Versuchselevators und dadurch die Verwirbelung der sich in Schwebelage befindenden Partikeln durch das laufende Becherwerk festgelegt. Auf Grund der im Vergleich zu einem kubischen Behälter komplexen Geometrie des Versuchselevators, sind Luftströmungen, die zu Verwirbelungen und Turbulenzen führen schlechter reproduzierbar. Diese Faktoren können die Staubkonzentration, die Größe und Anzahl der sich in Schwebelage befindenden Partikeln und den Turbulenzzustand zum Zündzeitpunkt räumlich und zeitlich beeinflussen und damit zu einer vergleichsweise schlechten Reproduzierbarkeit der Messergebnisse führen. Trotz der vergleichsweise schlechten Reproduzierbarkeit sind die am Rundschachtelevator durchgeführten Versuche für die Beurteilung von notwendigen Elevatorfestigkeiten in Kombination mit Druckentlastungsflächen belastbar und legitim. Die angewandte Vorgehensweise des Elevatorleerlauf bildet Staubexplosionsereignisse in Becherelevatoren unter praxisnahen Bedingungen ab. Mit der angewandten Versuchsdurchführung mit Produkten, die einen hohen Feinanteil der Partikeln aufweisen sowie zu starker Staubwolkenbildung neigen in Kombination mit einer Zündquelle die eine hohe Energiemenge freisetzt, werden worst-case Bedingungen erzeugt.

Vergleicht man die maximalen Explosionsdrücke der durchgeführten Versuche mit Ergebnissen aus der Vergangenheit ist erkennbar, dass  $p_m$  und  $p_{m,P}$  sowohl bei ungetrockneter Weizenstärke als auch bei getrockneter Maisstärke überwiegend geringer sind als bei vergleichbaren älteren Versuchen. Abbildungen 5.1 und 5.2 zeigen exemplarisch  $p_{m,P}$  in Abhängigkeit von der Messposition für getrocknete Maisstärke. Die Versuche C1 bis C6 sind Messdaten aus älteren Versuchsreihen und wurden bei identischem Versuchsaufbau und identischer Versuchsdurchführung wie die im Rahmen dieser Arbeit durchgeführten Versuche aufgezeichnet. Die dabei verwendete getrocknete Maisstärke hatte einen  $K_{st}$ -Wert von  $K_{st} = 183 \text{ bar} \cdot \text{m} \cdot \text{s}^{-1}$ . Der  $K_{st}$ -Wert der im Rahmen dieser Arbeit verwendeten Maisstärke beträgt  $K_{st} = 190 \text{ bar} \cdot \text{m} \cdot \text{s}^{-1}$  (vgl. Tabelle 2.1). Alle weiteren Stoffeigenschaften (Partikelgrößenverteilung, MZE, Staubungsneigung, etc.) sind mit der im Rahmen dieser Arbeit verwendeten Maisstärke vergleichbar. Es ist gut erkennbar, dass in Abbildung 5.1 sämtliche maximalen Explosionsdrücke  $p_{m,P}$  der Versuche C1 bis C3 im Rücklaufschacht im Rahmen der Messunsicherheit größer sind als die maximalen Explosionsdrücke  $p_{m,P}$  der Versuche G1 bis G3. Der in den Versuchen C1 bis C3 an der Messposition P3.1 auftretende maximale Explosionsdruck  $p_m$  ist deutlich höher als  $p_m$  der Versuche G1 bis G3. Im Förderschacht sind  $p_{m,P}$  der

beiden Versuchsreihen im Rahmen der Messunsicherheit ähnlich. Bei Druckentlastung an Elevatorkopf und -schächten in Abbildung 5.2 ist der Unterschied zwischen den Versuchsreihen C und G ähnlich. Lediglich bei Versuch G5 erreichen die gemessenen maximalen Explosionsdrücke das Niveau der älteren Versuche von Versuchsreihe C.

Die in Versuchsreihe F (ungetrocknete Weizenstärke) durchgeführten Versuche sind mit Versuchsreihe E (ungetrocknete Maisstärke) der Vergangenheit vergleichbar. Der  $K_{st}$ -Wert des Produktes von Versuchsreihe F beträgt  $K_{st} = 145 \text{ bar} \cdot \text{m} \cdot \text{s}^{-1}$ , ungetrocknete Maisstärke (Versuchsreihe E) hatte einen  $K_{st}$ -Wert von  $K_{st} = 150 \text{ bar} \cdot \text{m} \cdot \text{s}^{-1}$ . Alle weiteren Stoffeigenschaften von ungetrockneter Weizenstärke sind mit den Stoffeigenschaften von ungetrockneter Maisstärke vergleichbar. Wie auch zuvor bei den Versuchsreihen C und G beobachtet, sind die maximalen Explosionsdrücke  $p_{m,P}$  von Versuchsserie F, mit Ausnahme der Versuche F1 und F8, bei allen Entlastungsflächenkonfigurationen deutlich geringer als  $p_{m,P}$  von Versuchsserie E. Die maximalen Explosionsdrücke  $p_{m,P}$  in Abhängigkeit von der Messposition der Versuchsserien E und F sind für alle Entlastungsflächenkonfigurationen in Anhang D.1 bis D.3 dargestellt.

Diese vergleichsweise geringen maximalen Explosionsdrücke sind vermutlich auf veränderte Umgebungsbedingungen und veränderten Eigenschaften des Versuchselevators im Vergleich zu älteren Elevatorversuchen zurück zu führen. Da die explosionsfähige Atmosphäre innerhalb des Versuchselevators durch das Aufwirbeln von abgelagertem Staub an den Elevatorbechern und -schächten erzeugt wird, ist die Interaktion der Partikel mit den Oberflächen innerhalb des Versuchselevators besonders relevant. Durch veränderte Luftfeuchtigkeit im Vergleich zu älteren Versuchsreihen, können die Haftkräfte zwischen den Partikeln und den Oberflächen beeinflusst werden. Eine erhöhte Wandrauhigkeit der Elevatorschächte durch Abnutzung, Anbackungen oder Korrosion kann die Anhaftung von Partikeln ebenfalls beeinflussen. Die bei den Versuchsreihen F und G im Vergleich zu den Versuchsreihen C und E geringen Temperaturen (vgl. Tabelle B.5 im Anhang) können zu einer erhöhten Kondensatbildung innerhalb der Elevatorschächte geführt haben. Die erhöhte Feuchtigkeit innerhalb der Elevatorschächte könnte die Bildung von Agglomeraten während des Kreislaufbetriebes (vgl. Abschnitt 3.1 Versuchsdurchführung) begünstigt haben. Die genannten Aspekte können maßgebend die Anzahl, Größe und Verteilung der an der Staubwolkenbildung beteiligten Partikel beeinflusst und zu den vergleichsweise schwachen Explosionsabläufen geführt haben.

Für die hohe Anzahl an Versuchen mit Flammenausbreitung (C) und (E) (Flamme erlischt nach wenigen Metern) wird folgende Hypothese aufgestellt: Aufgrund von erhöhter Wandrauhigkeit und erhöhter Luftfeuchtigkeit im Vergleich zu älteren Versuchsreihen lagert sich im Kreislaufbetrieb vergleichsweise viel Produkt an den Oberflächen des Versuchselevators ab. Im anschließenden Leerlaufbetrieb entsteht durch die Verwirbelung eines Teils des abgelagerten Produktes eine Staubwolke hoher Konzentration. Die Staubkonzentration  $c_s$  liegt dabei im oberen brennbaren Bereich. Durch die Entzündung des Staub-Luft-Gemischs am Elevatorfuß breiten sich Druck- und Flammenfront am Zündort beginnend im Versuchselevator aus. Da sich der Explosionsdruck einer anlaufenden Explosion mit Schallgeschwindigkeit ausbreitet, breitet sich dieser auf Grund der höheren Geschwindigkeit vor der Flammenfront aus [1]. Dies führt zu einer Kompression des noch unverbrannten Staub-Luft-Gemischs in den Elevatorschächten. Die Staubkonzentration  $c_s$  steigt dadurch in einen nicht brennbaren Bereich ( $c_s > \text{OEG}$ ).

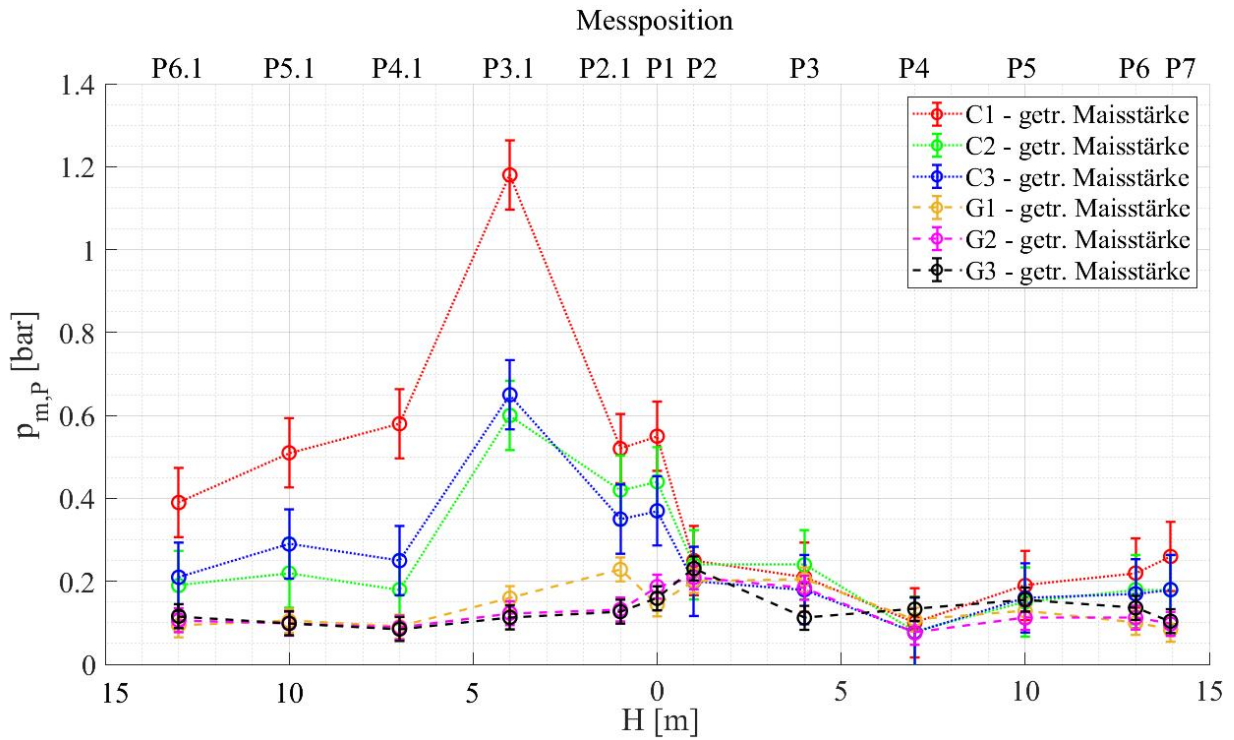


Abbildung 5.1: Maximaler Explosionsdruck  $p_{m,P}$  in Abhängigkeit von der Messposition für getrocknete Maisstärke älterer Versuche (Versuchsreihe C;  $K_{St}=183 \text{ bar} \cdot \text{m} \cdot \text{s}^{-1}$ ) und im Rahmen dieser Arbeit durchgeführte Versuche (Versuchsreihe G;  $K_{St}=190 \text{ bar} \cdot \text{m} \cdot \text{s}^{-1}$ ). Druckentlastung an Elevatorkopf, -schächten und -fuß.

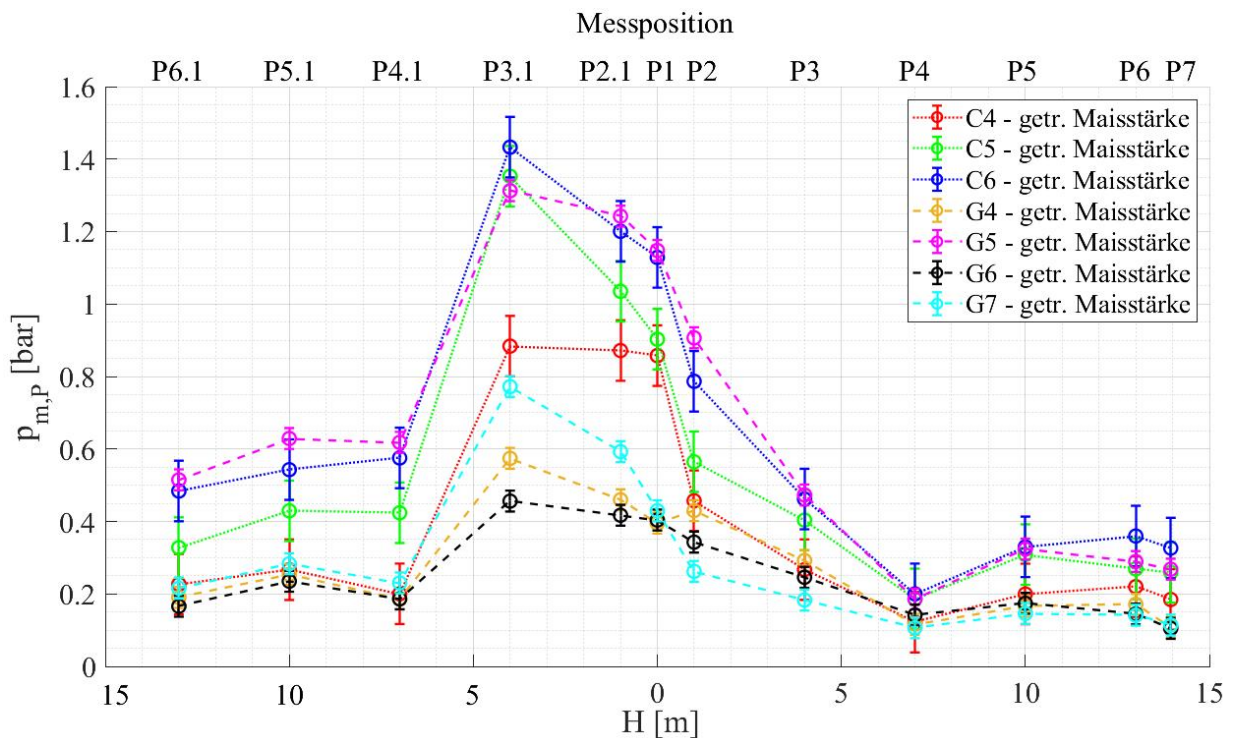


Abbildung 5.2: Maximaler Explosionsdruck  $p_{m,P}$  in Abhängigkeit von der Messposition für getrocknete Maisstärke älterer Versuche (Versuchsreihe C;  $K_{St}=183 \text{ bar} \cdot \text{m} \cdot \text{s}^{-1}$ ) und im Rahmen dieser Arbeit durchgeführte Versuche (Versuchsreihe G;  $K_{St}=190 \text{ bar} \cdot \text{m} \cdot \text{s}^{-1}$ ). Druckentlastung an Elevatorkopf und -schächten.



Die nachfolgende Verbrennung (Flammenfront) kommt zum Erliegen und die Flammen erlöschen nach einigen Metern in den Schächten. Das unverbrannte Produkt wirkt auf Grund der zu hohen Konzentration auf den ausgelösten Verbrennungsvorgang löschend. Durch die unterbundene Ausbreitung der Verbrennung, ist die Expansion der Verbrennungsgase geringer, was wiederum zu geringen Explosionsdrücken führt.

Die in Abschnitt 4.1 beobachteten nachgelagerten Explosionen bekräftigen diese Hypothese. Die durch die Verbrennung am Elevatorfuß verursachte Druckwelle führt zu einer Öffnung der Entlastungsflächen. Wie exemplarisch in Abbildung 4.4 in Abschnitt 4.1 gezeigt, tritt dabei unverbranntes Produkt aus den Entlastungsflächen aus. Zu diesem Zeitpunkt ist keine Verbrennung im oberen Teil des Versuchselevator erkennbar. Durch das Austreten von unverbranntem Produkt und dem Expandieren des aufgebauten Explosionsdruck über die Entlastungsflächen ins Freie sinkt die Staubkonzentration  $c_s$  in einen brennbaren Bereich. Das nun brennbare Staub-Luft-Gemisch wird durch beispielsweise noch vorhandene kleine Flammen innerhalb der Elevatorschächte erneut entzündet. Weitere Flammen breiten sich anschließend im oberen Teil des Versuchselevators aus. Das aufgewirbelte Produkt im unteren Teil des Elevators ist durch die Zündung im Elevatorfuß bereits teilweise verbrannt, weshalb hier keine weitere Flammenausbreitung beobachtet wird.

Bei den beobachteten nachgelagerten Explosionen wurde bis auf Versuch F10 kein im Vergleich zur ersten Explosion erhöhter Explosionsdruck beobachtet. Bei Versuch F10 ist auch bei nachgelagerter Explosion der maximale Explosionsdruck  $P_{m,P}$  gering. Da bei den nachgelagerten Explosionen die Entlastungsflächen bereits geöffnet sind, und dadurch eine starke Beschleunigung von Flammen und ein Aufbau eines hohen Explosionsdruckes nicht möglich ist, ist die beobachtete nachgelagerte Explosion aus sicherheitstechnischen Aspekten bei den im Rahmen dieser Arbeit durchgeführten Versuchen vernachlässigbar.

## 5.1 Konsequenz für die Anwendbarkeit von geltenden Auslegungskriterien für Rundschachtelevatoren

Die beobachteten maximalen Explosionsdrücke  $p_{ex}$  der im Rahmen dieser Arbeit durchgeführten Versuche liegen für alle untersuchten Entlastungsflächenkonfigurationen und Produkte deutlich unter den in CEN/TR 16829 definierten Mindestfestigkeiten von Rechteckschachtelevatoren [7]. Trotz der vergleichsweise geringen maximalen Explosionsdrücke sind die beobachteten Ergebnisse plausibel. Die beobachteten mittleren Flammengeschwindigkeiten liegen in einem für Staubexplosionen an Becherelevatoren typischen Bereich. Bei älteren Versuchsserien am Rundschachtelevator wurde bei Druckentlastung an Elevatorkopf, -schächten und -fuß (Kurve 2 nach CEN/TR 16829) sowie bei Druckentlastung an Elevatorkopf und -schächten (Kurve 4 nach CEN/TR 16829) kein erhöhter maximaler Explosionsdruck im Vergleich zu Versuchsreihen am Rechteckschachtelevator beobachtet. Die bei diesen Entlastungsflächenkonfigurationen gemessenen maximalen Explosionsdrücke unterschreiten für alle am Rundschachtelevator durchgeführten Explosionsversuche die nach CEN/TR 16829 für Rechteckschachtelevatoren geltenden Mindestfestigkeiten. Es liegen in einem Bereich des  $K_{St}$ -Wertes

von  $100 \text{ bar}\cdot\text{m}\cdot\text{s}^{-1} < K_{\text{St}} < 200 \text{ bar}\cdot\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$  für diese Entlastungsflächenkonfigurationen ausreichende und belastbare Messdaten vor. Deshalb ist die Aussage legitim, dass für diese Entlastungsflächenkonfigurationen die in CEN/TR 16829 bzw. VDI 2663-8.1 definierten Mindestfestigkeiten von Rechteckschachtelevatoren auch für Rundschachtelevatoren ausreichend sind. Die freie Querschnittsfläche des Rundschachtelevators darf dabei die freie Querschnittsfläche des verwendeten Versuchselevators von  $A_{\text{F}} = 70 \%$  nicht überschreiten. Eine im Vergleich zum Versuchselevator erhöhte freie Querschnittsfläche könnte einen Explosionsablauf mit erhöhten Explosionsdrücken begünstigen.

Bei Druckentlastung ausschließlich am Elevatorkopf wurde bei Malzstaub (Versuche B7 und D6) maximale Explosionsdrücke beobachtet, die sowohl oberhalb der maximalen Explosionsdrücke von vergleichbaren Versuchen am Rechteckschachtelevator (Versuch D6) als auch oberhalb der für Rechteckschachtelevatoren geltenden Mindestfestigkeiten (Versuch B7 und D6) liegen, festgestellt. Bei weiteren Versuchsreihen mit Weizenmehl, Weizenstärke oder Maisstärke konnte dies jedoch nicht beobachtet werden. Die im Rahmen dieser Arbeit durchgeführten Versuche bestätigen die bisherige Erkenntnis, dass mit Ausnahme von Malzstaub, die maximalen Explosionsdrücke bei allen untersuchten Entlastungsflächenkonfigurationen und verwendeten Stäuben die geltenden Mindestfestigkeiten für Rechteckschachtelevatoren unterschreiten. Da die beobachteten maximalen Explosionsdrücke bei Malzstaub die maximalen Explosionsdrücke bei verschiedenen Stäuben mit vergleichbarem  $K_{\text{St}}$ -Wert um ein vielfaches übersteigen und die beobachteten Explosionsdrücke weit außerhalb des zu erwarteten Druckbereichs liegen, muss die Richtigkeit der Messergebnisse von Malzstaub kritisch hinterfragt werden. Die Messergebnisse der Versuche mit Weizenstärke und Maisstärke ( $K_{\text{St}}$ -Wert mit Malzstaub der Versuchsreihe D vergleichbar), sind im Rahmen der Reproduzierbarkeit von Elevatorversuchen plausibel und belastbar. Die genannten Stäube sind standardisierte Produkte aus Großproduktionen, die in 25 kg Gebinden geliefert werden. Starke Unterschiede des Produktes von verschiedenen Gebinden innerhalb einer Produktcharge, die zu starken Streuungen von Messergebnissen am Rundschachtelevator führen könnten sind im Gegensatz zu Malzstaub weitestgehend ausgeschlossen. Überwachte Produktionsprozesse der Hersteller, die eine gleichbleibende Produktqualität gewährleisten sind der Grund dafür. Dies kann dagegen bei Malzstaub nicht vollständig ausgeschlossen werden. Der in Versuchsreihe B und D verwendete Malzstaub ist der Rückstand des Filtrationsprozesses einer Großbrauerei. Dieser Staub ist nicht standardisiert, und wird nach dem Austrag aus dem Filterprozess aufgefangen und in Gebinden verpackt. Dabei ist nicht gewährleistet, dass die verschiedenen Gebinde Malzstaub mit identischen Produkteigenschaften und Feinanteil der Partikeln enthalten. Deshalb ist es möglich, dass bei Elevatorversuchen mit Malzstaub der bestimmte  $K_{\text{St}}$ -Wert nicht immer dem tatsächlichen  $K_{\text{St}}$ -Wert des sich im Versuchselevator befindenden Malzstaub des jeweiligen Versuches entspricht. Die in Versuchsreihe B und D am Rundschachtelevator mit Malzstaub beobachteten maximalen Explosionsdrücke bei Druckentlastung ausschließlich am Elevatorkopf könnten auf  $K_{\text{St}}$ -Werte zurückzuführen sein, die tatsächlich höher ( $K_{\text{St}} \approx 170 \text{ bar}\cdot\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$  bei Versuchsreihe D;  $K_{\text{St}} \approx 190 \text{ bar}\cdot\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$  bei Versuchsreihe B) einzuordnen sind.

Da diese Hypothese zum aktuellen Zeitpunkt nicht bewiesen werden kann, und bei Versuchen am Rundschachtelevator mit Malzstaub und Druckentlastung ausschließlich

am Elevatorkopf hohe maximale Explosionsdrücke auftreten, die außerhalb der in VDI 2263-8.1 bzw. CEN/TR 16829 definierten Mindestfestigkeiten von Rechteckschachtelevatoren liegen, kann die Anwendbarkeit von Kurve 5 nach VDI 2263-8.1 bzw. CEN/TR 16829 auf Rundschachtelevatoren auf Grund der aktuellen Messdatenbasis nicht sicher bestätigt werden. Die in VDI 2263-8.1 bzw. CEN/TR 16829 ebenfalls dargestellten Kurven 1 (Druckentlastung an Elevatorkopf, -schächten und -fuß; Einbauabstand der Entlastungsflächen in den Schächten: 3 m) und 3 (Druckentlastung an Elevatorkopf und -schächten; Einbauabstand der Entlastungsflächen in den Schächten: 3 m), kann zum gegenwärtigen Zeitpunkt nicht beurteilt werden. Am vorhandenen Versuchselevator kann lediglich ein Einbauabstand der Entlastungsflächen in den Schächten von 6 m untersucht werden, weshalb zu dieser Entlastungsflächenkonfiguration keine Messdaten vorliegen.

## 5.2 Ausblick

Um die in Abschnitt 1.1 definierte Fragestellung (2) vollständig beantworten zu können, sind weitere Untersuchungen erforderlich. Dabei steht an erster Stelle die Klärung der Frage, ob die im Rahmen von älteren Versuchen in Versuchsserie D durchgeführten Versuche mit Malzstaub möglicherweise zu niedrigen  $K_{St}$ -Werten zugeordnet sind. Hierfür sollten die durchgeführten Versuche der Versuchsserie D mit Druckentlastung ausschließlich am Elevatorkopf mit vergleichbarem Malzstaub wiederholt werden. Dabei sollte eine Probenteilung, welche eine Homogenität der für die geplanten Versuche vorbereiteten Produktmenge gewährleistet, erfolgen. Die bestimmten explosionstechnischen Kenngrößen sollen für den Malzstaub aller geplanten Versuche repräsentativ sein. Da für Explosionsversuche am Rundschachtelevator eine hohe Produktmenge von 100 kg pro Versuch notwendig ist und für belastbare Aussagen mehrere Versuche durchgeführt werden sollten, ist eine Homogenisierung der Proben mit üblichen Laborgeräten zur Probenteilung mit vertretbarem Zeit- und Kostenaufwand für die benötigte Produktmenge nicht realisierbar. Deshalb, sollte mit vorhanden Ressourcen ein Konzept ausgearbeitet werden, welches die Herstellung von homogenen Teilmengen aus einer Großmenge Malzstaub ermöglicht. Anschließend sollten weitere Explosionsversuche mit Malzstaub geplant und durchgeführt werden. Sind die dann beobachteten maximalen Explosionsdrücke geringer als diejenigen der Versuchsreihe D bei einem vermeintlich identischen  $K_{St}$ -Wert, bestätigt dies die in Abschnitt 5.1 aufgestellte Hypothese, dass die maximalen Explosionsdrücke in Versuchsreihe D möglicherweise zu geringen  $K_{St}$ -Werten zugeordnet wurden. Unterschreiten die dann beobachteten maximalen Explosionsdrücke die geltenden Mindestfestigkeiten für Rechteckschachtelevatoren, ist auch Kurve 5 aus VDI 2263-8.1 bzw. CEN/TR 16829 auf Rundschachtelevatoren anwendbar.

Um einen möglichen Einfluss von Umgebungsbedingungen auf die Bildung von Staubwolken und den resultierenden Explosionsverlauf bei Staubexplosionen in Rundschachtelevatoren zu untersuchen, könnten bereits vorhandene Versuchsreihen mit identischen Produkten bei veränderten Umgebungsbedingungen wiederholt werden. Werden dabei gezielt Zeiträume mit hohen Temperaturen und geringer relativer Luftfeuchtigkeit für die Durchführung der Explosionsversuche gewählt, könnten mögliche Einflüsse von

Temperatur und Luftfeuchtigkeit auf den maximalen Explosionsdruck oder die mittlere Flammengeschwindigkeit im Vergleich zu den im Rahmen dieser Arbeit durchgeführten Versuche dokumentiert werden.

Des Weiteren könnte der Einfluss des Materials der Förderbecher auf den maximalen Explosionsdruck näher untersucht werden. Wie in aktuellen Richtlinien und technischen Berichten dargestellt, ist eine Erhöhung des maximalen Explosionsdrucks und der maximalen Flammengeschwindigkeit bei Staubexplosionen in Becherelevatoren mit Kunststoffbechern im Vergleich zu Elevatoren mit Metallbechern auf Grund der geringeren Wärmeabfuhr von Kunststoffbechern denkbar [7] [9] [14]. Bereits durchgeführte Versuchsserien mit Kunststoffbechern könnten mit identischen Produkten und Metallbechern zumindest partiell wiederholt werden. Dadurch wären ein direkter Vergleich von Messergebnissen der Elevatorversuche mit Kunststoffbechern und der Elevatorversuche mit Metallbechern, und damit Aussagen zum Einfluss des Materials der Förderbecher möglich.

# Literaturverzeichnis

- [1] BARTKNECHT, W.: *Explosionsschutz*, Springer Verlag, Berlin Heidelberg, 1993.
- [2] DIN-NORMENAUSSCHUSS SICHERHEITSTECHNISCHE GRUNDSÄTZE: *DIN EN 14034: Bestimmung der Explosionskenngrößen von Staub/Luft-Gemischen*, Beuth Verlag, Berlin, 2011.
- [3] DIN-NORMENAUSSCHUSS SICHERHEITSTECHNISCHE GRUNDSÄTZE: *DIN EN 14034-1: Bestimmung der Explosionskenngrößen von Staub/Luft-Gemischen-Teil 1: Bestimmung des maximalen Explosionsdruckes  $p_{max}$  von Staub/Luft-Gemischen*, DIN Deutsches Institut für Normung, Berlin , 2011.
- [4] DIN-NORMENAUSSCHUSS SICHERHEITSTECHNISCHE GRUNDSÄTZE: *DIN EN 14034-2: Bestimmung der Explosionskenngrößen von Staub/Luft-Gemischen-Teil 2: Bestimmung des maximalen zeitlichen Druckanstiegs  $(dp/dt)_{max}$  von Staub/Luft-Gemischen*, DIN Deutsches Institut für Normung, Berlin , 2011.
- [5] DIN-NORMENAUSSCHUSS SICHERHEITSTECHNISCHE GRUNDSÄTZE: *DIN EN 14034-3: Bestimmung der Explosionskenngrößen von Staub/Luft-Gemischen- Teil 3: Bestimmung der unteren Explosionsgrenze UEG von Staub/Luft-Gemischen*, DIN Deutsches Institut für Normung, Berlin , 2011.
- [6] DIN-NORMENAUSSCHUSS SICHERHEITSTECHNISCHE GRUNDSÄTZE: *DIN EN 14797: Einrichtungen zur Explosionsdruckentlastung*, Beuth Verlag, Berlin, 2007.
- [7] DIN-NORMENAUSSCHUSS SICHERHEITSTECHNISCHE GRUNDSÄTZE: *CEN/TR 16829 Brand- und Explosionsschutz für Becherwerke*, DIN Deutsches Institut für Normung, Berlin , 2019.
- [8] DIN-NORMENAUSSCHUSS SICHERHEITSTECHNISCHE GRUNDSÄTZE: *DIN EN ISO/EC 80079-20-2: Explosionsfähige Atmosphären Teil 20-2:Werkstoffeigenschaften - Prüfverfahren für Brennbare Stäube*, DIN Deutsches Institut für Normung, Berlin , 2016.
- [9] HOLBROW, P, LUNN, G. A.: *Explosion Venting of Bucket Elevators, Stage 2: Final Report (EC/01/50)*, Health and Safety Laboratory, Buxton, 2001.
- [10] ROSER, M, VOGL, A, RADANDT, S: *Konstruktiver Explosionsschutz für Elevatoren, Forschungsbericht Projekt Nr.: F-05-0701*, FSA Forschungsgesellschaft für angewandte Systemsicherheit und Arbeitsmedizin, Mannheim, 2010.

- [11] VEREIN DEUTSCHER INGENIEURE: *VDI Richtlinie 3673 Blatt 1: Druckentlastung von Staubexplosionen*, Beuth Verlag, Berlin, 2002.
- [12] VEREIN DEUTSCHER INGENIEURE: *VDI Richtlinie 2263 Blatt 1: Staubbrände und Staubexplosionen; Gefahren, Beurteilung, Schutzmaßnahmen; Untersuchungsmethoden zur Ermittlung von sicherheitstechnischen Kenngrößen von Stäuben*, Beuth Verlag, Berlin, 2008.
- [13] VEREIN DEUTSCHER INGENIEURE: *VDI Richtlinie 2263 Blatt 8: Staubbrände und Staubexplosionen; Gefahren, Beurteilung, Schutzmaßnahmen; Brand- und Explosionsschutz an Elevatoren.*, Beuth Verlag, Berlin, 2008.
- [14] VEREIN DEUTSCHER INGENIEURE: *VDI Richtlinie 2263 Blatt 8.1: Staubbrände und Staubexplosionen; Gefahren, Beurteilung, Schutzmaßnahmen; Brand- und Explosionsschutz an Elevatoren - Beispiele.*, Beuth Verlag, Berlin, 2008.
- [15] VOGL, A.: *Ablauf von Staubexplosionen in pneumatischen Saug-Flug-Förderanlagen*, Roland Aasanger Verlag, Heidelberg, 1995.

# Abbildungsverzeichnis

1.1	Skizze eines nach [7] empfohlenen Aufbau eines Rechteckschachtelevators [7]. . . . .	5
1.2	Erforderliche Mindestfestigkeit $p_{\min}$ eines Rechteckschachtelevators bei explosionsfester Bauweise in Kombination mit Explosionsdruckentlastung [7]. . . . .	6
2.1	Oben links: verwendete chemische Zünder mit je 5 kJ Energiemenge. Oben rechts: Verschluss mit Zünderstangen. Mitte: Zur Bestimmung von $p_{\max}$ und $K_{St}$ verwendete 20 L Laborapparatur mit Messtechnik. Unten: In der Laborapparatur verbaute Fächerdüse. . . . .	12
2.2	Gemessener Druckverlauf einer Weizenstärkeexplosion in einer 20L Laborapparatur bei einer Staubkonzentration von $c_S = 1000 \text{ g/m}^3$ . . . .	14
3.1	Rundschachtelevators auf dem Versuchsgelände der FSA in Kappelrodeck. Perspektive: Vorderseite . . . . .	17
3.2	Skizze des Rundschachtelevators mit <i>Messposition</i> en und Entlastungsflächen. Perspektive: Rückseite. . . . .	18
3.3	Oben: Elevatorfuß mit Schiebern und Zündort. Unten links: Mit PE-Folie verschlossene Druckentlastungsfläche (Elevatorschacht). Unten rechts: Hülse mit Glaslinse. . . . .	21
3.4	Verwendete Messtechnik und Zündgerät. . . . .	22
3.5	Exemplarische, an ausgewählten Messpositionen gemessene Druckverläufe einer Weizenstärkeexplosion im Versuchselevator bei Druckentlastung nur am Elevatorkopf. . . . .	24
3.6	Exemplarischer gemessener Spannungs-Zeit Verlauf der Messposition F2 einer Weizenstärkeexplosion im Versuchselevator bei Druckentlastung nur am Elevatorkopf. . . . .	26
4.1	Exemplarische Darstellung der im Rahmen dieser Arbeit am Häufigsten vorkommenden Flammenausbreitungen. . . . .	29
4.2	Bei Versuch G4 an der Messposition P5.1 und F5.1 gemessener Druck-Zeit-Verlauf und Spannungs-Zeit-Verlauf. . . . .	30

4.3	Bei Versuch G4 bestimmte Flammenlaufzeiten $t_f$ in Abhängigkeit von der Messposition. . . . .	30
4.4	Ausschnitt der bei Versuch G4 erstellten Videosequenz zum Zeitpunkt $t=0,2$ s und $t=2,7$ s nach der Zündung. . . . .	31
4.5	Maximale mittlere Flammengeschwindigkeit der Versuchsreihe in Abhängigkeit von der Entlastungsflächenkonfiguration für ungetrocknete Weizenstärke und getrocknete Maisstärke. . . . .	32
4.6	Maximaler Explosionsdruck $p_{ex}$ in Abhängigkeit von der Entlastungsflächenkonfiguration für ungetrocknete Weizenstärke und getrocknete Maisstärke. . . . .	35
4.7	Maximaler Explosionsdruck $p_{m,P}$ in Abhängigkeit von der Messposition für ungetrocknete Weizenstärke bei Druckentlastung an Elevatorkopf und -schächten. . . . .	36
4.8	Maximaler Explosionsdruck $p_{m,P}$ in Abhängigkeit von der Messposition der Versuche von $p_{ex}$ für getrocknete Maisstärke an Rund- und Rechteckschachtelevator. Druckentlastung an Elevatorkopf, -schächten und -fuß. Versuch C1 (Rundschacht): $K_{st}=183 \text{ bar} \cdot \text{m}/\text{s}^{-1}$ . Versuch G1 (Rechteckschacht): $K_{st}=204 \text{ bar} \cdot \text{m}/\text{s}^{-1}$ . . . . .	40
4.9	Maximaler Explosionsdruck $p_{m,P}$ in Abhängigkeit von der Messposition der Versuche von $p_{ex}$ für getrocknete Maisstärke an Rund- und Rechteckschachtelevator. Druckentlastung an Elevatorkopf und -schächten. Versuch C6 (Rundschacht): $K_{st}=183 \text{ bar} \cdot \text{m}/\text{s}^{-1}$ . Versuch G6 (Rechteckschacht): $K_{st}=204 \text{ bar} \cdot \text{m}/\text{s}^{-1}$ . . . . .	40
4.10	Maximaler Explosionsdruck $p_{ex}$ mit Messunsicherheit $u$ in Abhängigkeit des $K_{St}$ -Wert aller am Rundschachtelevator durchgeführten Versuchsreihen. Die dargestellten Werte sind in Tabelle 4.9 aufgeführt. . . . .	42
5.1	Maximaler Explosionsdruck $p_{m,P}$ in Abhängigkeit von der Messposition für getrocknete Maisstärke älterer Versuche (Versuchsreihe C; $K_{St}=183 \text{ bar} \cdot \text{m} \cdot \text{s}^{-1}$ ) und im Rahmen dieser Arbeit durchgeführte Versuche (Versuchsreihe G; $K_{St}=190 \text{ bar} \cdot \text{m} \cdot \text{s}^{-1}$ ). Druckentlastung an Elevatorkopf, -schächten und -fuß. . . . .	46
5.2	Maximaler Explosionsdruck $p_{m,P}$ in Abhängigkeit von der Messposition für getrocknete Maisstärke älterer Versuche (Versuchsreihe C; $K_{St}=183 \text{ bar} \cdot \text{m} \cdot \text{s}^{-1}$ ) und im Rahmen dieser Arbeit durchgeführte Versuche (Versuchsreihe G; $K_{St}=190 \text{ bar} \cdot \text{m} \cdot \text{s}^{-1}$ ). Druckentlastung an Elevatorkopf und -schächten. . . . .	46
B.1	Maximaler Explosionsdruck $p_{m,P}$ in Abhängigkeit von der Messposition für ungetrocknete Weizenstärke bei Druckentlastung an Elevatorkopf, -schächten und -fuß. Versuche F1 bis F4. . . . .	62



B.2	Maximaler Explosionsdruck $p_{m,P}$ in Abhängigkeit von der Messposition für ungetrocknete Weizenstärke bei Druckentlastung an Elevatorkopf. Versuche F9 bis F12. . . . .	62
B.3	Maximaler Explosionsdruck $p_{m,P}$ in Abhängigkeit von der Messposition für getrocknete Maisstärke bei Druckentlastung an Elevatorkopf, -schächten und -fuß. Versuche G1 bis G3. . . . .	63
B.4	Maximaler Explosionsdruck $p_{m,P}$ in Abhängigkeit von der Messposition für getrocknete Maisstärke bei Druckentlastung an Elevatorkopf und -schächten. Versuche G4 bis G7. . . . .	63
B.5	Messergebnisse maximaler Explosionsdruck $p_{m,P}$ der im Rahmen dieser Arbeit durchgeführten Versuche. . . . .	64
B.6	Messergebnisse Flammenlaufzeit $t_f$ der im Rahmen dieser Arbeit durchgeführten Versuche. . . . .	65
B.7	Messergebnisse mittlere Flammengeschwindigkeit $\bar{v}_f$ der im Rahmen dieser Arbeit durchgeführten Versuche. . . . .	66
C.1	Teil 1: Messergebnisse Rechteckschachtelevator. Produkt: Malzstaub 1 (Versuchsreihe A) und Malzstaub 2 (Versuchsreihe B*) [10]. . . . .	68
C.2	Teil 2: Messergebnisse Rechteckschachtelevator. Produkt: Malzstaub 1 (Versuchsreihe A) und Malzstaub 2 (Versuchsreihe B*) [10]. . . . .	69
C.3	Messergebnisse Rechteckschachtelevator. Produkt: Weizenmehl [10]. . .	70
C.4	Messergebnisse Rechteckschachtelevator. Produkt: Maisstärke [10]. . . .	71
D.1	Maximaler Explosionsdruck $p_{m,P}$ in Abhängigkeit von der Messposition für ungetrocknete Maisstärke älterer Versuche (Versuchsreihe E; $K_{St}=150 \text{ bar} \cdot m \cdot s^{-1}$ ) und ungetrocknete Weizenstärke (Versuchsreihe F; $K_{St}=145 \text{ bar} \cdot m \cdot s^{-1}$ ). Druckentlastung an Elevatorkopf, -schächten und -fuß. . . . .	73
D.2	Maximaler Explosionsdruck $p_{m,P}$ in Abhängigkeit von der Messposition für ungetrocknete Maisstärke älterer Versuche (Versuchsreihe E; $K_{St}=150 \text{ bar} \cdot m \cdot s^{-1}$ ) und ungetrocknete Weizenstärke (Versuchsreihe F; $K_{St}=145 \text{ bar} \cdot m \cdot s^{-1}$ ). Druckentlastung an Elevatorkopf und -schächten. . . . .	73
D.3	Maximaler Explosionsdruck $p_{m,P}$ in Abhängigkeit von der Messposition für ungetrocknete Maisstärke älterer Versuche (Versuchsreihe E; $K_{St}=150 \text{ bar} \cdot m \cdot s^{-1}$ ) und ungetrocknete Weizenstärke (Versuchsreihe F; $K_{St}=145 \text{ bar} \cdot m \cdot s^{-1}$ ). Druckentlastung ausschließlich am Elevatorkopf. . . . .	74
D.4	Maximaler Explosionsdruck $p_{m,P}$ in Abhängigkeit von der Messposition der Versuche von $p_{ex}$ für Weizenmehl an Rund- und Rechteckschachtelevator. Druckentlastung an Elevatorkopf und -schächten. Versuch A1 (Rundschacht): $K_{st}= 117 \text{ bar} \cdot m/s^{-1}$ . Versuch B1 (Rechteckschacht): $K_{st}= 109 \text{ bar} \cdot m/s^{-1}$ . . . . .	74

D.5	Maximaler Explosionsdruck $p_{m,P}$ in Abhängigkeit von der Messposition der Versuche von $p_{ex}$ für Weizenmehl an Rund- und Rechteckschachtelevator. Druckentlastung ausschließlich am Elevatorkopf. Versuch A3 (Rundschacht): $K_{st}= 117 \text{ bar} \cdot \text{m/s}^{-1}$ . Versuch B5 (Rechteckschacht): $K_{st}= 109 \text{ bar} \cdot \text{m/s}^{-1}$ . . . . .	75
D.6	Maximaler Explosionsdruck $p_{m,P}$ in Abhängigkeit von der Messposition der Versuche von $p_{ex}$ für Malzstaub an Rund- und Rechteckschachtelevator. Druckentlastung an Elevatorkopf, -schächten und -fuß. Versuch D3 (Rundschacht): $K_{st}= 155 \text{ bar} \cdot \text{m/s}^{-1}$ . Versuch B10* (Rechteckschacht): $K_{st}= 159 \text{ bar} \cdot \text{m/s}^{-1}$ . . . . .	75
D.7	Maximaler Explosionsdruck $p_{m,P}$ in Abhängigkeit von der Messposition der Versuche von $p_{ex}$ für Malzstaub an Rund- und Rechteckschachtelevator. Druckentlastung an Elevatorkopf und -schächten. Versuch D4 (Rundschacht): $K_{st}= 143 \text{ bar} \cdot \text{m/s}^{-1}$ . Versuch B6* (Rechteckschacht): $K_{st}= 159 \text{ bar} \cdot \text{m/s}^{-1}$ . . . . .	76
D.8	Maximaler Explosionsdruck $p_{m,P}$ in Abhängigkeit von der Messposition der Versuche von $p_{ex}$ für Malzstaub an Rund- und Rechteckschachtelevator. Druckentlastung ausschließlich am Elevatorkopf. Versuch D6 (Rundschacht): $K_{st}= 143 \text{ bar} \cdot \text{m/s}^{-1}$ . Versuch B1* (Rechteckschacht): $K_{st}= 159 \text{ bar} \cdot \text{m/s}^{-1}$ . . . . .	76
E.1	Zeichnung des Schachtquerschnittes von Rundschachtelevator und Rechteckschachtelevator. . . . .	79
E.2	Messtellenübersicht der verwendeten Drucksensoren. . . . .	80
E.3	Messtellenübersicht der verwendeten Flammensensoren. . . . .	81
E.4	Kalibrierung der verwendeten Druckmessketten Blatt 1. . . . .	82
E.5	Kalibrierung der verwendeten Druckmessketten Blatt 2. . . . .	83

# Tabellenverzeichnis

1.1	Koeffizienten für die mittels Formel 1.1 in Abbildung 1.1 dargestellten Mindestfestigkeiten für Elevatoren [7]. . . . .	7
1.2	Explosionstechnische Kenngrößen der zur Durchführung von Explosionsversuchen an einem Becherelevator mit rechteckigen Schächten verwendeten Stäube [10]. . . . .	7
2.1	Explosionstechnische Kenngrößen der für Explosionsversuche am Rundschachtelevator ausgewählten Produkte. . . . .	15
2.2	Maximal zulässige Abweichungen von $(dp/dt)_{\max}$ [3]. . . . .	15
2.3	Ergebnisse von Siebanalysen der für Explosionsversuche am Rundschachtelevator ausgewählten Produkte. . . . .	15
3.1	Im Rahmen dieser Arbeit durchgeführtes Versuchsprogramm. . . . .	20
4.1	Versuchsanzahl, Häufigkeit und Versuche der im Rahmen dieser Arbeit auftretenden Flammenausbreitungen. . . . .	28
4.2	Die in Abbildung 4.5 dargestellten Werte. Maximale mittlere Flammengeschwindigkeit einer Versuchsreihe $\bar{v}_{f,\text{ex}}$ mit entsprechendem Versuch und Messort. . . . .	33
4.3	Versuchsanzahl, Häufigkeit und zugehörige Versuche des Messort der maximalen Flammengeschwindigkeiten eines Einzelversuches $\bar{v}_{f,m}$ der im Rahmen dieser Arbeit durchgeführten Versuche. . . . .	33
4.4	Die in Abbildung 4.6 dargestellten Werte. Maximaler Explosionsdruck $p_{\text{ex}}$ mit entsprechendem Versuch und Ort von $p_{\text{ex}}$ . . . . .	34
4.5	Versuchsanzahl, Häufigkeit des Auftretens und Versuche des Messort von $p_m$ der im Rahmen dieser Arbeit durchgeführten Versuche. . . . .	36
4.6	Zusammenfassung der im Rahmen dieser Arbeit erzielten Messergebnisse. Entlastungsflächenkonfiguration, Flammenausbreitung, $\bar{v}_{f,m}$ , Ort von $\bar{v}_{f,m}$ , $p_m$ und Ort von $p_m$ der im Rahmen dieser Arbeit durchgeführten Versuche. . . . .	37
4.7	Maximale Explosionsdrücke $p_{\text{ex}}$ mit Messunsicherheit $u$ der im Rahmen dieser Arbeit durchgeführten Explosionsversuche, sowie nach [7] definierten Mindestfestigkeiten $p_{\text{min}}$ . . . . .	39

4.8	Explosionstechnische Kenngrößen der zur Durchführung von Explosionsversuchen an einem Becherelevator mit runden Schächten verwendeten Stäube. . . . .	41
4.9	In Abbildung 4.10 dargestellte Werte. Maximale Explosionsdrücke $p_{ex}$ und $K_{St}$ -Wert des entsprechenden Produktes aller am Rundschachtelevator durchgeführten Explosionsversuche, sowie nach Formel 1.1 bestimmte Mindestfestigkeit $p_{min}$ . . . . .	42
A.1	Messwerte zur Bestimmung von $p_{max}$ und $K_{St}$ in der 20 L Kugel von ungetrockneter Weizenstärke P20.5-WS (GM). . . . .	59
A.2	Messwerte zur Bestimmung von $p_{max}$ und $K_{St}$ in der 20 L Kugel von ungetrockneter Weizenstärke P20.5-WS (UM). . . . .	60
A.3	Messwerte zur Bestimmung von $p_{max}$ und $K_{St}$ in der 20 L Kugel von getrockneter Maisstärke P19.1-WS (GM). . . . .	60
E.1	Daten und Abmessungen des verwendeten Rechteckschachtelevator [10].	77
E.2	Daten und Abmessungen des verwendeten Rundschachtelevator. . . . .	78

# Anhang A

## Messergebnisse explosionstechnische Kenngrößen

Versuch Nr.	Serie	$c_s$ [g/m <sup>3</sup> ]	$p_m$ [bar]	$(dp/dt)_m$ [bar/s]	$t_{v,eff}$ [ms]
1	1	500	6,5	316	59
2	1	750	8,0	480	59
3	1	1000	8,2	520	58
4	1	1250	8,2	560	58
5	1	1500	7,6	510	60
6	1	2000	7,6	480	59
7	2	500	7,3	352	59
8	2	750	8,0	488	59
9	2	1000	8,0	504	58
10	2	1250	7,7	488	60
11	2	1500	8,1	504	59
12	3	500	8,0	410	59
13	3	750	8,1	470	59
14	3	1000	7,7	464	59
15	3	1250	7,6	400	60
16	3	1500	8,4	544	60

Tabelle A.1: Messwerte zur Bestimmung von  $p_{max}$  und  $K_{St}$  in der 20 L Kugel von ungetrockneter Weizenstärke P20.5-WS (GM).

Versuch Nr.	Serie	$c_s$ [g/m <sup>3</sup> ]	$p_m$ [bar]	$(dp/dt)_m$ [bar/s]	$t_{v,eff}$ [ms]
1	1	250	6,1	206	60
2	1	500	6,4	229	60
3	1	750	7,8	326	60
4	1	1000	8,0	423	60
5	1	1250	8,1	291	60
6	1	1500	8,1	390	60
7	1	1750	7,8	350	60
8	2	750	8,0	394	59
9	2	1000	8,0	318	60
10	2	1250	8,1	386	60
11	2	1500	7,9	360	60
12	2	1750	7,6	360	60
13	3	750	7,9	357	60
14	3	1000	7,6	262	60
15	3	1250	7,8	392	60
16	3	1500	7,9	428	60
17	3	1750	7,6	360	59

Tabelle A.2: Messwerte zur Bestimmung von  $p_{max}$  und  $K_{St}$  in der 20 L Kugel von ungetrockneter Weizenstärke P20.5-WS (UM).

Versuch Nr.	Serie	$c_s$ [g/m <sup>3</sup> ]	$p_m$ [bar]	$(dp/dt)_m$ [bar/s]	$t_{v,eff}$ [ms]
1	1	500	8	352	60
2	1	750	9	448	60
3	1	1000	8,7	512	61
4	1	1250	6,6	476	60
5	2	500	8,2	370	61
6	2	750	8,6	600	60
7	2	1000	9,1	728	60
8	2	1250	8,8	636	61
9	3	500	8,2	362	60
10	3	750	8,9	582	60
11	3	1000	8,8	576	59
12	3	1250	9	688	60

Tabelle A.3: Messwerte zur Bestimmung von  $p_{max}$  und  $K_{St}$  in der 20 L Kugel von getrockneter Maisstärke P19.1-WS (GM).

# Anhang B

## Messergebnisse Rundschachtelevator

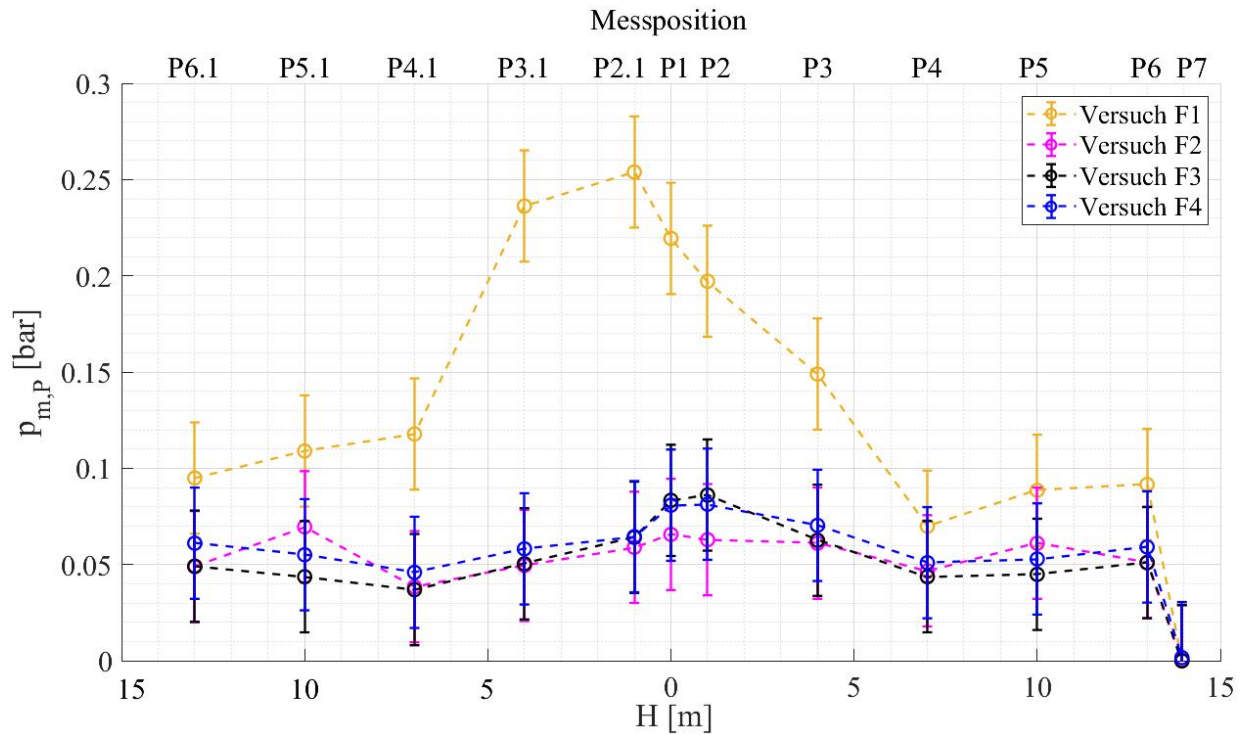


Abbildung B.1: Maximaler Explosionsdruck  $p_{m,P}$  in Abhängigkeit von der Messposition für ungetrocknete Weizenstärke bei Druckentlastung an Elevatorkopf, -schächten und -fuß. Versuche F1 bis F4.

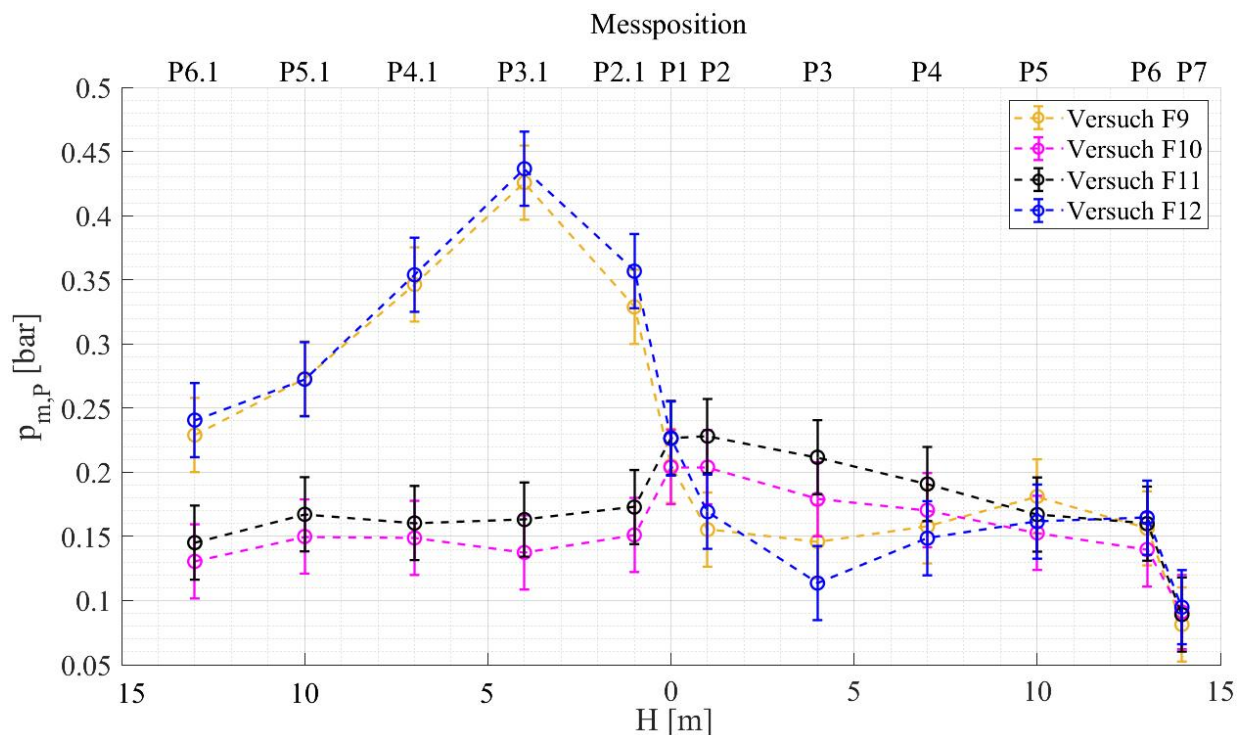


Abbildung B.2: Maximaler Explosionsdruck  $p_{m,P}$  in Abhängigkeit von der Messposition für ungetrocknete Weizenstärke bei Druckentlastung an Elevatorkopf. Versuche F9 bis F12.



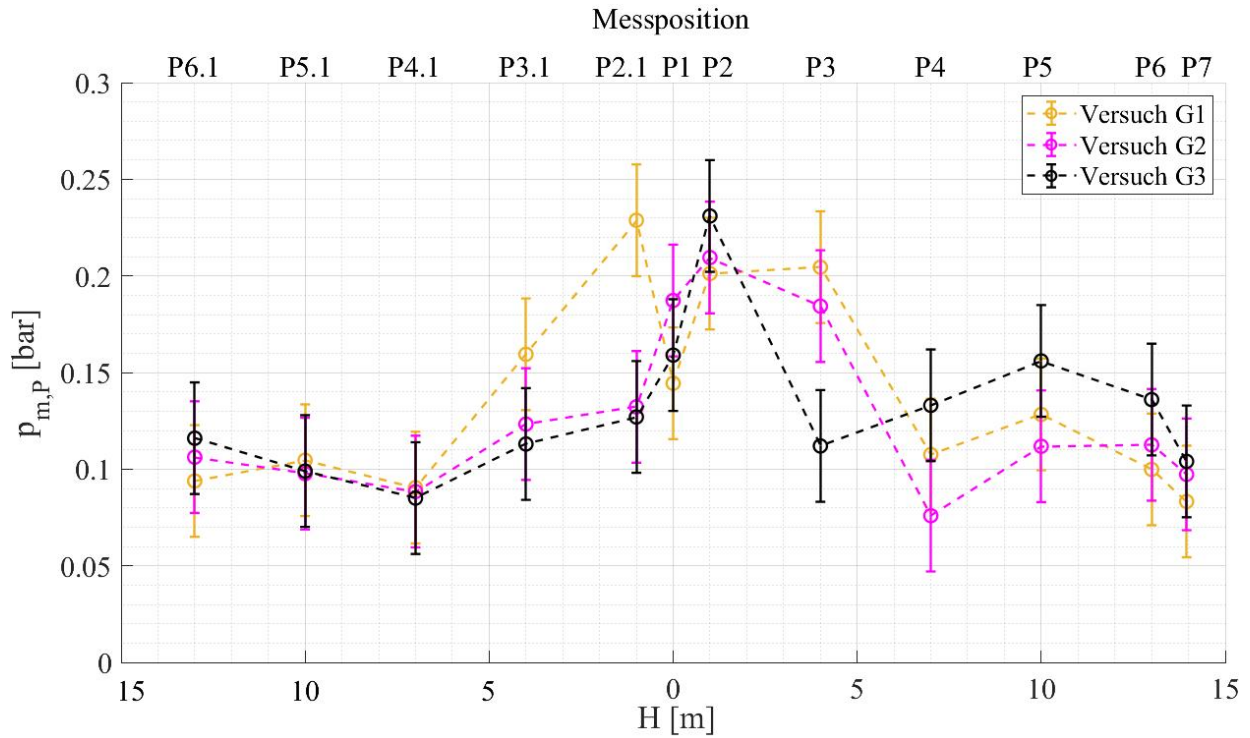


Abbildung B.3: Maximaler Explosionsdruck  $p_{m,P}$  in Abhängigkeit von der Messposition für getrocknete Maisstärke bei Druckentlastung an Elevatorkopf, -schächten und -fuß. Versuche G1 bis G3.

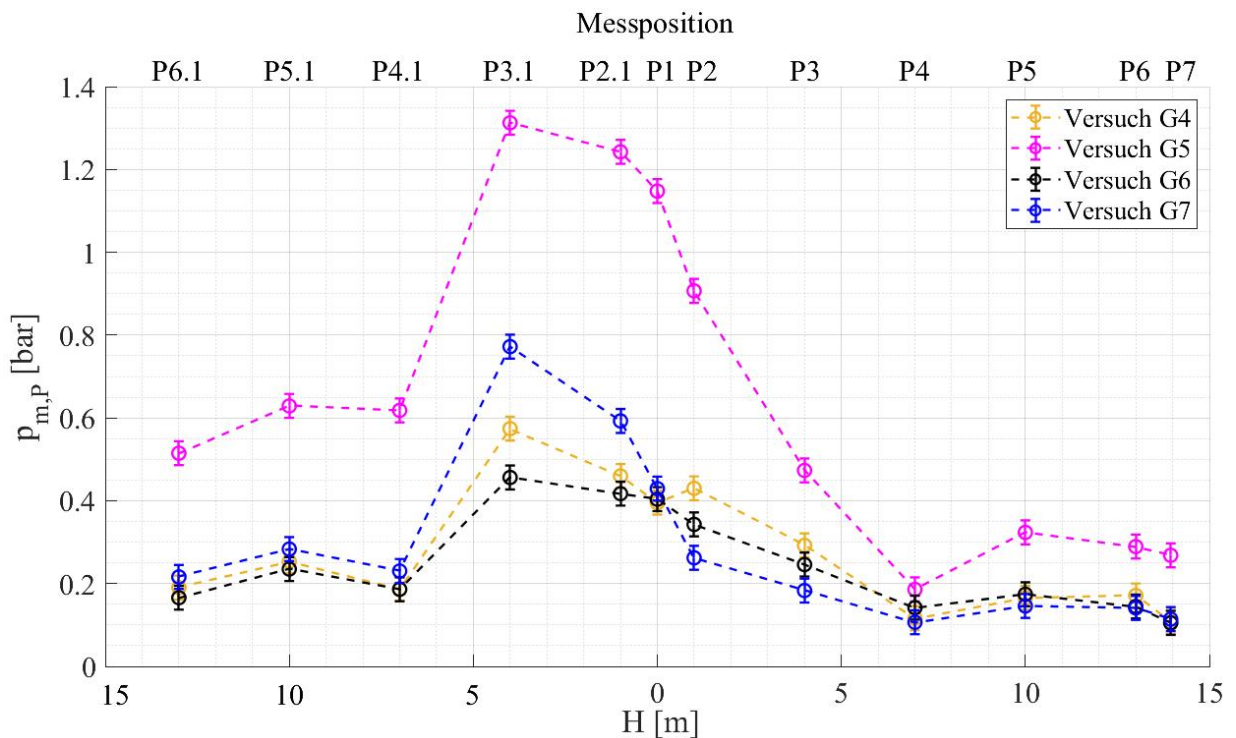


Abbildung B.4: Maximaler Explosionsdruck  $p_{m,P}$  in Abhängigkeit von der Messposition für getrocknete Maisstärke bei Druckentlastung an Elevatorkopf und -schächten. Versuche G4 bis G7.

										Förderschacht												Rücklaufschacht											
Vers.	Datum	Temp. [°C]	Luftd. [mbar]	Produkt	E <sub>i</sub> [kJ]	P1	P2	P3	P4	P5	P6	P7	P8/P1.1	P2.1	P3.1	P4.1	P5.1	P6.1															
						p <sub>m,p</sub> [bar]	p <sub>m,p</sub> [bar]	p <sub>m,p</sub> [bar]	p <sub>m,p</sub> [bar]	p <sub>m,p</sub> [bar]	p <sub>m,p</sub> [bar]	p <sub>m,p</sub> [bar]	p <sub>m,p</sub> [bar]	p <sub>m,p</sub> [bar]	p <sub>m,p</sub> [bar]	p <sub>m,p</sub> [bar]	p <sub>m,p</sub> [bar]	p <sub>m,p</sub> [bar]	p <sub>m,p</sub> [bar]	p <sub>m,p</sub> [bar]	p <sub>m,p</sub> [bar]												
F1	13.01.2021	0	953	Maisstärke 3402	5	0,219	0,197	0,149	0,070	0,089	0,092	0,000	0,000	<b>0,254</b>	0,236	0,118	0,109	0,095															
F2	13.01.2021	0	952	Maisstärke 3402	5	0,066	0,063	0,061	0,047	0,061	0,051	0,000	0,062	0,059	0,049	0,038	<b>0,070</b>	0,049															
F3	14.01.2021	-1	958	Maisstärke 3402	5	0,083	<b>0,086</b>	0,063	0,044	0,045	0,051	0,000	0,084	0,064	0,050	0,037	0,044	0,049															
F4	14.01.2021	-1	951	Maisstärke 3402	5	0,081	<b>0,081</b>	0,070	0,051	0,053	0,059	0,002	0,079	0,064	0,058	0,046	0,055	0,061															
G1	21.01.2021	5	935	Maisst. P19.1-MS	5	0,144	0,201	0,204	0,108	0,128	0,100	0,083	0,213	<b>0,229</b>	0,159	0,090	0,105	0,094															
G2	22.01.2021	5	929	Maisst. P19.1-MS	5	0,187	0,209	0,184	0,076	0,112	0,113	0,097	<b>0,218</b>	0,132	0,123	0,088	0,098	0,106															
G3	22.01.2021	7	929	Maisst. P19.1-MS	5	0,159	0,231	0,112	0,133	0,156	0,136	0,104	<b>0,258</b>	0,127	0,113	0,085	0,099	0,116															
F5	15.01.2021	-3	955	Weizenst. P20.5-WS	5	0,127	0,112	0,104	0,068	0,072	0,070	0,056	<b>0,130</b>	0,096	0,068	0,058	0,077	0,069															
F6	18.01.2021	0	959	Weizenst. P20.5-WS	5	0,067	0,073	0,054	0,042	0,045	0,049	0,034	0,075	0,128	<b>0,138</b>	0,064	0,059	0,050															
F7	18.01.2021	0	959	Weizenst. P20.5-WS	5	0,056	0,061	0,048	0,041	0,043	0,045	0,032	0,065	<b>0,073</b>	0,067	0,048	0,049	0,046															
F8	18.01.2021	0	959	Weizenst. P20.5-WS	5	0,396	0,345	0,207	0,095	0,124	0,106	0,056	<b>0,403</b>	0,402	0,243	0,108	0,131	0,101															
G4	25.01.2021	-1	939	getr. Maisst. P19.1-MS	5	0,395	0,430	0,292	0,116	0,166	0,171	0,108	0,432	0,460	<b>0,574</b>	0,186	0,254	0,190															
G5	26.01.2021	0	953	getr. Maisst. P19.1-MS	5	1,148	0,907	0,473	0,186	0,324	0,289	0,268	1,192	1,243	<b>1,313</b>	0,618	0,629	0,515															
G6	26.01.2021	0	953	getr. Maisst. P19.1-MS	5	0,404	0,343	0,246	0,142	0,174	0,145	0,105	0,412	0,417	<b>0,456</b>	0,186	0,235	0,166															
G7	26.01.2021	0	954	getr. Maisst. P19.1-MS	5	0,429	0,262	0,183	0,107	0,146	0,141	0,114	0,474	0,593	<b>0,772</b>	0,230	0,283	0,216															
F9	18.01.2021	0	958	Weizenst. P20.7-WS	5	0,205	0,155	0,146	0,158	0,181	0,156	0,081	0,241	0,329	<b>0,426</b>	0,346	0,273	0,229															
F10	19.01.2021	-1	951	Weizenst. P20.7-WS	5	0,204	0,204	0,179	0,170	0,153	0,140	0,091	<b>0,205</b>	0,151	0,137	0,149	0,150	0,131															
F11	19.01.2021	0	950	Weizenst. P20.7-WS	5	0,227	<b>0,228</b>	0,212	0,191	0,167	0,160	0,089	0,227	0,173	0,163	0,160	0,167	0,145															
F12	19.01.2021	0	949	Weizenst. P20.7-WS	5	0,226	0,169	0,114	0,149	0,162	0,165	0,095	0,253	0,357	<b>0,437</b>	0,354	0,272	0,241															

Abbildung B.5: Messergebnisse maximaler Explosionsdruck  $p_{m,p}$  der im Rahmen dieser Arbeit durchgeführten Versuche.

										Förderschacht							Rücklaufschacht						
Vers.	Datum	Temp.	Luftd.	Produkt	$E_i$	F1	F2	F3	F4	F5	F6	F7	F1_1	F2_1	F3_1	F4_1	F5_1	F6_1					
[-]	[-]	[°C]	[bar]	[-]	[kJ]	$t_f$	$t_f$	$t_f$	$t_f$	$t_f$	$t_f$	$t_f$	$t_f$	$t_f$	$t_f$	$t_f$	$t_f$	$t_f$					
F1	13.01.2021	0	953	Maisstärke 3402	5	0	0	<b>226</b>	0	0	0	0	0	z	0	0	0	0					
F2	13.01.2021	0	952	Maisstärke 3402	5	z	z	373	<b>893</b>	0	0	0	482	320	482	0	0	0					
F2_2						0	0	0	0	0	0	0	0	<b>316</b>	0	0	0	0					
F3	14.01.2021	-1	958	Maisstärke 3402	5	z	0	354	1269	1609	1836	1928	0	0	2206	<b>2568</b>	2206	0					
F4	14.01.2021	-1	951	Maisstärke 3402	5	z	86	330	1181	1817	2180	2299	z	0	2448	<b>2639</b>	2414	2409					
G1	21.01.2021	5	935	Maisst. P19.1-MS	5	z	105	172	818	1200	1511	1597	z	177	244	383	713	<b>1826</b>					
G1_2						0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	<b>2309</b>	1859	0					
G2	22.01.2021	5	929	Maisst. P19.1-MS	5	z	82	134	1109	1525	1764	1817	z	1205	1296	1616	<b>2008</b>	1893					
G3	22.01.2021	7	929	Maisst. P19.1-MS	5	z	82	125	674	292	483	574	z	<b>2978</b>	2290	1692	1315	899					
F5	15.01.2021	-3	955	Weizenst. P20.5-WS	5	z	67	282	961	1434	1912	2056	z	0	<b>4044</b>	2333	2127	2089					
F6	18.01.2021	0	959	Weizenst. P20.5-WS	5	z	158	278	0	0	0	0	z	211	<b>306</b>	0	0	0					
F7	18.01.2021	0	959	Weizenst. P20.5-WS	5	z	0	904	<b>1640</b>	0	0	0	z	220	335	0	0	0					
F8	18.01.2021	0	959	Weizenst. P20.5-WS	5	z	96	249	0	0	0	0	z	201	<b>273</b>	0	0	0					
G4	25.01.2021	-1	939	getr. Maisst. P19.1-MS	5	z	67	120	3145	<b>3193</b>	3136	3098	z	106	139	2419	2725	2930					
G5	26.01.2021	0	953	getr. Maisst. P19.1-MS	5	z	58	163	<b>1979</b>	1688	1578	1578	z	125	177	187	206	1516					
G5_2						0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	<b>803</b>	497	0					
G6	26.01.2021	0	953	getr. Maisst. P19.1-MS	5	z	72	134	837	306	483	612	z	0	<b>2080</b>	1788	1372	904					
G7	26.01.2021	0	954	getr. Maisst. P19.1-MS	5	z	96	134	794	306	469	689	z	110	149	<b>1554</b>	1305	995					
G7_2						0	0	0	0	0	0	0	0	0	<b>2371</b>	0	0	0					
F9	18.01.2021	0	958	Weizenst. P20.7-WS	5	z	106	397	1673	2118	2428	2510	z	125	184	220	<b>2581</b>	2558					
F10	19.01.2021	-1	951	Weizenst. P20.7-WS	5								<b>3657</b>	3533	3208	2916							
F10_2						z	96	187	1104	1960	2285	2309	z	0	<b>4000</b>	2854	2362	2338					
F11	19.01.2021	0	950	Weizenst. P20.7-WS	5	z	101	249	<b>1157</b>	0	0	0	z	0	0	0	0	0					
F12	19.01.2021	0	949	Weizenst. P20.7-WS	5	z	96	665	1869	2032	2261	2381	z	139	192	0	<b>4278</b>	2921					

Abbildung B.6: Messergebnisse Flammenlaufzeit  $t_f$  der im Rahmen dieser Arbeit durchgeführten Versuche.

Förderschicht: Flammengeschwindigkeit zwischen												Rücklaufschicht: Flammengeschwindigkeit zwischen						
Vers.	Datum	Temp.	Luftd.	Produkt	E <sub>i</sub>	F1/F2	F2/F3	F3/F4	F4/F5	F5/F6	F6/F7	F1.1/F2.1	F2.1/F3.1	F3.1/F4.1	F4.1/F5.1	F5.1/F6.1	F6.1/F7	
[-]	[-]	[°C]	[bar]	[-]	[kJ]	[m/s]	[m/s]	[m/s]	[m/s]	[m/s]	[m/s]	[m/s]	[m/s]	[m/s]	[m/s]	[m/s]	[m/s]	
F1	13.01.2021	0	953	Maisstärke 3402	5	0	13		0				0			0	0	
F2	13.01.2021	0	952	Maisstärke 3402	5	0	8	6				3	19			0	0	
F2_2						0						3				0	0	
F3	14.01.2021	-1	958	Maisstärke 3402	5	0	8	3	9	13	10			8	8		0	
F4	14.01.2021	-1	951	Maisstärke 3402	5	12	12	4	5	8	8			16	13		0	
G1	21.01.2021	5	935	Maisst. P19.1-MS	5	10	45	5	8	10	11	6	45	22	9	3	4	
G1_2						0									7			
G2	22.01.2021	5	929	Maisst. P19.1-MS	5	12	58	3	7	13	18	1	33	9	8	26	13	
G3	22.01.2021	7	929	Maisst. P19.1-MS	5	12	70	5	8	16	10	0	4	5	8	7	3	
F5	15.01.2021	-3	955	Weizenst. P20.5-WS	5	15	14	4	6	6	7			2	15	79	29	
F6	18.01.2021	0	959	Weizenst. P20.5-WS	5	6	25					5	32					
F7	18.01.2021	0	959	Weizenst. P20.5-WS	5	0	3	4				5	26					
F8	18.01.2021	0	959	Weizenst. P20.5-WS	5	10	20					5	42					
G4	25.01.2021	-1	939	getr. Maisst. P19.1-MS	5	15	57	1	63	53	25	9	91	1	10	15	6	
G5	26.01.2021	0	953	getr. Maisst. P19.1-MS	5	17	29	2	10	27		8	58	300	158	2	15	
G5_2						0									10			
G6	26.01.2021	0	953	getr. Maisst. P19.1-MS	5	14	48	4	6	17	7		1	10	7	6	3	
G7	26.01.2021	0	954	getr. Maisst. P19.1-MS	5	10	79	5	6	18	4	9		2	12	10	3	
G7_2																		
F9	18.01.2021	0	958	Weizenst. P20.7-WS	5	9	10	2	7	10	12	8	51	83		130	20	
F10	19.01.2021	-1	951	Weizenst. P20.7-WS	5	0						8	9	10	9			
F10_2						10	10	3	4	9	40			3	6	125	0	
F11	19.01.2021	0	950	Weizenst. P20.7-WS	5	10	20	3									0	
F12	19.01.2021	0	949	Weizenst. P20.7-WS	5	10	5	2	18	13	8	7	57			2	0	

Abbildung B.7: Messergebnisse mittlere Flammengeschwindigkeit  $\bar{v}_f$  der im Rahmen dieser Arbeit durchgeführten Versuche.

# Anhang C

Messergebnisse

Rechteckschachtelevator

**ohne Flascheneintrag, Malzstaub**

Konstruktiver Explosionsschutz für Elevatoren		Projekt Nr.: F-05-0701																										
Vers. Nr.	Datum	Fördermenge [kg]	Zündenergie [J]	IV [s]	Fuß			Explosionsdruck Schacht aufwärts			Kopf			Explosionsdruck Schacht abwärts			Auslauf P8 [bar]	Fuß			Flammenlaufzeit Schacht aufwärts			Kopf F7 13,95m [ms]	Flammenlaufzeit Schacht abwärts			Auslauf F8 1,3m [ms]
					P1 1m	P2 4m	P3 7m	P4 10m	P5 13m	P6 13m	P7 13,95m	P2_1 1m	P3_1 4m	P4_1 7m	P5_1 10m	P6_1 1,3m		F1 1m	F2 4m	F3 4m	F4 7m	F5 10m	F6 13m		F2_1 1m	F3_1 4m	F4_1 7m	
Malzstaub; Zündort Kopf; Aspiration = Ein; Druckentlastung im Kopf, beiden Schächten und Fuß; Elevatorleerlauf ohne Flascheneintrag																												
A 1	18.05.2007	100	1000	22	0,170	0,182	0,198	0,188	0,610	0,467	0,472	0,212	0,305	0,150	0,483	0,428	0,327	1139	1306	709	848	795	735	670	339	744		
A 2	21.05.2007	100	1000	22	0,153	0,149	0,140	0,061	0,254	0,230	0,209	0,174	0,209	0,106	0,301	0,196	0,172	1514	1849	522	1542	1700	541	498	336	740		
A 3	22.05.2007	100	1000	22	0,141	0,144	0,120	0,066	0,294	0,262	0,230	0,150	0,165	0,106	0,259	0,212	0,267	2547	2266	648	2775	3373	653	612	419			
A 16	05.07.2007	100	1000	22	0,152	0,124	0,137	0,055	0,350	0,167	0,131	0,153	0,118	0,055	0,202	0,144	0,072	1626	1850	231	1521	1132	505	241	189	609		
A 17	06.07.2007	100	1000	22	0,159	0,163	0,151	0,085	0,370	0,341	0,309	0,145	0,148	0,116	0,339	0,261	0,321	3868	3443	755			753		438	794		
Malzstaub; Zündort Fuß; Aspiration = Ein; Druckentlastung im Kopf, beiden Schächten und Fuß; Elevatorleerlauf ohne Flascheneintrag																												
B 10 *	05.09.2008	100	2000	35	0,539	0,723	0,794	0,393	0,403	0,239	0,208	0,488	0,702	0,227	0,234	0,175	0,116											
B 11 *	05.09.2008	100	2000	35	0,314	0,306	0,294	0,149	0,145	0,092	0,088	0,495	0,781	0,171	0,179	0,088	0,051		383	477	540	325	503		1767	1075	1311	
Malzstaub; Zündort Kopf; Aspiration = Ein; Druckentlastung im Kopf und beiden Schächten; Elevatorleerlauf ohne Flascheneintrag																												
A 5	24.05.2007	100	1000	22	0,179	0,194	0,142	0,067	0,285	0,246	0,219	0,167	0,188	0,099	0,316	0,204	0,173	2269	2582	560	2226	2327	564	527	378	601		
A 6	24.05.2007	100	1000	22	0,131	0,129	0,103	0,085	0,372	0,298	0,255	0,117	0,123	0,125	0,257	0,232	0,253	1725	2008	728	1606	1177	707		437	754		
Malzstaub; Zündort Kopf; Aspiration = Ein; Druckentlastung nur im Kopf; Elevatorleerlauf ohne Flascheneintrag																												
A 26	13.07.2007	100	1000	22	0,607	0,571	0,441	0,286	0,447	0,363	0,320	0,874	1,066	0,954	0,891	0,292	0,284	2564	2009	1256	645	612		573	254	616		
A 27	17.07.2007	100	1000	22	0,575	0,509	0,330	0,398	0,494	0,269	0,239	0,580	0,583	0,748	0,516	0,230	0,170	891	1174	315	809	383	344	301	215	469		
B 7 *	04.09.2008	100	2000	35	0,819	0,773	0,425	0,736	0,806	0,483	0,367	1,694	1,753	1,389	0,804	0,321	0,277		2753	2053	679	747	732		626	337		
B 8 *	04.09.2008	100	2000	35	0,768	0,914	0,662	1,168	1,120	0,433	0,276	1,088	1,458	1,272	0,630	0,229	0,100	1937	1216	1142	1221	1195	1142	1021	363	926		
Malzstaub; Zündort Kopf; ohne Aspiration; Druckentlastung im Kopf und beiden Schächten; Elevatorleerlauf ohne Flascheneintrag																												
A 7	24.05.2007	100	1000	22	0,063	0,065	0,072	0,043	0,154	0,139	0,150	0,060	0,076	0,055	0,134	0,116	0,101	1412	1615	1728	1330	1102		732	378			
A 8	25.05.2007	100	1000	22	0,185	0,174	0,227	0,115	0,580	0,383	0,339	0,180	0,129	0,088	0,316	0,276	0,346			841				861	750	876		

Abbildung C.1: Teil 1: Messergebnisse Rechteckschachtelevator. Produkt: Malzstaub 1 (Versuchsreihe A) und Malzstaub 2 (Versuchsreihe B\*) [10].

**ohne Flascheneintrag, Malzstaub**

Konstruktiver Explosionsschutz für Elevatoren																											
Projekt Nr.: F-05-0701																											
Vers. Nr.	Datum	Fördermenge [kg]	Zündenergie [J]	Iv	Fuß			Explosionsdruck Schacht aufwärts			Kopf P7 13,95m	Explosionsdruck Schacht abwärts			Auslauf P8	Fuß			Flammenlaufzeit Schacht aufwärts			Kopf F7 13,95m	Flammenlaufzeit Schacht abwärts			Auslauf F8	
					P1	P2	P3	P4	P5	P6		P2_1	P3_1	P4_1		P5_1	P6_1	F1	F2	F3	F4		F5	F6	F2_1		F3_1
Malzstaub; Zündort Fuß; Aspiration = Ein; Druckentlastung im Kopf und beiden Schächten; Elevatorleerlauf ohne Flascheneintrag																											
A 10	31.05.2007	100	1000	22	1,092	1,098	0,966	0,382	0,308	0,149	0,129	1,08	1,044	0,14	0,220	0,131	0,118	332	516	525	563	588		391	451		492
A 11	31.05.2007	100	1000	22	0,753	0,762	0,675	0,289	0,247	0,119	0,106	0,697	0,618	0,08	0,169	0,077	0,051	640	654	602	665		583	664	627	690	
die folgenden Versuche (A 18 - A 19) wurden mit unterschiedlichen Iv gefahren																											
A 18	09.07.2007	100	1000	10	0,936	0,911	0,564	0,244	0,279	0,149	0,145	0,907	0,654	0,146	0,168	0,140	0,079	221								260	
A 19	10.07.2007	100	1000	60	1,226	1,236	1,190	0,427	0,382	0,181	0,192	1,038	0,675	0,109	0,191	0,140	0,107	442			592		517	585			
B 6 *	03.09.2008	100	2000	35	1,280	1,265	1,100	0,435	0,390	0,157	0,140	1,173	0,976	0,161	0,250	0,123	0,062	53	241	284					284	195	
Malzstaub; Zündort Fuß; Aspiration = Ein; Druckentlastung nur im Kopf; Elevatorleerlauf ohne Flascheneintrag																											
A 24	12.07.2007	100	1000	22	1,364	1,370	1,305	0,857	0,605	0,314	0,340	1,312	1,202	0,632	0,424	0,259	0,158	255	304	304	485				308		
A 25	12.07.2007	100	1000	22	1,142	1,092	0,803	0,577	0,406	0,215	0,224	1,142	1,019	0,496	0,307	0,170	0,115	240	240	308					283		
B 1 *	02.09.2008	100	1000	35	1,626	1,769	2,100	1,761	1,256	0,443	0,492	1,526	1,414	1,251	0,889	0,376	0,241	79	393	393	530	582	624		587	551	603
B 3 *	03.09.2008	100	2000	35	1,861	2,088	2,048	1,761	1,728	0,782	0,738	1,734	1,544	1,415	0,722	0,463	0,366	84	441	441	519	566	587		414	514	556
B 4 *	03.09.2008	100	2000	35	1,779	1,681	1,775	1,571	1,083	0,517	0,413	1,833	1,788	1,874	0,909	0,437	0,237	136	524	524	703	755	787		498	729	524
B 5 *	03.09.2008	100	2000	35	1,984	2,004	1,946	1,745	1,036	0,412	0,439	1,797	1,474	0,997	0,626	0,357	0,217	84	288	288	346				231	351	383
Malzstaub; Zündort Mitte aufsteigender Schacht; Aspiration = Ein; Druckentlastung im Kopf und Fuß; Elevatorleerlauf ohne Flascheneintrag																											
A 15	04.06.2007	125	1000	22	0,162	0,215	0,222	0,273	0,415	0,291	0,255	0,397	0,780	0,833	0,537	0,228	0,225					860	1990		3892	3852	3644
Malzstaub; Zündort Fuß; Aspiration = Ein; Druckentlastung im Kopf und Fuß; Elevatorleerlauf ohne Flascheneintrag																											
E 3 *	09.10.2008	100	5000	35	0,266	0,335	0,576	0,566	0,358	0,245	0,194	0,291	0,235	0,223	0,208	0,187		41	144	212			3119		912	1414	2735

\* Malzstaub Typ 2

Abbildung C.2: Teil 2: Messergebnisse Rechteckschachtelevator. Produkt: Malzstaub 1 (Versuchsreihe A) und Malzstaub 2 (Versuchsreihe B\*) [10].

# ohne Flascheneintrag, Weizenmehl

Vers. Nr.		Datum	Fördermenge [kg]	Zündenergie [J]	tv [s]	Fuß	Explosionsdruck Schacht aufwärts				Kopf	Explosionsdruck Schacht abwärts				Auslauf	Flammenlaufzeit Schacht aufwärts				Kopf	Flammenlaufzeit Schacht abwärts				Auslauf					
						P1	P2	P3	P4	P5	P6	P7	P2_1	P3_1	P4_1	P5_1	P6_1	F1	F2	F3	F4	F5	F6	F7	F2_1	F3_1	F4_1	F5_1	F6_1	F8	
						[bar]	[bar]	[bar]	[bar]	[bar]	[bar]	[bar]	[bar]	[bar]	[bar]	[bar]	[bar]	[ms]	[ms]	[ms]	[ms]	[ms]	[ms]	[ms]	[ms]	[ms]	[ms]	[ms]	[ms]	[ms]	[ms]
Ungetrocknetes Weizenmehl; Zündort Fuß; Aspiration = Ein; Druckentlastung im Kopf und beiden Schächten; Elevatorlauf ohne Flascheneintrag																															
	B 1	05.06.2007	125	2000	22	0,280	0,184	0,161	0,086	0,102	0,070	0,085	0,266	0,302	0,084	0,073	0,073		1335	1500	1660	1745				1560	2120	1980	1850	2045	
	B 2	06.06.2007	100	2000	22	0,155	0,158	0,128	0,054	0,060	0,028	0,038	0,148	0,104	0,069	0,051	0,032	0,024	800	945	1125				1083	3625					
Ungetrocknetes Weizenmehl; Zündort Fuß; Aspiration = Aus; Druckentlastung im Kopf und beiden Schächten; Elevatorlauf ohne Flascheneintrag																															
	B 3	06.06.2007	100	2000	22	0,127	0,131	0,112	0,055	0,047	0,028	0,027	0,121	0,084	0,032	0,035	0,029	0,025	250	400	545				490						
	B 4	06.06.2007	125	2000	22	0,231	0,226	0,173	0,073	0,063	0,061	0,047	0,236	0,193	0,073	0,059	0,052	0,045	630	795					780	932					
Ungetrocknetes Weizenmehl; Zündort Fuß; Aspiration = Ein; Druckentlastung nur im Kopf; Elevatorlauf ohne Flascheneintrag																															
	B 5	12.06.2007	100	2000	22	0,300	0,310	0,345	0,337	0,279	0,141	0,147	0,290	0,223	0,181	0,151	0,117	0,087	400	609	847	946	1023								
	B 6	13.06.2007	100	2000	22	0,276	0,284	0,293	0,290	0,216	0,095	0,103	0,268	0,219	0,186	0,137	0,091	0,072	671	911	1018	1121							1067		
Ungetrocknetes Weizenmehl; Zündort Fuß; Aspiration = Ein; Ohne Druckentlastungen; Elevatorlauf ohne Flascheneintrag																															
	B 7	13.06.2007	100	2000	22	0,383	0,389	0,406	0,389	0,352	0,295	0,289	0,371	0,348	0,332	0,308	0,280	0,254		433	602	713	806	906	1157			770			
	B 9	15.06.2007	100	2000	22	0,484	0,460	0,475	0,459	0,423	0,348	0,341	0,414	0,350	0,339	0,344	0,323	0,279	426	555	967	1092	1192					1053			
	B 10	18.06.2007	100	2000	22	0,306	0,311	0,349	0,341	0,325	0,252	0,252	0,251	0,247	0,267	0,247	0,235	0,216		526	824	935	1021					777	902		
	A 2	21.08.2008	100	2000	35	0,422	0,412	0,437	0,388	0,259	0,210	0,215	0,409	0,355	0,293	0,256	0,214	0,120		167	370	510	614					587	610		800

Abbildung C.3: Messergebnisse Rechteckschachtelevator. Produkt: Weizenmehl [10].



# ohne Flascheneintrag, Maisstärke

Konstruktiver Explosionsschutz für Elevatoren																													
Projekt Nr.: F-05-0701																													
Vers. Nr.	Datum	Förder- menge [kg]	Zünd- energie [J]	Fuß P1	Explosionsdruck Schacht aufwärts			Kopf P7 13,95m	Explosionsdruck Schacht abwärts			Fuß F1	Flammenlaufzeit Schacht aufwärts			Kopf F7 13,95m	Flammenlaufzeit Schacht abwärts			Auslauf F8									
					P2 1m	P3 4m	P4 7m		P5 10m	P6 13m	P2,1 1m		P3,1 4m	P4,1 7m	P5,1 10m		P6,1 13m	F2 1m	F3 4m		F4 7m	F5 10m	F6 13m	F2,1 1m	F3,1 4m	F4,1 7m	F5,1 10m	F6,1 13m	
Getrocknete Maisstärke; Zündort Fuß; Aspiration = Ein; Druckenlastung im Kopf, beiden Schächten und Fuß; Elevatorleerlauf ohne Flascheneintrag																													
C 1	20.06.2007	100	1000	0,348	0,332	0,351	0,145	0,137	0,088	0,073	0,470	0,395	0,084	0,082	0,091	0,047		443	722	846	967	1048		445	753	1354	1154	1733	
C 2	20.06.2007	100	2000	0,339	0,367	0,251	0,067	0,060	0,050	0,042	0,395	0,177	0,025	0,036	0,062	0,043		502	1051	1245	1414	1484		1403	1161	1577	1633	2253	
C 3	25.06.2007	225	2000	0,279	0,339	0,267	0,118	0,104	0,081	0,082	0,306	0,106	0,046	0,064	0,096	0,067		301	383	910	1124	1339		2084	1758	1586	1490	1995	
G 1	18.06.2009	100	5000	0,530	0,550	0,420	0,150	0,180	0,110	0,110	0,660	-	0,290	0,260	0,120	0,060		50	143	269	648	941		80	126	216	-	-	
G 2	19.06.2009	100	5000	-	0,490	0,470	0,190	0,210	0,150	0,140	0,540	-	0,210	0,180	0,110	0,060		100	114	236	395	571		90	114	255	1075	1910	
G 3	23.06.2009	100	2000	0,470	0,460	0,330	0,110	-	0,070	0,060	0,580	-	0,140	0,110	0,060	0,030		100	148	291	702	1065		148	119	315	1566	1670	
G 4	23.06.2009	100	2000	0,640	0,650	0,600	0,170	0,170	0,120	0,100	0,710	-	0,240	0,200	0,100	0,045		119	157	271	-	1067		119	157	295	2205	-	
Getrocknete Maisstärke; Zündort Fuß; Aspiration = Ein; Druckenlastung im Kopf und beiden Schächten; Elevatorleerlauf ohne Flascheneintrag																													
C 6	28.06.2007	225	2000	1,104	0,882	0,329	0,135		0,084	0,077	1,135	1,000	0,135	0,146	0,035	0,044													
C 7	29.06.2007	100	2000	1,172	0,780	0,387	0,165		0,083	0,082	1,096	0,530	0,091	0,075		0,052		172											
G 5	24.06.2009	100	2000	1,210	1,040	0,550	0,170	0,080	0,120	0,100	0,110	0,210	0,290	1,430	1,170	0,060		81	107					106	81				
G 6	24.06.2009	100	2000	1,710	1,410	1,180	0,250	0,270	0,180	0,150	0,210	0,420	0,510	2,190	1,670			81	141					155	125				
Getrocknete Maisstärke; Zündort Kopf; Aspiration = Ein; Druckenlastung nur im Kopf; Elevatorleerlauf ohne Flascheneintrag																													
C 28	18.07.2007	225	2000	0,573	0,406	0,418	0,494	0,975	0,723	0,659	0,625	1,134	1,202	0,923	0,607	0,486				2207				2213	2073	1253	2174		
C 29	18.07.2007	100	2000	0,320	0,282	0,230	0,378	0,707	0,510	0,429	0,314	0,277	0,311	0,422	0,480	0,398		2546	2794	1507	294			1998	1389	731	297	881	
C 30	19.07.2007	100	2000	0,359	0,323	0,225	0,331	0,779	0,466	0,399	0,352	0,355	0,470	0,712	0,522	0,306		2009	2363	2564	180			1454	970	519	183	523	
Getrocknete Maisstärke; Zündort Fuß; Aspiration = Ein; Druckenlastung nur im Kopf; Elevatorleerlauf ohne Flascheneintrag																													
C 32	19.07.2007	0	2000	1,581	1,418	0,791	0,629	0,505	0,212	0,200	1,641	1,454	0,714	0,420	0,088														
C 33	20.07.2007	100	2000	0,946	0,791	0,394	0,331	0,249	0,123	0,126	0,861	0,404	0,236	0,144	0,083					1088	1278	1429	1604		2330	2074	1800	1692	2590
C 34	20.07.2007	0	2000	1,324	1,222	1,324	0,930	0,568	0,301	0,325	1,322	1,250	0,623	0,355	0,148					601									

Abbildung C.4: Messergebnisse Rechteckschachtelevator. Produkt: Maisstärke [10].

## Anhang D

### Abbildungen - Vergleich von Rund- und Rechteckschachtelevator

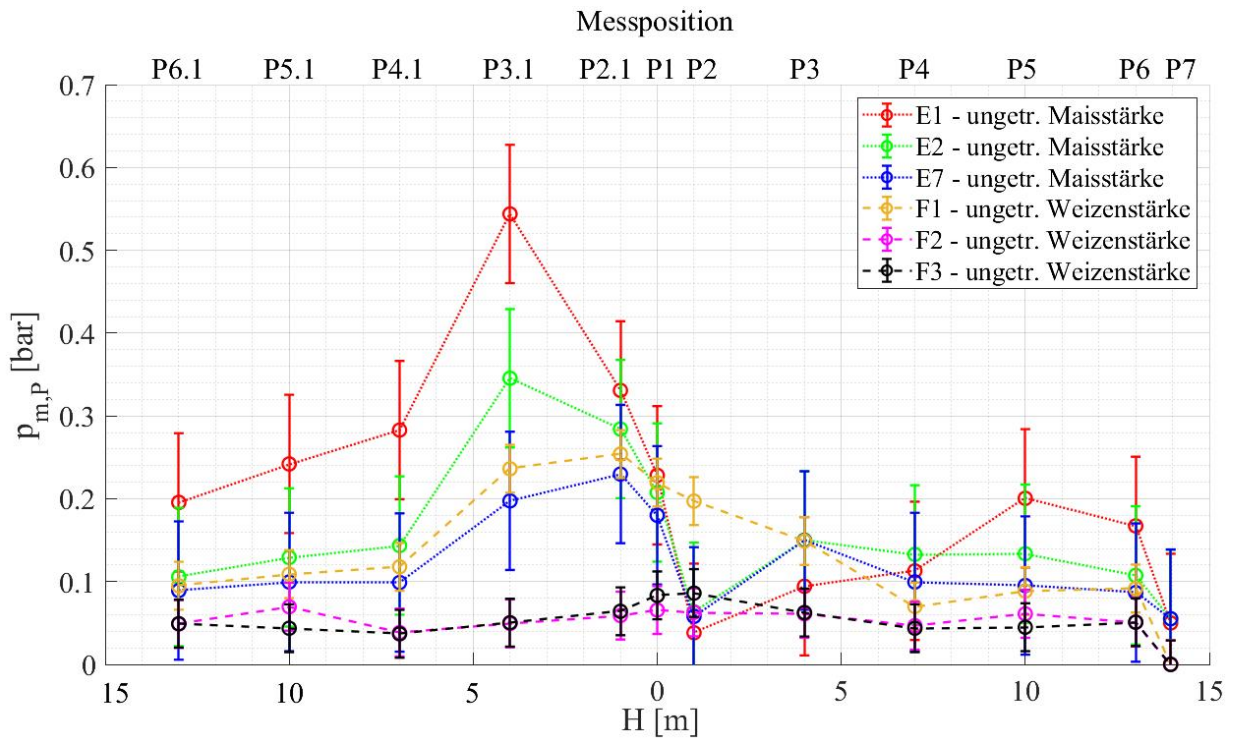


Abbildung D.1: Maximaler Explosionsdruck  $p_{m,P}$  in Abhängigkeit von der Messposition für ungetrocknete Maisstärke älterer Versuche (Versuchsreihe E;  $K_{St}=150 \text{ bar} \cdot \text{m} \cdot \text{s}^{-1}$ ) und ungetrocknete Weizenstärke (Versuchsreihe F;  $K_{St}=145 \text{ bar} \cdot \text{m} \cdot \text{s}^{-1}$ ). Druckentlastung an Elevatorkopf, -schächten und -fuß.

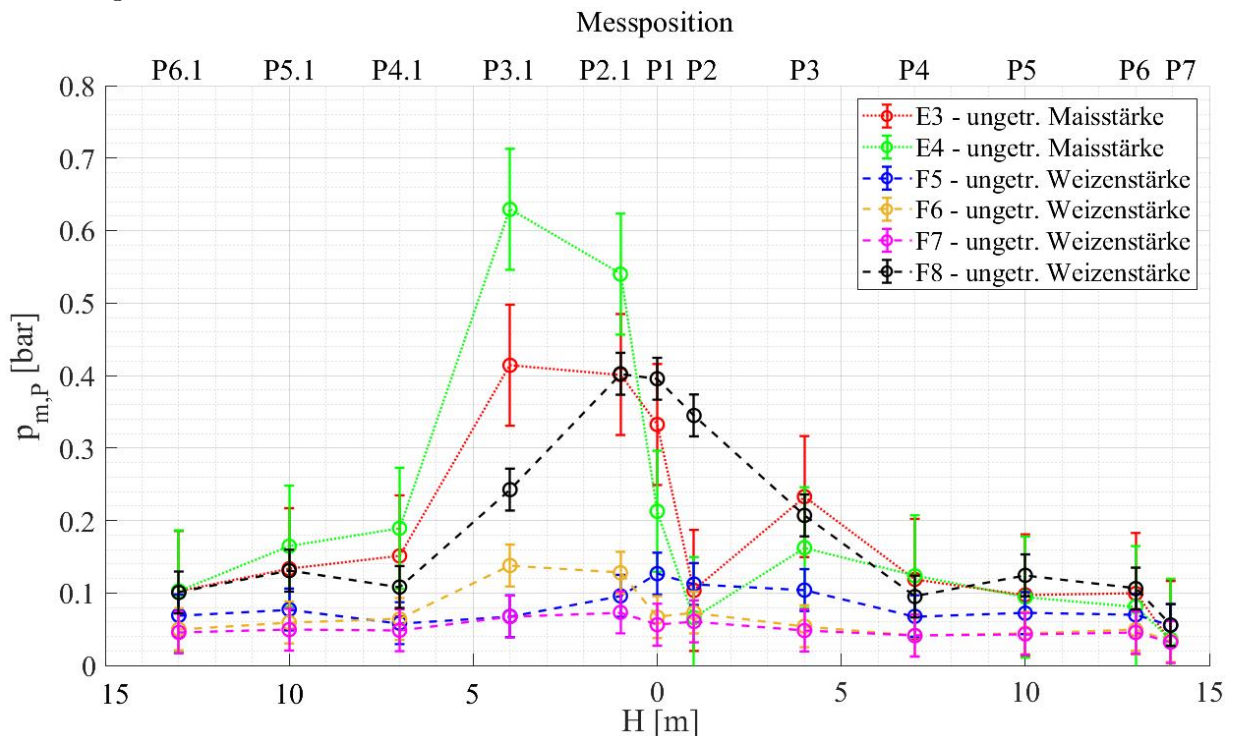


Abbildung D.2: Maximaler Explosionsdruck  $p_{m,P}$  in Abhängigkeit von der Messposition für ungetrocknete Maisstärke älterer Versuche (Versuchsreihe E;  $K_{St}=150 \text{ bar} \cdot \text{m} \cdot \text{s}^{-1}$ ) und ungetrocknete Weizenstärke (Versuchsreihe F;  $K_{St}=145 \text{ bar} \cdot \text{m} \cdot \text{s}^{-1}$ ). Druckentlastung an Elevatorkopf und -schächten.

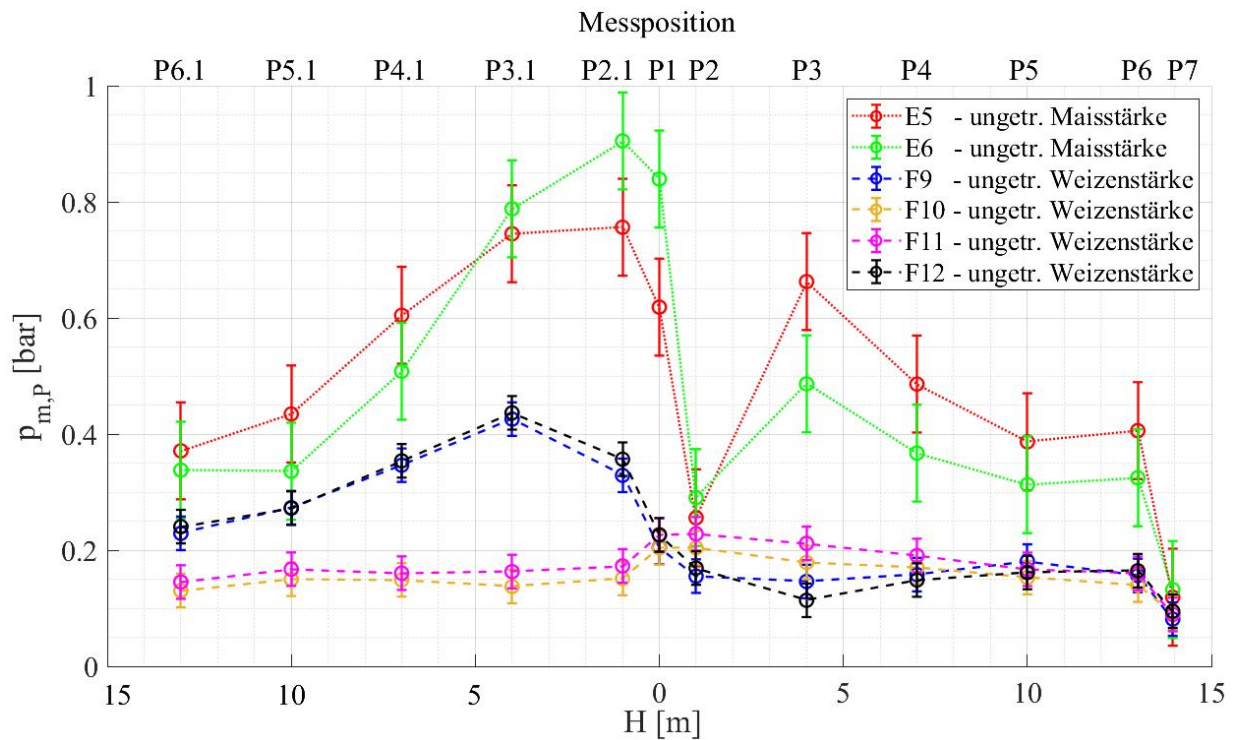


Abbildung D.3: Maximaler Explosionsdruck  $p_{m,P}$  in Abhängigkeit von der Messposition für ungetrocknete Maisstärke älterer Versuche (Versuchsreihe E;  $K_{St}=150 \text{ bar} \cdot \text{m} \cdot \text{s}^{-1}$ ) und ungetrocknete Weizenstärke (Versuchsreihe F;  $K_{St}=145 \text{ bar} \cdot \text{m} \cdot \text{s}^{-1}$ ). Druckentlastung ausschließlich am Elevatorkopf.

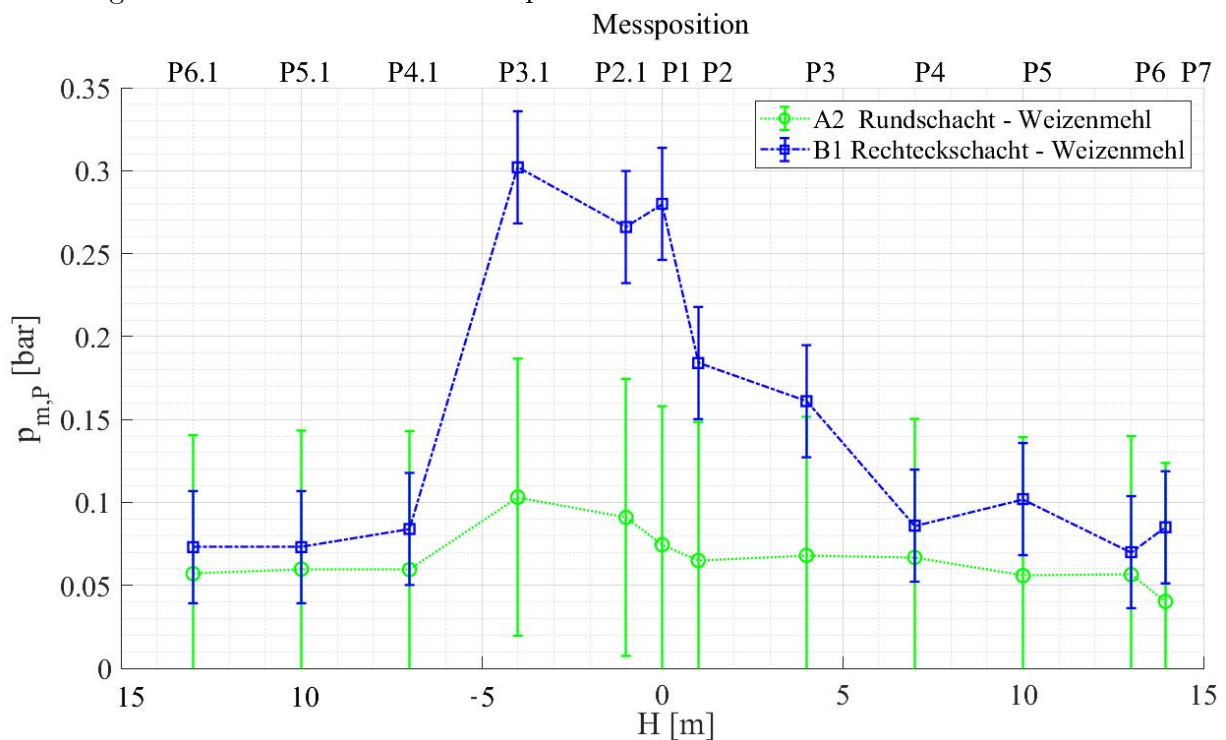


Abbildung D.4: Maximaler Explosionsdruck  $p_{m,P}$  in Abhängigkeit von der Messposition der Versuche von  $p_{ex}$  für Weizenmehl an Rund- und Rechteschachtelevator. Druckentlastung an Elevatorkopf und -schächten. Versuch A1 (Rundschaft):  $K_{st}=117 \text{ bar} \cdot \text{m}/\text{s}^{-1}$ . Versuch B1 (Rechteschaft):  $K_{st}=109 \text{ bar} \cdot \text{m}/\text{s}^{-1}$ .

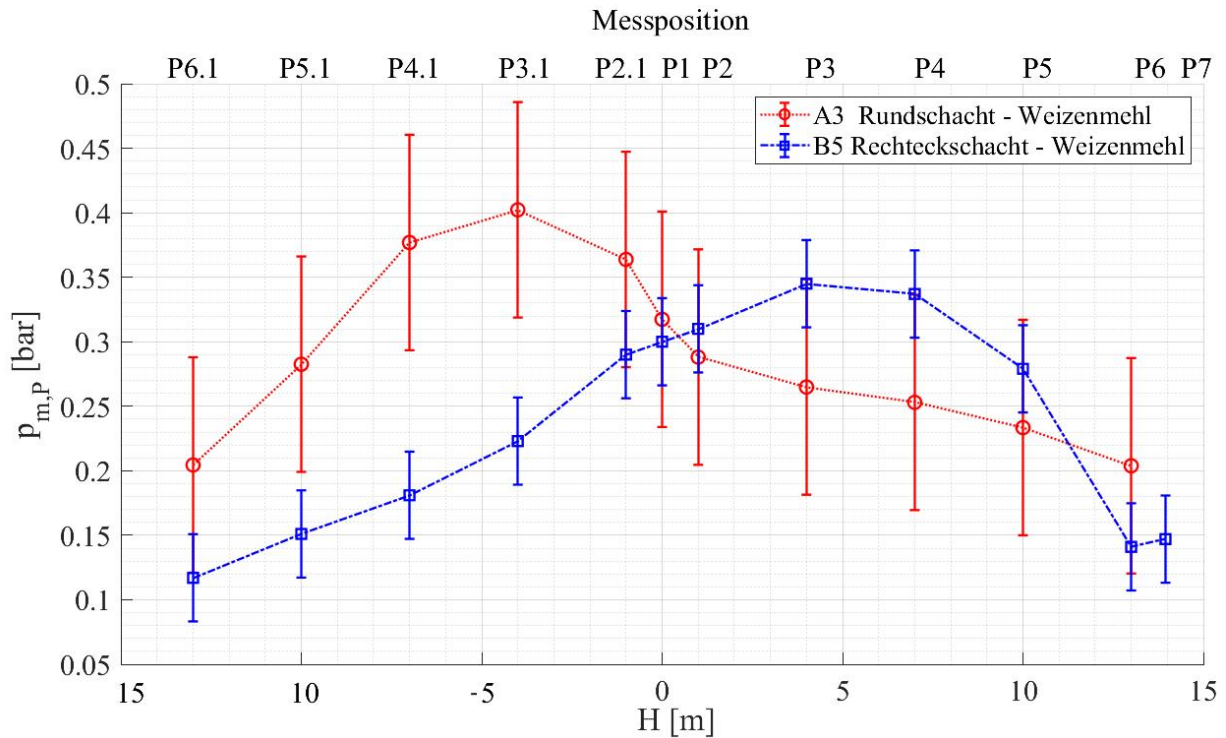


Abbildung D.5: Maximaler Explosionsdruck  $p_{m,P}$  in Abhängigkeit von der Messposition der Versuche von  $p_{ex}$  für Weizenmehl an Rund- und Rechteckschachtelevator. Druckentlastung ausschließlich am Elevatorkopf. Versuch A3 (Rundschacht):  $K_{st} = 117 \text{ bar} \cdot \text{m/s}^{-1}$ . Versuch B5 (Rechteckschacht):  $K_{st} = 109 \text{ bar} \cdot \text{m/s}^{-1}$ .

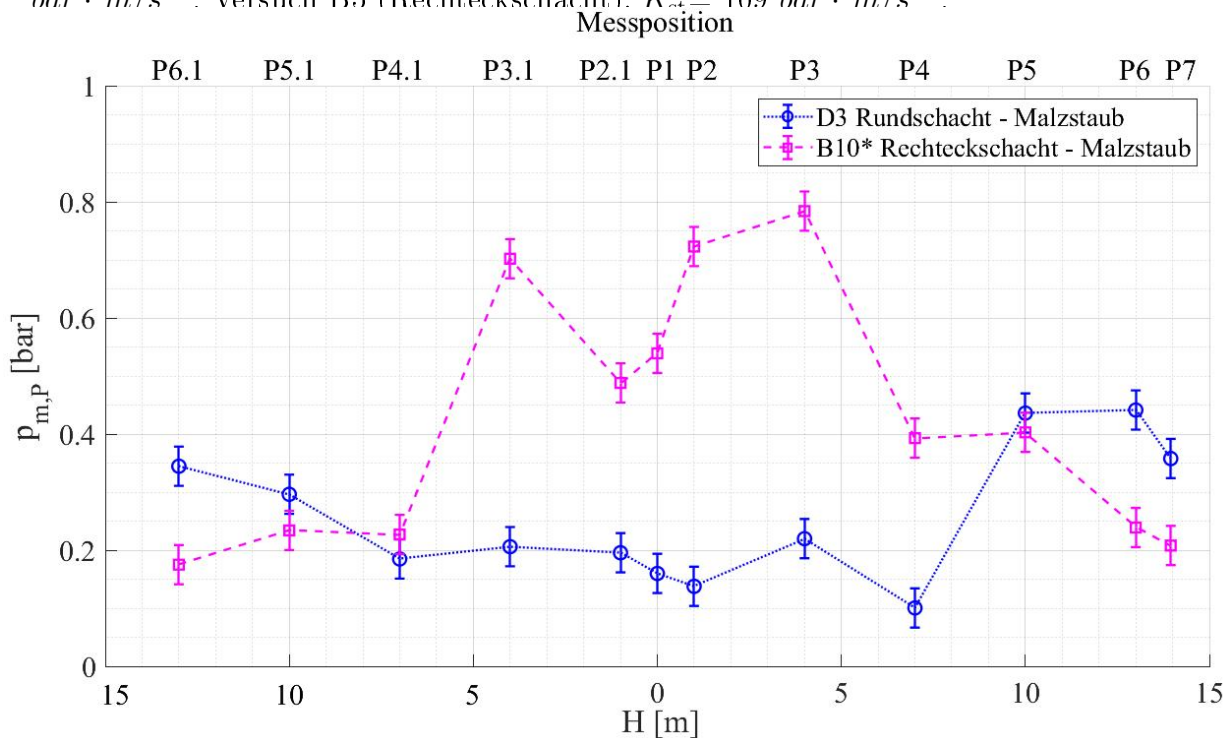


Abbildung D.6: Maximaler Explosionsdruck  $p_{m,P}$  in Abhängigkeit von der Messposition der Versuche von  $p_{ex}$  für Malzstaub an Rund- und Rechteckschachtelevator. Druckentlastung an Elevatorkopf, -schächten und -fuß. Versuch D3 (Rundschacht):  $K_{st} = 155 \text{ bar} \cdot \text{m/s}^{-1}$ . Versuch B10\* (Rechteckschacht):  $K_{st} = 159 \text{ bar} \cdot \text{m/s}^{-1}$ .

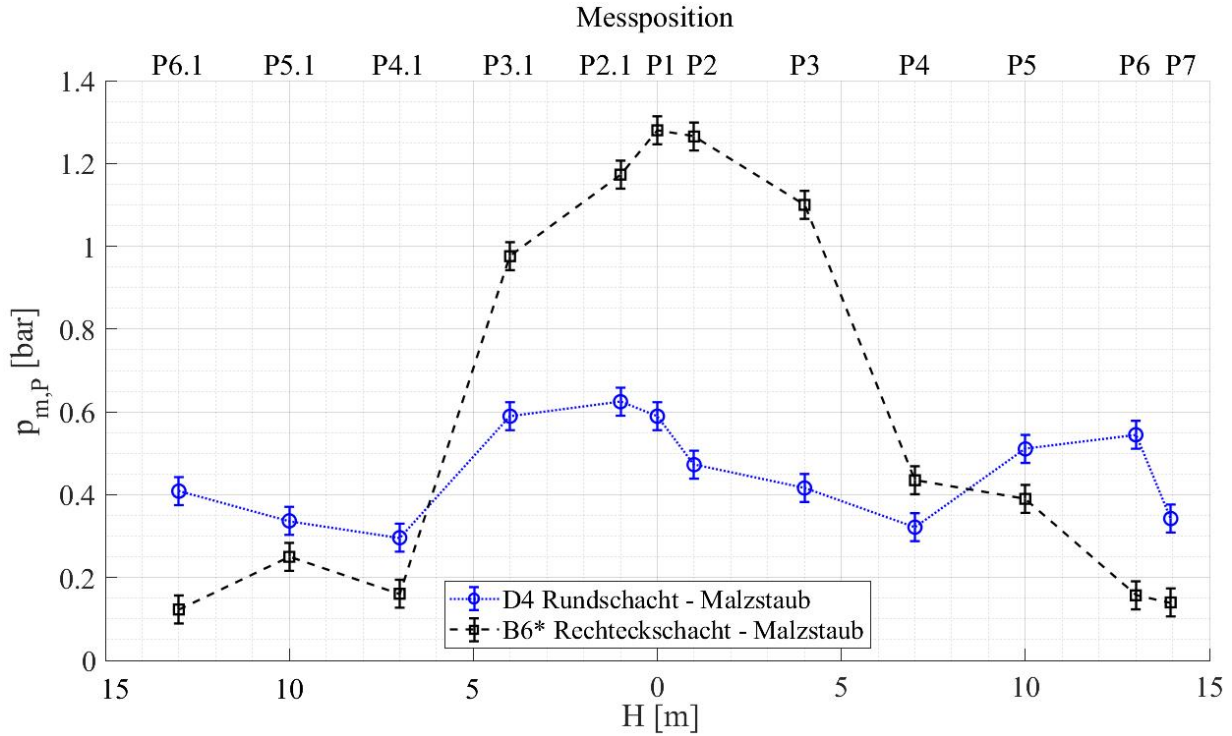


Abbildung D.7: Maximaler Explosionsdruck  $p_{m,P}$  in Abhängigkeit von der Messposition der Versuche von  $p_{ex}$  für Malzstaub an Rund- und Rechteckschachtelevator. Druckentlastung an Elevatorkopf und -schächten. Versuch D4 (Rundschacht):  $K_{st} =$  Messposition

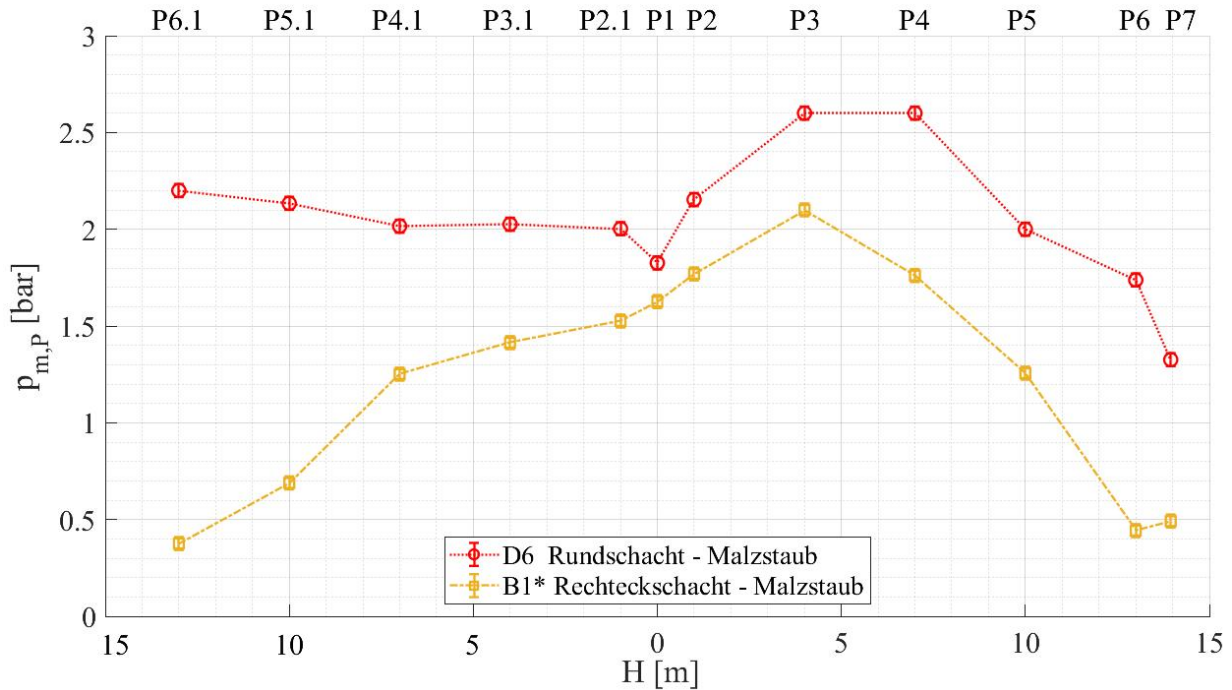


Abbildung D.8: Maximaler Explosionsdruck  $p_{m,P}$  in Abhängigkeit von der Messposition der Versuche von  $p_{ex}$  für Malzstaub an Rund- und Rechteckschachtelevator. Druckentlastung ausschließlich am Elevatorkopf. Versuch D6 (Rundschacht):  $K_{st} = 143 \text{ bar} \cdot \text{m/s}^{-1}$ . Versuch B1\* (Rechteckschacht):  $K_{st} = 159 \text{ bar} \cdot \text{m/s}^{-1}$ .

# Anhang E

## Zeichnungen und Datenblätter

Bezeichnung	Wert
Gesamtlänge des Elevator	$L = 15125 \text{ mm}$
Schachtabreite	$b_S = 390 \text{ mm}$
Schachttiefe	$a_S = 270 \text{ mm}$
Querschnittsfläche Schacht	$A_S = 0,105 \text{ m}^2$
Becherbreite	$b_B = 280 \text{ mm}$
Bechertiefe	$a_B = 165 \text{ mm}$
Becherbelegung	$B = 7,5 \text{ Becher/m}$
Bechervolumen	$V_B \approx 3 \text{ L}$
Becherabstand	$d_B \approx 130 \text{ mm}$
Wandabstand vorne	$s_v \approx 60 \text{ mm}$
Wandabstand seitlich	$s_s \approx 55 \text{ mm}$
Wandabstand hinten	$s_h \approx 45 \text{ mm}$
Freie Querschnittsfläche	$A_F = 54\%$
Förderleistung	$\dot{m}_P \approx 150 \text{ t/h}$ Getreide (Schüttdichte: $\rho_S = 0,75 \text{ t/m}^3$ )
Fördergeschwindigkeit	$v_B = 3,5 \text{ m/s}$
Entlastungsfläche (je)	$A_E = 0,105 \text{ m}^2$

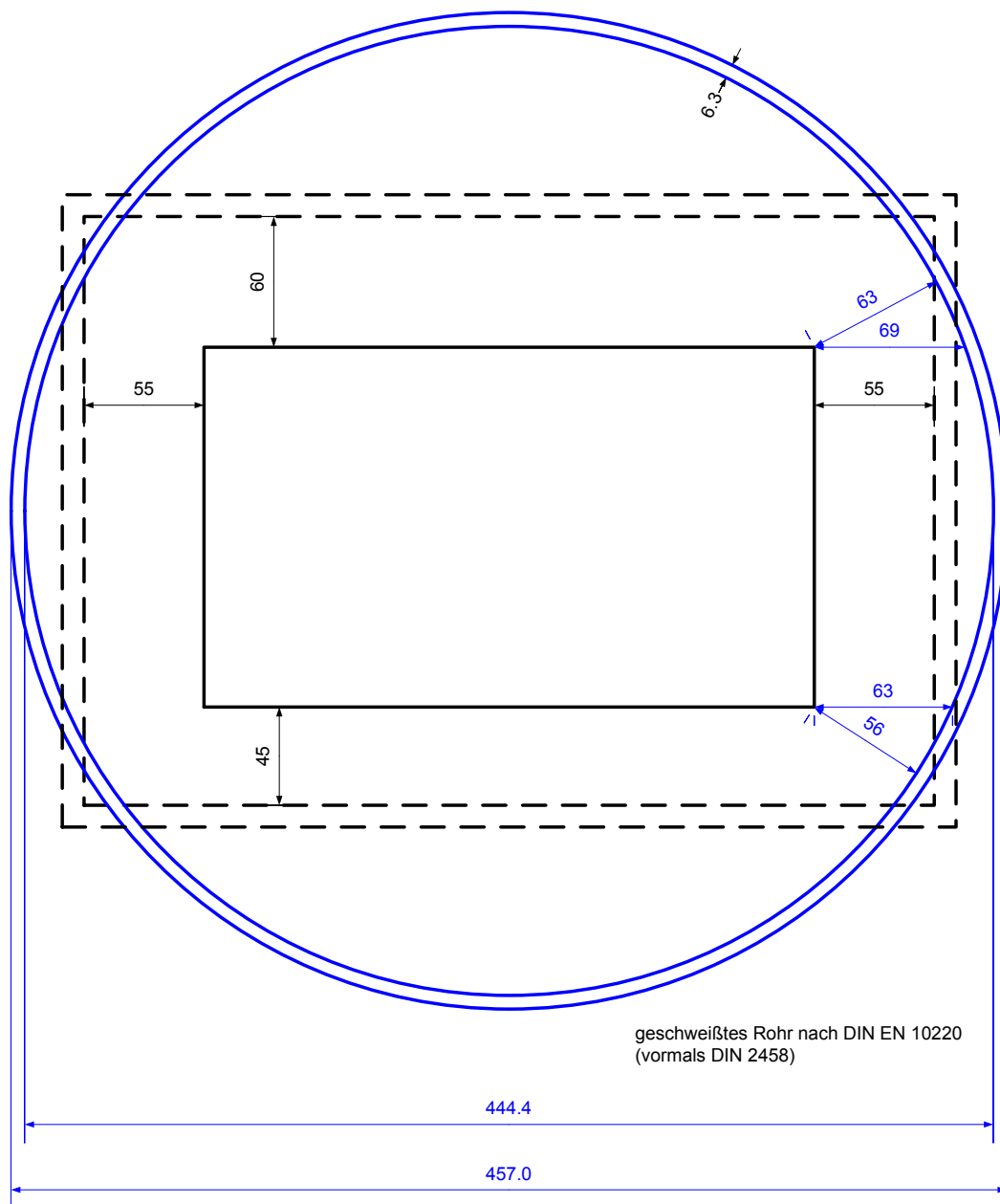
Tabelle E.1: Daten und Abmessungen des verwendeten Rechteckschachtelevators [10].

Bezeichnung	Wert
Gesamtlänge des Elevator	$L = 15125 \text{ mm}$
Schachtdurchmesser	$d = 444 \text{ mm}$
Querschnittsfläche Schacht	$A_S = 0,155 \text{ m}^2$
Becherbreite	$b_B = 280 \text{ mm}$
Bechertiefe	$a_B = 165 \text{ mm}$
Becherbelegung	$B = 7,5 \text{ Becher/m}$
Bechervolumen	$V_B \approx 3 \text{ L}$
Becherabstand	$d_B \approx 130 \text{ mm}$
Wandabstand seitlich	$s_s \approx 56 \text{ mm}$
Freie Querschnittsfläche	$A_F = 70.2\%$
Förderleistung	$\dot{m}_P \approx 150 \text{ t/h}$ Getreide (Schüttdichte: $\rho_S = 0,75 \text{ t/m}^3$ )
Fördergeschwindigkeit	$v_B = 3,5 \text{ m/s}$
Entlastungsfläche Kopf	$A_{E,K} = 0,0731 \text{ m}^2$ und $0,1073 \text{ m}^2$
Entlastungsfläche Schächte (je)	$A_{E,S} = 0,1560 \text{ m}^2$
Entlastungsfläche Fuß (je)	$A_{E,F} = 0,0572 \text{ m}^2$

Tabelle E.2: Daten und Abmessungen des verwendeten Rundschachtelevator.



Umbau Elevator auf Rundschächte (Variante 1)



Querschnittsfläche Rechteckschacht: 0.1053 m<sup>2</sup>  
 Querschnittsfläche runder Schacht: 0.1551 m<sup>2</sup>

freier Querschnitt runder Schacht: 70.2 %  
 (Rechteckschacht: 56 %)

2012-01-22 Sch

Abbildung E.1: Zeichnung des Schachtquerschnittes von Rundschachtelevator und Rechteckschachtelevator.



FSA Forschungsgesellschaft  
für angewandte  
Systemsicherheit und  
Arbeitsmedizin mbH

Versuchsanlage Kappelrodeck  
Projekt-Nr.: F-05-1301 F/G  
Versuche: F1-F12/G1-G7  
Datum: 13.01.2021

### Messstellenübersicht

Messstelle	Transientenrecorder			Messverstärker			Messkabel	Sensor		Messunsicherheit		Bemerkung		
	ID-Nr.	Kanal	Abtastrate [µs]	TP-Filter [kHz]	Typ	ID-Nr.		Messbereich [bar]	TP-Filter [kHz]	Nr.	Typ		ID-Nr.	Druckbereich [mbar]
P1	KT14	1	100	-	5015	KV9	2	3	110	7031	76	37	500	-
P1.1	KT14	27	100	-	5015	KV8	2	3	113	7031	68	37	500	-
P2	KT14	2	100	-	5015	KV18	2	3	112	7261	74	37	500	-
P2.1	KT14	8	100	-	5015	KV23	2	3	111	7261	73	37	500	-
P3	KT14	3	100	-	5015	KV11	2	3	109	7261	80	37	500	-
P3.1	KT14	9	100	-	5015	KV17	2	3	108	7261	79	37	500	-
P4	KT14	4	100	-	5015	KV6	2	3	107	7261	32	37	500	-
P4.1	KT14	10	100	-	5015	KV16	2	3	106	7261	62	37	500	-
P5	KT14	5	100	-	5015	KV15	2	3	105	7031	36	37	500	-
P5.1	KT14	11	100	-	5015	KV14	2	3	104	7031	67	37	500	-
P6	KT14	6	100	-	5015	KV12	2	3	102	7031	78	37	500	-
P6.1	KT14	12	100	-	5015	KV5	2	3	103	7031	75	37	500	-
P7	KT14	7	100	-	5015	KV19	2	3	101	7031	82	37	500	-
Zünden	KT14	30	100	-	-	-	-	-	145	-	-	-	-	-

Abbildung E.2: Messtellenübersicht der verwendeten Drucksensoren.



FSA Forschungsgesellschaft  
für angewandte  
Systemsicherheit und  
Arbeitsmedizin mbH

Versuchsanlage Kappelrodeck  
Projekt-Nr.: G-15-2023  
Versuche: C1-8,  
Datum: 07.12.2020

### Messstellenübersicht

Messstelle	Transientenrecorder				Messkabel	Sensor		Messunsicherheit im Zeitbereich  ≤± [µs]	Bemerkung
	ID-Nr.	Kanal	Abtastrate [µs]	TP-Filter [kHz]		Nr.	Typ		
F1	KT14	14	100	5	137	-	29	500	-
F1.1	KT14	26	100	5	136	-	6	500	-
F2	KT14	15	100	5	139	-	4	500	-
F2.1	KT14	21	100	5	138	-	5	500	-
F3	KT14	16	100	5	135	-	30	500	-
F3.1	KT14	22	100	5	134	-	3	500	-
F4	KT14	17	100	5	133	-	15	500	-
F4.1	KT14	23	100	5	132	-	16	500	-
F5	KT14	18	100	5	131	-	8	500	-
F5.1	KT14	24	100	5	130	-	-	500	-
F6	KT14	19	100	5	127	-	11	500	-
F6.1	KT14	25	100	5	128	-	14	500	-
F7	KT14	20	100	5	129	-	-	500	-
F10	KT14	13	100	5	116	-	12	500	-

Abbildung E.3: Messstellenübersicht der verwendeten Flammensensoren.

**Druckmesskettenkalibrierung**

Einstellung Transientenrecorder: 1V/Div = 10V gesamt

Ifd. Nr.	Mess- stelle	Datum	Druckaufnehmer		Messkabel Nr.	Ladungs- verstärker ID-Nr.	Transienten- recorder / kanal ID-Nr.	Prüfdruck Kal.-Man. [bar]	Empfindlichkeit Ladungsverst. [pC/unit]	Verstärkung (scale) Ladungsverst. [units/V]	Messwert Transienten- recorder [V]	Abweichung (Linearität) [mbar]	Temp. [°C]
			Typ	ID-Nr.									
K1	P1	10.11.2020	7031	76	110	KV 9	KT 14 / 1	4,649	-60,37	0,5	4,6	5	20
K2	P1	10.11.2020	7031	76	110	KV 9	KT 14 / 1	0,911	-60,37	0,5	0,9	0	20
K3	P1.1	10.11.2020	7031	68	113	KV 8	KT14/27	4,404	-60,58	0,5	4,4	0	20
K4	P1.1	10.11.2020	7031	68	113	KV 8	KT 14 / 27	0,926	-60,58	0,5	0,9	0	20
K5	P2	10.11.2020	7261	74	112	KV 18	KT 14 / 2	4,109	-2283	0,5	4,1	4	20
K6	P2	10.11.2020	7261	74	112	KV 18	KT 14 / 2	0,934	-2283	0,5	0,9	7	20
K7	P2.1	10.11.2020	7261	73	111	KV 23	KT 14 / 8	3,617	-2320	0,5	3,6	5	20
K8	P2.1	10.11.2020	7261	73	111	KV 23	KT 14 / 8	0,952	-2320	0,5	1	1	20
K9	P3	10.11.2020	7261	80	109	KV 11	KT 14 / 3	3,205	-2250	0,5	3,2	2	20
K10	P3	10.11.2020	7261	80	109	KV11	KT 14 / 3	1,004	-2250	0,5	1	2	20
K11	P3.1	10.11.2020	7261	79	108	KV 17	KT 14 / 9	4,626	-2297	0,5	4,6	3	20
K12	P3.1	10.11.2020	7261	79	108	KV 17	KT 14 / 9	1,043	-2297	0,5	1,1	10	20
K13	P4	09.12.2021	7261	32	107	KV 6	KT 14 / 4	2,143	-2222	0,5	2,1	1	2
K14	P4	09.12.2021	7261	32	107	KV 6	KT 14 / 4	0,902	-2222	0,5	0,9	2	2
K15	P4.1	09.12.2021	7261	62	106	KV 16	KT 14 / 10	1,505	-2295	0,5	1,5	5	2

Abbildung E.4: Kalibrierung der verwendeten Druckmessketten Blatt 1.

Projekt-Nr: F 05-1301

## Druckmesskettenkalibrierung

Einstellung Transientenrecorder: 1V/Div = 10V gesamt

Ifd. Nr.	Mess- stelle	Datum	Druckaufnehmer		Messkabel Nr.	Ladungs- verstärker ID-Nr.	Transienten- recorder ID-Nr.	Prüfdruck Kal.-Man. [bar]	Empfindlichkeit Ladungsverst. [pC/unit]	Verstärkung (scale) [units/V]	Messwert Transientenre [V]	Abweichung (Linearität) [mbar]	Tempe- ratur [°C]
			Typ	ID-Nr.									
K16	P4.1	09.12.2021	7261	62	106	KV 16	KT 14 /10	0,728	-2295	0,5	0,7	2	2
K17	P5	09.12.2021	7031	36	105	KV 15	KT 14 /5	2,334	-55,15	0,5	2,3	6	2
K18	P5	09.12.2021	7031	36	105	KV 15	KT 14 /5	0,748	-55,15	0,5	0,7	12	2
K19	P5.1	09.12.2021	7031	67	104	KV 14	KT 14 /11	2,172	-59,75	0,5	2,2	2	2
K20	P5.1	09.12.2021	7031	67	104	KV 14	KT 14 /11	0,819	-59,75	0,5	0,8	4	2
K21	P6	09.12.2021	7031	78	102	KV 12	KT 14 /6	1,93	-60,25	0,5	1,9	9	2
K22	P6	09.12.2021	7031	78	102	KV 12	KT 14 /6	0,752	-60,25	0,5	0,7	6	2
K23	P6.1	09.12.2021	7031	75	103	KV 5	KT 14 /12	2,026	-60,9	0,5	2	3	2
K24	P6.1	09.12.2021	7031	75	103	KV 5	KT 14 /12	0,803	-60,9	0,5	0,8	1	2
K25	P7	09.12.2021	7031	82	101	KV 19	KT 14 /7	1,605	-59,85	0,5	1,6	14	2
K26	P7	09.12.2021	7031	82	101	KV 19	KT 14 /7	0,759	-59,85	0,5	0,8	5	2

Abbildung E.5: Kalibrierung der verwendeten Druckmessketten Blatt 2.