

Ablauf von Staubexplosionen in
Becherelevatoren mit runden
Förder- und Rücklaufschächten

F-05-1301

Projekt F-05-1301

Ablauf von Staubexplosionen in Becherelevatoren mit runden Förder- und Rücklaufschächten

Dipl.-Ing. Peter Schepp
Tobias König M.Sc.

Forschungsgesellschaft für angewandte Systemsicherheit und
Arbeitsmedizin GmbH

Forschungsgesellschaft für angewandte Systemsicherheit und
Arbeitsmedizin e.V.

Mannheim, Dezember 2023

Inhaltsverzeichnis

Symbolverzeichnis	III
Glossar	V
Zusammenfassung	1
1 Einleitung	3
1.1 Zielsetzung	4
1.2 Lösungsweg	4
1.3 Aktueller Kenntnisstand	4
2 Vorbereitung	7
2.1 Produktauswahl	8
2.2 Explosionstechnische Kenngrößen	9
3 Explosionsversuche am Rundschachtelevator	10
3.1 Versuchsaufbau	10
3.2 Versuchsablauf	16
3.3 Versuchsdurchführung	17
3.4 Datenauswertung	18
3.4.1 Explosionsdruck	18
3.4.2 Flammenlaufzeit und mittlere Flammengeschwindigkeit	19
4 Ergebnisse	21
4.1 Flammenausbreitung	21
4.2 Maximaler Explosionsdruck	25
4.2.1 maximaler Explosionsdruck ohne Entlastungsflächen	31
4.2.2 Ort des maximalen Explosionsdrucks	32
4.2.3 Explosionsdruck nach Entlastungsflächen	34
4.3 Weitere Erkenntnisse	35

5 Diskussion	39
5.1 Ausblick	42
Abbildungsverzeichnis	46
Tabellenverzeichnis	48
A Messergebnisse tabellarisch	50
B Zeichnungen und Datenblätter	60

Symbolverzeichnis

Symbol	Einheit	Bedeutung
A	m^2	Fläche
a_B	mm	Bechertiefe
A_E	m^2	Entlastungsfläche
$A_{E,K}$	m^2	Entlastungsfläche Elevatorkopf
$A_{E,S}$	m^2	Entlastungsfläche Elevatorschacht
$A_{E,F}$	m^2	Entlastungsfläche Elevatorfuß
A_F	m^2	Schacht-Querschnittsfläche
$A_{F,\text{rund}}$	%	Freie A_F des Rundschachtelevators
$A_{F,\text{eckig}}$	%	Freie A_F des Rechteckschachtelevators
a_S	mm	Schachttiefe
b_B	mm	Becherbreite
b_S	mm	Schachtbreite
B	Becher/m	Becherbelegung
B_Z	-	Brennbarkeit
c_S	g/m^3	Staubkonzentration
d	mm	Schachtdurchmesser (Rundschacht)
d_B	mm	Becherabstand
DE	-	Entlastungsflächenkonfiguration
$(dp/dt)_{\text{ex}}$	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_z	J	Zündenergie
f	mm	Folienstärke
F	Ma-%	Produktfeuchte
GM	-	Genormtes Muster
GT	$^{\circ}\text{C}$	Glimmtemperatur
H	m	Sensorabstand
k	diverse	Vertrauensintervall
K_{St}	$\text{bar}\cdot\text{m}/\text{s}$	Explosionstechnische Kenngröße
\dot{m}_P	t/h	Förderleistung
MZE	mJ	Mindestzündenergie
MZT	$^{\circ}\text{C}$	Mindestzündtemperatur
OEG	g/m^3	obere Explosionsgrenze

p	bar	Explosionsdruck
p_{ci}	bar	Durch chemische Zünder verursachter Explosionsdruck
p_{dyn}	bar	dynamischer Ansprechdruck bei Druckentlastung
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 der Druckentlastung
ρ_S	kg/m ³	Schüttdichte
s_h	mm	Abstand der Förderbecher zum Elevatorgehäuse (hinten)
s_s	mm	Abstand der Förderbecher zum Elevatorgehäuse (seitlich)
s_v	mm	Abstand der Förderbecher zum Elevatorgehäuse (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 ³	untere Explosionsgrenze
UM	-	Urmuster
V	m ³	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

Begriff	Definition
Becherwerk	Durch Umlenkrollen geführtes Gurtband eines Becherelevators 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 Becherelevators.
Elevatorkopf	Gehäuse mit Umlenk- oder Antriebsrolle und Produktabwurf am oberen Ende eines Becherelevators.
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 Flammensensors benötigt.
Förderschacht	Rechteckiges oder rundes Gehäuse zwischen Elevatorkopf und Elevatorfuß eines Becherelevators, in dem sich das Gurtband mit montierten Förderbechern aufwärts bewegt.
Genormtes Muster (GM)	Standardisierte Staubprobe zur Bestimmung der explosionstechnischen Kenngrößen p_{max} und K_{St} . Die Standardisierung erfolgt durch Trocknung und Siebung der Probe auf eine Partikelgröße kleiner 63 μm .
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.
Nassreinigung	Reinigung des Versuchsaufbaus unter Verwendung von Waschwasser.
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 Aktivieren der Zündquelle [1].
untere Explosionsgrenze (UEG)	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	Mischung, die unter festgelegten Bedingungen die niedrigste Zündenergie zur Zündung benötigt.

Zusammenfassung

Ziel dieses Forschungsprojektes ist die Beantwortung der Fragestellung, ob geltende Auslegungsempfehlungen für die Schutzmaßnahme „Explosionsdruckentlastung“ für Rechteckschachtelevatoren in Kombination mit explosionsdruckstoffester Bauweise nach CEN/TR 16829 bzw. VDI 2263-8.1 auch auf Rundschachtelevatoren anwendbar sind. Hierfür wurden umfangreiche Explosionsversuche an einem Rundschachtelevator auf dem Versuchsgelände der FSA/BGN in Kappelrodeck durchgeführt. Dabei wurden Stäube in einem Bereich des K_{St} -Wertes von $K_{St} = 100 \text{ bar} \cdot \frac{\text{m}}{\text{s}}$ bis $K_{St} = 190 \text{ bar} \cdot \frac{\text{m}}{\text{s}}$ in Kombination mit 3 verschiedenen Anordnungen von Druckentlastungsflächen untersucht. Insgesamt wurden 66 Explosionsversuche mit 5 unterschiedlichen Stäuben durchgeführt.

Es konnte festgestellt werden, dass bei einer Anordnung der Druckentlastungsflächen nach Kurve 2 in CEN/TR 16829 bzw. VDI 2263-1, also Druckentlastung im *Elevatorkopf*¹, im *Elevatorfuß* sowie in den Schächten im Abstand von 6 m keine erhöhten maximalen Explosionsdrücke im Vergleich zum Rechteckschachtelevator auftreten. Alle am Rundschachtelevator beobachteten maximalen Explosionsdrücke unterschreiten die empfohlenen *Mindestfestigkeiten* für Rechteckschachtelevatoren. Die genannte Anordnung der Entlastungsflächen ist unter Einhaltung der entsprechenden Voraussetzungen auch für Rundschachtelevatoren anwendbar.

Bei Kurve 4 nach CEN/TR 16829, also Druckentlastung im Elevatorkopf sowie in den Schächten im Abstand von 6 m, ist ein geringfügig erhöhter Explosionsdruck am Rundschachtelevator im Vergleich zum Rechteckschachtelevator erkennbar. Die für Rechteckschachtelevatoren geltenden Auslegungsempfehlungen werden beim Rundschachtelevator bei dieser *Entlastungsflächenkonfiguration* geringfügig überschritten. Auf Grundlage der vorhandenen Datenbasis wird deshalb empfohlen, die für den Rechteckschacht geltenden Mindestfestigkeiten für die Anwendung am Rundschacht um mindestens 15 % zu erhöhen. Unter Einbezug der Messunsicherheit überschreitet dann der gemessene Explosionsdruck eines Einzelversuches mit Malzstaub diese Empfehlung. Auf Grund der hohen Anzahl der durchgeführten Versuche ist diese in einem einzigen Versuch beobachtete Überschreitung vertretbar. Das sicherheitstechnische Risiko ist hierbei als gering einzustufen.

Bei Kurve 5 nach CEN/TR 16829, also Druckentlastung ausschließlich am Elevatorkopf bzw. Druckentlastung in den Schächten im Abstand von 12 m, wurden am Rundschachtelevator mehrfach deutlich erhöhte Explosionsdrücke im Vergleich zum Rechteckschacht beobachtet. Die empfohlenen Mindestfestigkeiten für Rechteckschachteleva-

¹ *Kursiv* gestellte Begriffe sind im Glossar erläutert.

toren wurden dabei in 6 von 24 Versuchen teilweise erheblich überschritten. Es wurden maximale Überschreitung bis zum Faktor 2 und höher der Mindestfestigkeit am Rechteckschacht beobachtet. Eine Anwendbarkeit von Kurve 5 nach CEN/TR 16829 auf Rundschachtelevatoren kann auf Grundlage der vorhandenen Daten auch unter Einbezug einer möglichen Erhöhung der Mindestfestigkeit nicht empfohlen werden.

Bei Rundschachtelevatoren in denen Produkte gefördert werden, deren Abriebstaub einen K_{St} - Wert $\leq 100 \text{ bar} \cdot \text{m/s}$ aufweist, kann empfohlen werden unabhängig von der Elevatorlänge auf Druckentlastungsflächen zu verzichten, sofern die Festigkeit $p \geq 1 \text{ bar}$ (Überdruck) gegeben ist. Diese Empfehlung lässt sich auf Basis der im Rahmen dieses Projektes durchgeführten Versuche ableiten.

Es konnte weiterhin festgestellt werden, dass maximale Explosionsdrücke in Rundschachtelevatoren vermehrt im *Rücklaufschacht* auftreten. In 73 % der durchgeführten Versuche war dies der Fall.

Im Rahmen dieses Projektes konnte kein Einfluss von veränderter Umgebungstemperatur auf den maximalen Explosionsdruck festgestellt 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 [12].

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 *maximalen reduzierten Explosionsdrucks* $p_{red,max}$ an. Die Auslegung von Explosionsdruckentlastungseinrichtungen muss so gestaltet werden, dass der reduzierte Explosionsdruck die Explosionsdruckstoßfestigkeit des zu schützenden Becherelevators nicht überschreitet [10] [12] [13].

Dimensionierungsvorschläge und Auslegungsempfehlungen für Explosionsdruckentlastungseinrichtungen nach [6] und [13] 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 [6] [13].

1.1 Zielsetzung

Das Ziel dieses Forschungsprojektes ist die Untersuchung, ob die in VDI 2263-8.1 und CEN/TR 16829 erstellten Dimensionierungsvorschläge von Druckentlastungsflächen in Kombination mit explosionsdruckstoßfester Bauweise von 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 Explosionsdrucks bei Staubexplosionen in Rundschachtelevatoren im Vergleich zu Rechteckschachtelevatoren auf Grund von veränderter Schachtgeometrie nachweisbar?
3. Sind die aktuell geltenden Auslegungsempfehlungen für Rechteckschachtelevatoren nach VDI 2263-8.1 und CEN/TR 16829 auch für Rundschachtelevatoren ausreichend?

1.2 Lösungsweg

Vorhandene Daten und Messergebnisse zu Explosionsversuchen von Rechteckschachtelevatoren werden gesichtet. Auf Grundlage dieser Daten werden weitere Versuche an einem Rundschachtelevator geplant. Hierfür werden mögliche geeignete Produkte recherchiert und gemäß ihrer Explosionstechnischen Kenngrößen 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 [6] bzw. [13] 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 sowohl durch das sich bewegende Gurtband mit Bechern im Elevator als auch durch vorgelagerte Förderprozesse Produktabrieb. Dieser lagert sich an den innenliegenden Oberflächen ab, wie zum Beispiel an den Elevatorschächten und Bechern. Beim Elevatorleerlauf, also dem An- oder Abfahren des Becherelevators, wird dieser durch das laufende *Becherwerk* aufgewirbelt. Dabei werden bevorzugt kleine Partikeln mit hoher Turbulenz in dem freien Volumen des Becherelevators verteilt und in Schwebelage gehalten.

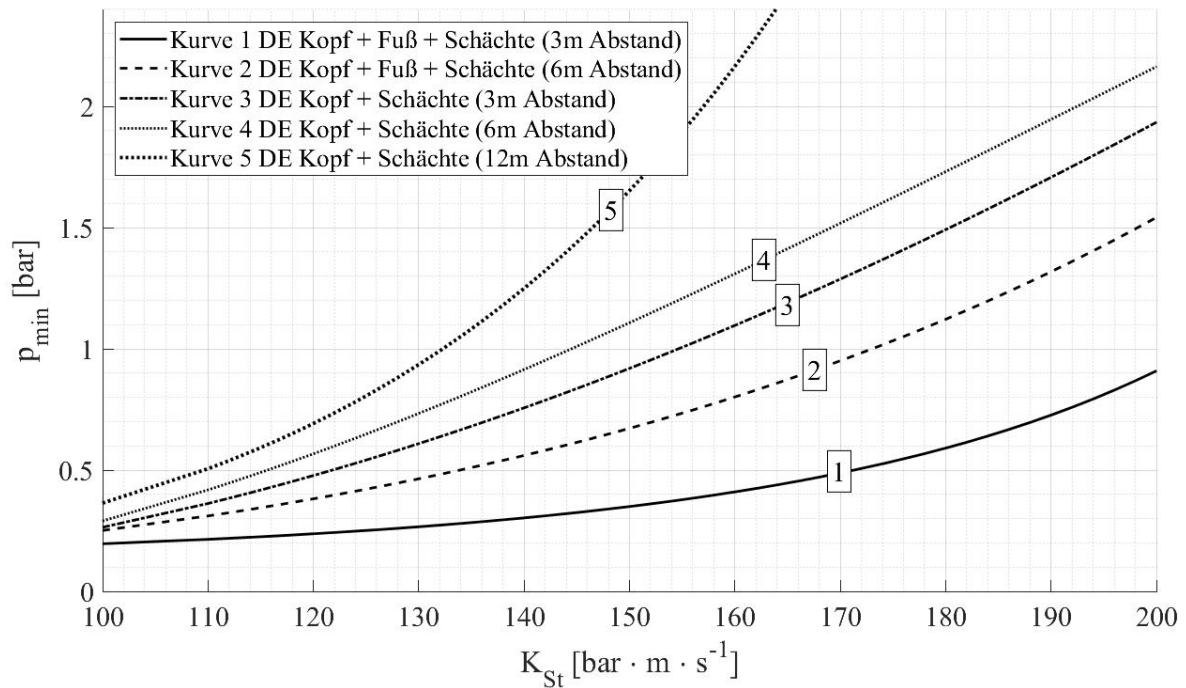


Abbildung 1.1: Erforderliche Mindestfestigkeit p_{\min} eines Rechteckschachtelevators bei explosionsfester Bauweise in Kombination mit Explosionsdruckentlastung [6].

Wird dann eine Zündquelle mit hinreichender Energiemenge aktiv, ist die Gefahr einer Staubexplosion gegeben. Der Elevatorleerlauf begünstigt im Vergleich zum Betrieb mit Schüttgutförderung die Entstehung und Ausbreitung von Staubexplosionen [7] [9].

Deshalb basiert der aktuelle Kenntnisstand zu Explosionsdruckentlastung in Kombination mit explosionsfester Bauweise an Becherelevatoren mit rechteckigen Schächten auf praxisnahen Explosionsversuchen im Realmaßstab, die das An- bzw. Abfahren des Becherelevators simulieren. 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 ausgetragen 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 eines pyrotechnischen Zünders entzündet. Die anschließende Ausbreitung der Explosion innerhalb des Versuchselevators wird messtechnisch erfasst.

Der bei den Versuchen in VDI 2263 8.1 bzw. CEN/TR 16829 zu Grunde liegenden Explosionsversuchen verwendete Versuchselevator mit rechteckigen Schächten 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 Staubungsneigung die für Staubexplosionen kritischen Produktabriebe. Becherelevatoren werden üblicherweise bis zu einem K_{St} -Wert des Produktabriebes von bis zu $K_{St} = 150 \text{ bar} \cdot \text{m}/\text{s}^{-1}$ eingesetzt. Deshalb wurden für diese Explosionsversuche, unter Einbezug von Sicherheiten brennbare Stäube mit einem K_{St} -Wert im Bereich $100 \leq K_{St} \leq 200$ verwendet [6] [9] [13].

Auf Basis der Ergebnisse dieser Explosionsversuche 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} -Werts für die entsprechenden Entlastungsflächenkonfigurationen aufgetragen. Mittels einhüllenden Kurven und unter Berücksichtigung von Sicherheiten, wurden schließlich die in Abbildung 1.1 dargestellten Mindestfestigkeiten p_{\min} für Becherelevatoren mit rechteckigen Schächten in Abhängigkeit vom K_{St} -Wert des entsprechenden Produktes festgelegt. Die in Abbildung 1.1 dargestellten Mindestfestigkeiten für verschiedene Entlastungsflächenkonfigurationen lassen sich durch Formel 1.1 mit den in Tabelle 1.1 dargestellten Koeffizienten beschreiben und gelten ausschließlich für Rechteckschachtelevatoren. Nach aktuellem Stand der Technik ist für Elevatoren mit runden Schächten die nach Formel 1.1 errechnete Mindestfestigkeit zu verdoppeln. [6] [9] [13]

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

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 nach Formel 1.1 in Abbildung 1.1 dargestellten Mindestfestigkeiten für Elevatoren mit rechteckigen Schächten[6].

Kapitel 2

Vorbereitung

Um die in Abschnitt 1.1 dargestellten Fragestellungen beantworten zu können, wurde ein umfangreiches Versuchsprogramm an einem Becherelevator mit runden Schächten auf dem Versuchsgelände der BGN/FSA in Kappelrodeck erarbeitet und durchgeführt. Der verwendete Rundschachtelevator ist dabei, mit Ausnahme der Schächte und der Größe der Entlastungsflächen, identisch zu dem im Vorgängerprojekt verwendeten Becherelevator mit rechteckigen Schächten. Um eine Vergleichbarkeit der Messergebnisse des Rechteckschachtelevators mit den Messergebnissen des Rundschachtelevators bei identischer Versuchsdurchführung gewährleisten zu können, wurde die Größe der Entlastungsflächen des Rundschachtelevators angepasst. Hierfür wurde der Skalierungsfaktor K verwendet, der den Quotienten aus den Schachtquerschnittsflächen von Rund- und Rechteckschachtelevator beschreibt (vgl. Formel 2.1).

Die Schachtquerschnittsfläche des Rundschachtelevators beträgt $A_{S,\text{rund}}=0,155 \text{ m}^2$, und ist um $A_S=0,05 \text{ m}^2$ größer als die des Rechteckschachtelevators ($A_{S,\text{eckig}}=0,105 \text{ m}^2$). Der Quotient dieser Schachtquerschnittsflächen beträgt demnach $K=1,48$.

$$K = \frac{A_{S,\text{rund}}}{A_{S,\text{eckig}}} = 1,48 \quad (2.1)$$

Bei der Planung und Fertigung der runden Elevatorschächte wurden die Entlastungsflächen so gewählt, dass der Quotient der Größen der Entlastungsflächen an dem entsprechenden Ort von Rund- und Rechteckschacht ($A_{E,\text{rund}}/A_{E,\text{eckig}}$) dem Skalierungsfaktor entspricht. Tabelle 2.1 verdeutlicht dies.

Somit sind die Größen der Entlastungsflächen des Rundschachtelevators und die Größen der Entlastungsflächen des Rechteckschachtelevators unter Einbezug der jeweiligen Schachtquerschnittsflächen geometrisch ähnlich. Der Elevatorkopf- und fuß sowie das Becherwerk des Versuchselevators sind bei Rund- und Rechteckschachtelevator identisch. Bei den durchgeführten Versuchen wurde mit Ausnahme der Versuchsreihen A und C Kunststoffbecher verwendet. Die freie Querschnittsfläche des Rundschachtelevators beträgt $A_{F,\text{rund}} = 70,2 \%$ und ist auf Grund der veränderten Schachtgeometrie bei identischem Becherwerk um $14,2 \%$ höher als beim Rechteckschachtelevator ($A_{F,\text{eckig}} = 56,0 \%$). Eine Querschnittszeichnung der Schächte mit allen Abmessungen sowohl

für den Rund- als auch für den Rechteckschacht ist in Abbildung B.1 im Anhang zu finden.

Ort der Entlastungsfläche	$A_{E,rund}$ [m ²]	$A_{E,eckig}$ [m ²]	$A_{E,rund}/A_{E,eckig}$ [-]
Elevatorkopf	0,180	0,102	1,76
Elevatorschächte (jeweils)	0,156	0,105	1,49
Elevatorfuß	0,114	0,073	1,56

Tabelle 2.1: Aufgrund der geometrischen Ähnlichkeit von Rund- und Rechteckschacht verbaute Größen der Entlastungsflächen $A_{E,rund}$ des verwendeten Rundschachtelevators.

2.1 Produktauswahl

Zur Beantwortung der in Abschnitt 1.1 definierten Fragestellungen wurde auf Grundlage von vorhandenen Datensätzen von Explosionsversuchen an Rechteckschachtelevatoren folgende Kriterien für die Auswahl geeigneter Stäube für weitere Untersuchungen am Rundschachtelevator definiert.

- a) K_{St} -Wert im Bereich $100 \text{ bar} \cdot \text{m/s} \leq K_{St} \leq 200 \text{ bar} \cdot \text{m/s}$.
- b) hoher Feinanteil.
- c) Für Produktabriebe in Becherelevatoren repräsentativ.
- d) Stark staubendes Produkt.
- e) Für Mensch und Umwelt unbedenklich.
- f) Benötigte Menge aus einer Produktcharge abgesackt lieferbar.
- g) Produktprobe aus dieser Produktcharge lieferbar.
- h) Vertretbare Kosten.

Auf Grundlage dieser Aspekte sowie Erfahrungswerten wurden folgende Produkte als für Explosionsversuche am Rundschachtelevator und zur Beantwortung der in Abschnitt 1.1 definierten Fragestellungen geeignet eingestuft:

- Weizenmehl
- Malzstaub
- Maisstärke
- Maisstärke (getrocknet)
- Weizenstärke

Von den genannten Produkten wurden, sofern möglich, zunächst Produktproben bestellt und auf ausgewählte Stoffeigenschaften und explosionstechnische Kenngrößen (Partikelgrößenverteilung und K_{St} -Wert bzw. p_{max}) untersucht. Entsprachen diese den zuvor definierten Vorgaben wurde die für Explosionsversuche am Becherelevator benötigte Großmenge beschafft und gemäß Abschnitt 2.2 alle relevanten explosionstechnischen Kenngrößen bestimmt.

2.2 Explosionstechnische Kenngrößen

Zur Einordnung der in Abschnitt 3 beschriebenen Explosionsversuche an einem Rundschachtelevator muss die Vergleichbarkeit der Messergebnisse mit bereits vorhandenen Datensätzen zum Rechteckschachtelevator möglich sein. Als Kriterium hierfür gilt neben einer identischen Versuchsdurchführung und einer vergleichbaren Geometrie der Versuchselevatoren eine vergleichbare Verbrennungsgeschwindigkeit bzw. Heftigkeit der Explosion der verwendeten Stäube unter standardisierten Bedingungen. Als Vergleichsgröße dient hierfür der maximale Explosionsdruck p_{max} und die maximale Druckanstiegsgeschwindigkeit K_{St} des *genormten Musters* (GM). Deren Bestimmung wurde für alle verwendeten Stäube nach [3] bzw. [4] in einer 20 L Laborapparatur durchgeführt. Produktproben, die unverändert zur Kennzahlermittlung herangezogen wurden, werden *Urmuster* (UM) genannt. Die Ergebnisse der Untersuchungen sind in Tabelle 2.2 dargestellt. Weitere explosionstechnische Kenngrößen der verwendeten Stäube wie beispielsweise Mindestzündtemperatur (MZT), Staubungsneigung (S_N) oder Produktfeuchte (F) wurden im Staublabor der BGN/FSA Mannheim bestimmt und sind in Tabelle A.1 im Anhang zu finden. Alle in diesem Projekt angegebenen Ergebnisse beziehen sich, sofern nicht anders angegeben, auf den K_{St} -Wert des genormten Musters bestimmt in der 20L Laborapparatur.

Schüttgut	Versuchsserie	p_{max} [bar]		K_{St} [bar · m/s]	
		GM	UM	GM	UM
Weizenmehl	A	8,2	6,3	117	59
Malzstaub	B	8,7	7,3	184	96
Maisstärke, getr.	C	8,8	8,8	183	183
Malzstaub 4.1	D1, D4, D6, D7, D9	8,5	7,9	143	84
Malzstaub 4.2	D3, D5, D8	8,3	7,2	155	58
Maisstärke, ungetr.	E	8,7	8,1	160	127
Weizenstärke (P20.5)	F	8,2	8,0	145	113
Maisstärke, getr. (P19.1)	G	9,0	9,0	190	190
Malzstaub (P21.1)	H	8,1	7,6	139	90
Weizenstärke (P21.2)	I	8,3	7,5	132	114
Weizenmehl (P20.1)	J	8,1	7,1	121	54

Tabelle 2.2: In der 20L Laborapparatur bestimmter *maximaler Explosionsdruck* p_{max} und K_{St} -Wert aller für Explosionsversuche am Rundschachtelevator verwendeten Stäube.

Kapitel 3

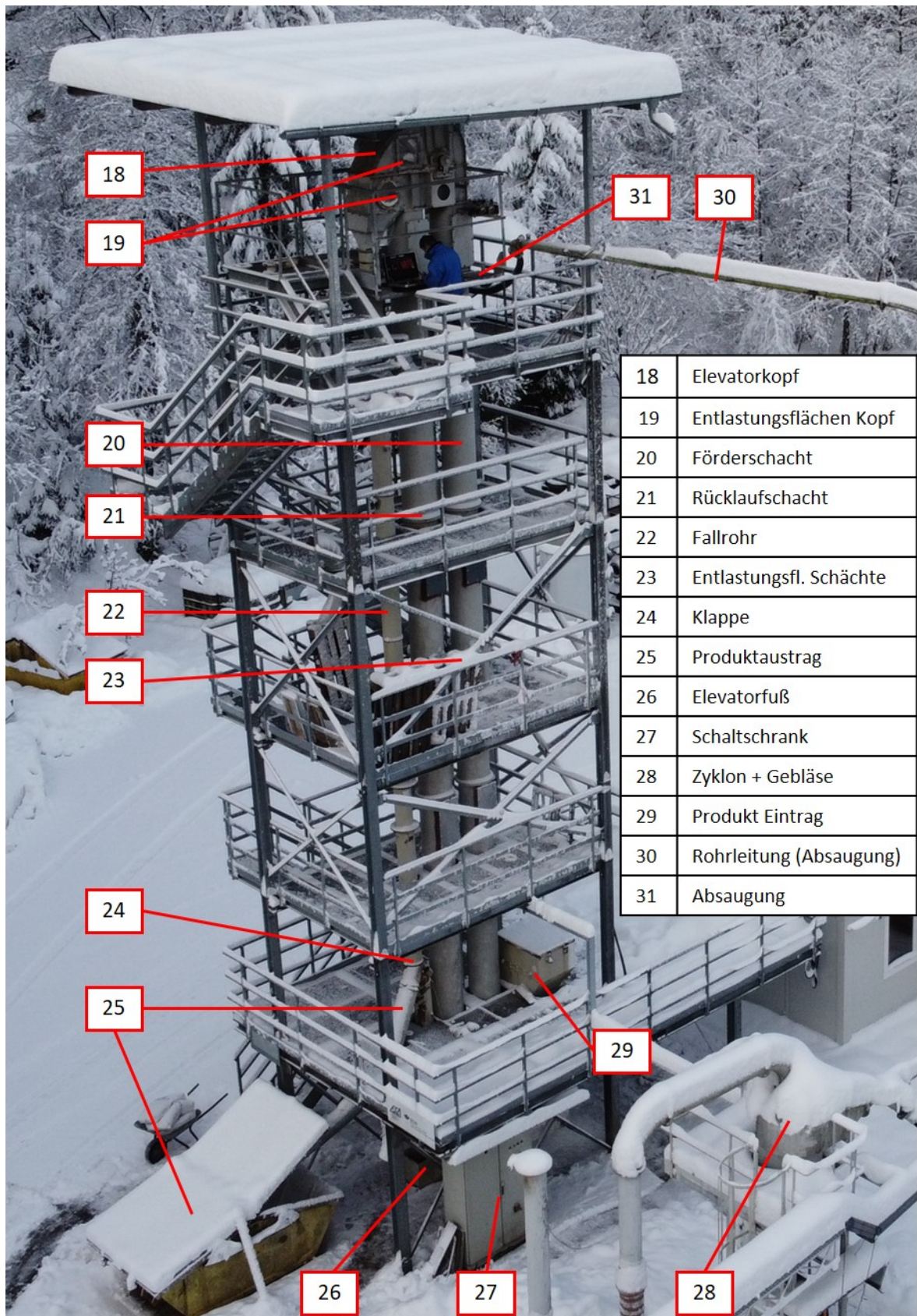
Explosionsversuche am Rundschachtelevator

3.1 Versuchsaufbau

Der Versuchsaufbau zur Durchführung von Explosionsversuchen besteht aus dem in Abbildung 3.1 dargestellten Rundschachtelevator auf dem Versuchsgelände der FSA in Kappelrodeck. Der Versuchsaufbau entspricht, bis auf die Elevatorschächte und die Entlastungsflächen, dem in [9] verwendeten Versuchsaufbau.

Über einen Produkt-Eintrag (29) (vgl. Abbildung 3.1) wird der Versuchselevator chargenweise mit Produkt beaufschlagt. Nachdem das verwendete Produkt eingefüllt wurde, wird dieses 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.

Um Aussagen über das Explosionsgeschehen innerhalb des Versuchselevators machen zu können, wurde dieser mit 13 piezoelektrischen Druckaufnehmern und 14 Flammensensoren ausgestattet. Deren Position und Benennung ist in Abbildung 3.2 dargestellt. Die Bezeichnung „P“ steht dabei für Drucksensoren, mit „F“ sind Flammensensoren bezeichnet. Im *Förderschacht* verbaute Sensoren sind mit ganzen Zahlen nummeriert, Sensoren im *Rücklaufschacht* sind zusätzlich mit der Bezeichnung „,1“ benannt. Die in Abbildung 3.2 bemaßten Positionen der Sensoren beziehen 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 den Sensoren im Elevatorfuß im *Förderschacht*, der Sensor P3.1 dagegen in H= 4 m im *Rücklaufschacht*. 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 Senso-



18	Elevatorkopf
19	Entlastungsflächen Kopf
20	Förderschacht
21	Rücklaufschacht
22	Fallrohr
23	Entlastungsfl. Schächte
24	Klappe
25	Produktaustrag
26	Elevatorfuß
27	Schaltschrank
28	Zyklon + Gebläse
29	Produkt Eintrag
30	Rohrleitung (Absaugung)
31	Absaugung

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

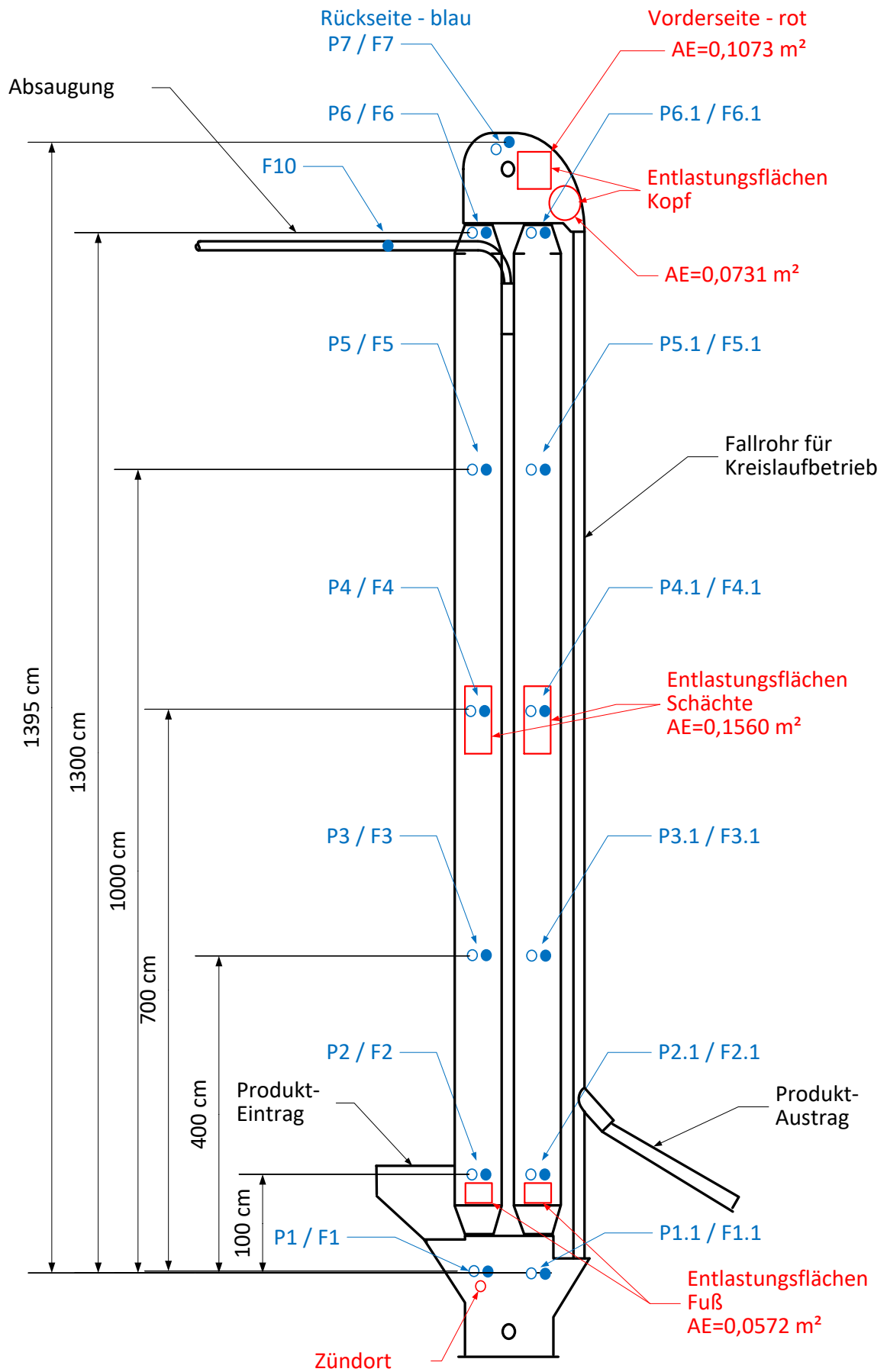


Abbildung 3.2: Skizze des Rundschachtelevators mit *Messpositionen* und Entlastungsflächen. Perspektive: Rückseite.

ren mit Hilfe eines isolierenden Kunststoffadapters (41) am Versuchselevator befestigt. Die Flammensensoren wurden mit einer speziellen Hülse mit integrierter Glaslinse (39) verbaut. Diese Hülse wurde zwischen Versuchselevator und Flammensensor platziert und verhindert ein Verschmutzen der optischen Einheit. Alle Sensoren mit Messposition und zugehöriger Messkette sind in der Messstellenübersicht im Anhang B.3 und B.4 aufgelistet.

Die in Abbildung 3.2 skizzierten Entlastungsflächen sind auf der Elevatorvorderseite verbaut. Der statische Ansprechdruck p_{stat} der Entlastungsflächen wurde mittels PE-Folien realisiert und betrug $p_{\text{stat}}=0,1$ bar. Der statische Ansprechdruck für die Entlastungsflächen in Kombination mit entsprechender Folie wurde durch Versuche der FSA nach der in [5, 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 3.3 Versuchsdurchführung) zu realisieren, konnten die Entlastungsflächen der Elevatorschächte und des Elevatorfußes 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 Gemisch ein Ausbreiten der Staubexplosion in die genannten Anlagenkomponenten.

Die Zündung der explosionsfähigen Atmosphäre innerhalb des Versuchselevators erfolgte mit einem pyrotechnischen Zünder ($E_i = 5$ kJ) am Elevatorfuß. Über einen Messstutzen (36) wurde dieser auf die Elevatorvorderseite in den Elevatorfuß eingebracht. Durch ein Zündgerät (46) konnte der pyrotechnische Zünder mit Spannung beaufschlagt und gezündet werden. 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.

Vor Beginn jeder Versuchsserie oder bei Produktwechsel wurde der Versuchselevator gereinigt. Dies geschah, sofern möglich, durch eine *Nassreinigung*. Da bei einem Versuchsaufbau dieser Größe und Geometrie eine thermische Trocknung mit beispielsweise Heizgebläsen nicht zufriedenstellend realisierbar ist, wurde eine Nassreinigung nur bei geeigneten Wetterbedingungen, welche eine vollständige Trocknung ohne technische Hilfsmittel ermöglichten, durchgeführt.

Nach dem Reinigungsvorgang wurde sowohl bei der Nassreinigung als auch bei der Trockenreinigung ein Referenzzustand für weitere Explosionsversuche hergestellt. Hierfür

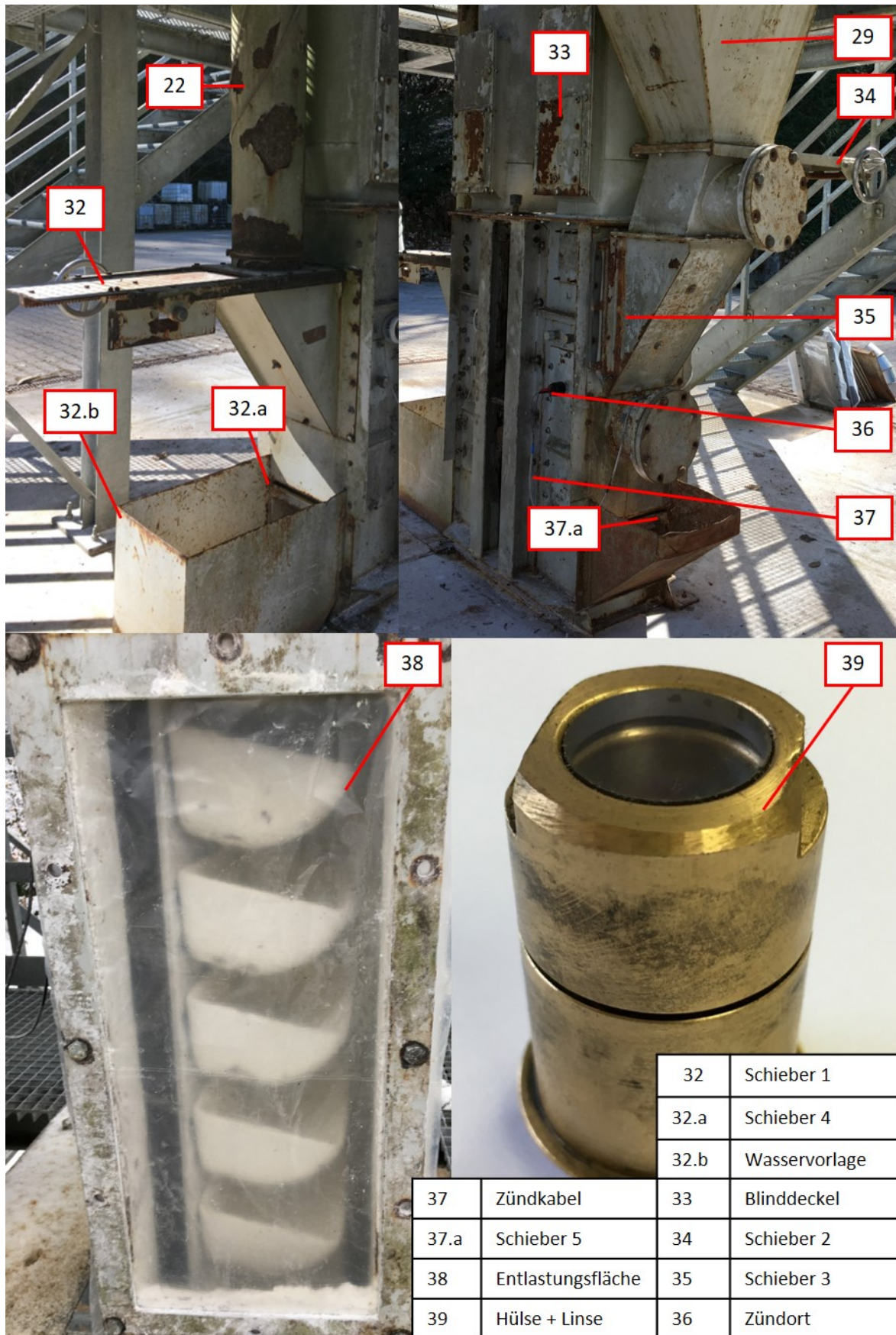
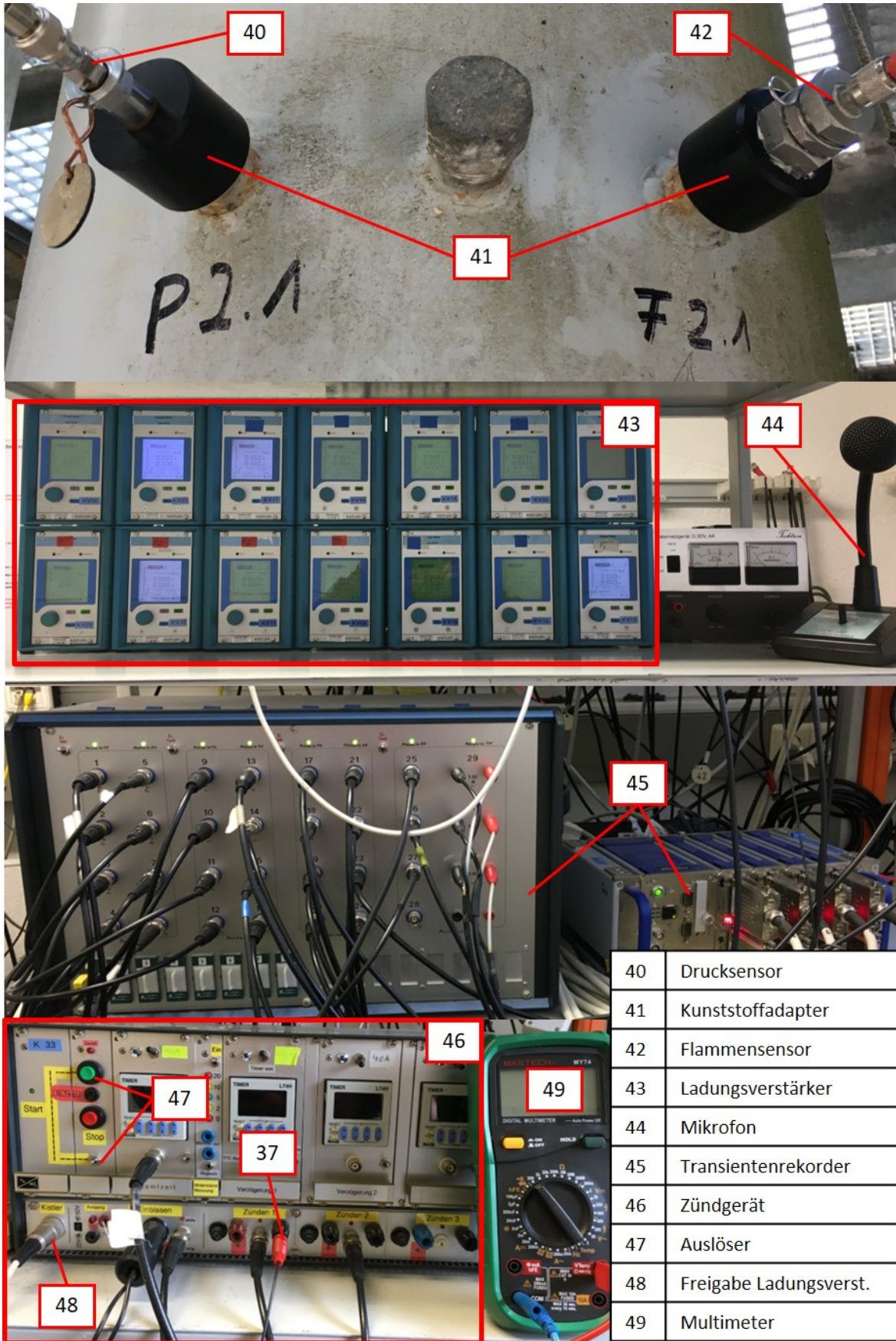


Abbildung 3.3: Oben: Elevatorfuß mit Schiebern und Zündort. Unten links: Mit PE-Folie verschlossene Druckentlastungsfläche (*Elevatorschacht*). Unten rechts: Hülse mit Glaslinse.



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 zunächst ca. 75 kg des neuen Produktes in den Elevatorfuß als Produktgrundlage eingefüllt. Anschließend wird, analog zum generellen Versuchsablauf (vergleiche Abschnitt 3.3) 100 kg Produkt eingefüllt und für 10 Minuten im Kreislauf gefahren. Anschließend wird ein pyrotechnischer Zünder montiert und die entstandene explosionsfähige Atmosphäre nach 50 Sekunden im Leerlaufbetrieb mit Aspiration entzündet. Nach dem

3.2 Versuchsablauf

Die im Rahmen dieses Projektes durchgeführten Versuche entsprechen im Versuchsablauf älteren Versuchen am Rechteckschachtelevator mit Elevatorleerlauf. Analog zu Versuchen am Rechteckschachtelevator (vgl. Abschnitt 1.3), wird der für Staubexplosionen in Becherelevatoren besonders kritische Betriebszustand des Elevatorleerlaufs simuliert. Dabei wird an den Oberflächen innerhalb des Versuchselevators abgelagerter Staub, der im Betriebszustand durch Produktabrieb von groben Schüttgütern entsteht, durch das laufende Becherwerk aufgewirbelt. Bei der Simulation dieses Betriebszustands wurde wie nachfolgend beschrieben 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 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 pyrotechnische Zünder (36) montiert.

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 durch einen pyrotechnischen Zünder mit einem Energieinhalt von $E_i = 5$ kJ im Elevatorfuß entzündet. Die erzeugten Messdaten wurden abgespeichert und nach der in Abschnitt 3.4 beschriebenen Vorgehensweise ausgewertet. Nach einem Zeitraum von $t \approx 10$ min nach der Entzündung wurden Becherwerk und Absaugung aus geschaltet. Der Versuchselevator wurde für weitere Versuche vorbereitet.

3.3 Versuchsdurchführung

Nach der zuvor beschriebenen Vorgehensweise (vgl. Abschnitt 3.2) wurden die in Tabelle 3.1 dargestellten Versuchsserien durchgeführt. Dabei wurden folgende Entlastungsflächenkonfigurationen (DE) berücksichtigt.

DE 1) Druckentlastung an Elevatorkopf, beiden Elevatorschächten und Elevatorfuß.

DE 2) Druckentlastung an Elevatorkopf und beiden Elevatorschächten.

DE 3) Druckentlastung nur am Elevatorkopf.

Auf Grund des hohen zeitlichen und finanziellen Aufwandes der Explosionsversuche wurde die Versuchsanzahl je Parameterkonfiguration auf 2 bis 4 Versuche festgelegt. Zunächst umfasste das Versuchsprogramm die Versuchsserien A bis G und wurde anschließend um die Versuchsserien H bis J erweitert. Die Versuchsserien erstreckten sich auf Grund der begrenzten Kapazitäten der Versuchsanlage über mehrere Jahre. Insgesamt wurden im Rahmen dieses Projektes 66 Explosionsversuche am Rundschaftelevatorschacht nach der in Abschnitt 3.2 beschriebenen Vorgehensweise durchgeführt. Alle Messergebnisse der Explosionsversuche sind in Anhang A.1 bis A.9 zu finden.

DE	Schüttgut	Versuchs- serie	Versuchs- anzahl	Versuche
(1)	Malzstaub	B	2	B1, B2
(1)	getr. Maisstärke	C	3	C1, C2, C3
(1)	Malzstaub 4.1/4.2	D	2	D1, D3
(1)	ungetr. Maisstärke	E	3	E1, E2, E7
(1)	Weizenstärke (P20.5)	F	4	F1, F2, F3, F4
(1)	getr. Maisstärke (P19.1)	G	3	G1, G2, G3
(2)	Weizenmehl	A	2	A1, A2
(2)	Malzstaub	B	2	B3, B4
(2)	getr. Maisstärke	C	3	C4, C5, C6
(2)	Malzstaub 4.1/4.2	D	3	D4, D5, D9
(2)	ungetr. Maisstärke	E	2	E3, E4
(2)	Weizenstärke (P20.5)	F	4	F5, F6, F7, F8
(2)	getr. Maisstärke (P19.1)	G	4	G4, G5, G6, G7
(2)	Malzstaub (P21.1)	H	4	H1, H2, H3, H4
(3)	Weizenmehl	A	2	A3, A4
(3)	Malzstaub	B	3	B5, B6, B7
(3)	Malzstaub 4.1/4.2	D	3	D6, D7, D8
(3)	ungetr. Maisstärke	E	2	E5, E6
(3)	Weizenstärke (P20.5)	F	3	F10, F11, F12
(3)	Malzstaub (P21.1)	H	3	H5, H6, H7
(3)	Weizenstärke (P21.2)	I	3	I1, I2, I3
(3)	Weizenmehl (P20.1)	J	3	J1, J2, J3

Tabelle 3.1: Im Rahmen dieses Projektes durchgeführte Explosionsversuche am Rundschachtelevator.

3.4 Datenauswertung

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

3.4.1 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 unter Einbezug aller Messpositionen
- p_{ex} : maximaler Explosionsdruck einer Versuchsreihe unter Einbezug aller Einzelversuche und Messpositionen.

3.4.2 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 3.5). Einige Flammensensoren, die in geringer Entfernung zum Zündort verbaut sind (z.B. F1-F2, F1.1-F2.1) erfassen die bei der Auslösung des pyrotechnischen Zünders entstandene Flamme und überschritten dadurch eine Spannung von $U \approx 100$ mV. Bei den Sensoren F1 und F1.1 ging oftmals das Messsignal, welches durch die Flamme des pyrotechnischen Zünders erzeugt wurde, ohne Abfall der Spannung in das Messsignal der 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 pyrotechnischen Zünders ebenfalls erfassen, 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 3.5) 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. Δh 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 3.4.1), in die maximale mittlere Flammengeschwindigkeit eines Einzelversuches $\bar{v}_{f,m}$ und die maximale mittlere Flammengeschwindigkeit einer Versuchsreihe $\bar{v}_{f,ex}$ untergliedert.

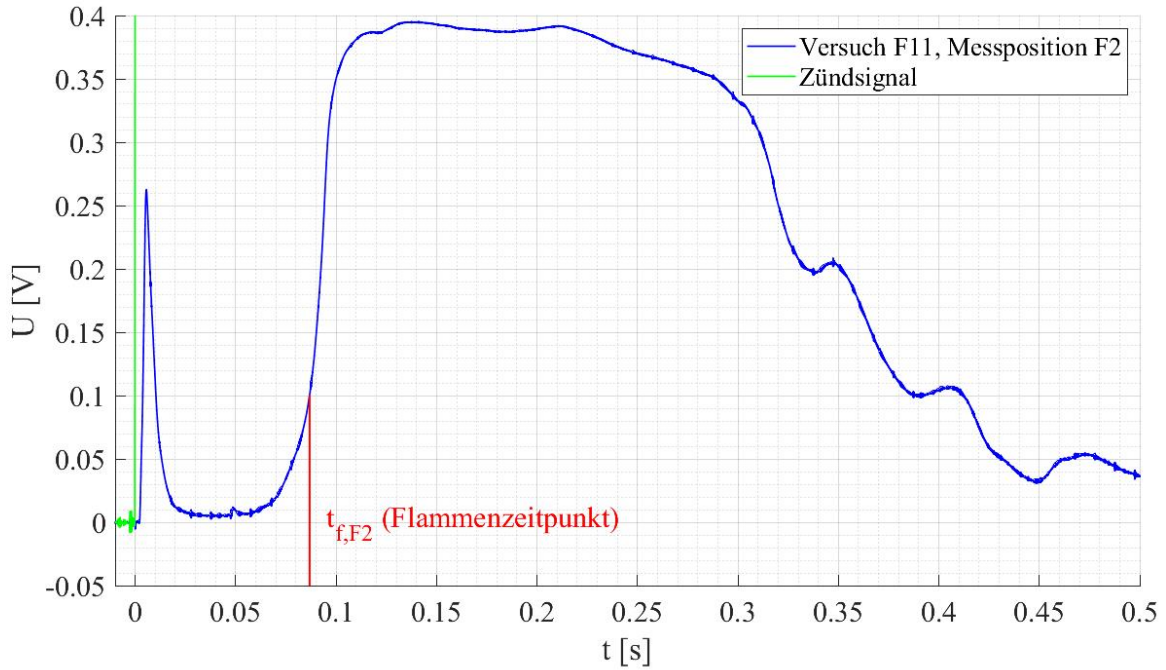


Abbildung 3.5: Exemplarischer gemessener Spannungs-Zeit Verlauf der Messposition F2 einer Weizenstärkeexplosion im Versuchselevator bei Druckentlastung nur am Elevatorkopf.

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

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 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 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) und B) am häufigsten, nämlich in 58 % und 20 % der durchgeführten Versuche auf. Flammenausbreitung C), D) und E) traten jeweils in 8 %, 3 % und 2 % der durchgeführten Versuche auf. Bei 7 Versuchen konnte keine eindeutige Flammenausbreitung identifiziert werden.

Beobachtete Flammenausbreitungen:

- A) Beide Elevatorschächte hinauf, Flamme erlischt nach einigen Metern.
- B) Beide Elevatorschächte hinauf. Flamme erlischt nach einigen Metern im Rücklaufschacht, breitet sich allerdings vom Förderschacht über den Elevatorkopf den Rücklaufschacht herab aus.
- C) Förderschacht hinauf und über den Elevatorkopf den Rücklaufschacht herab.
- 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)	keine Flammenausbreitung oder nicht zuzuordnen
Versuchszahl	37	13	5	2	1	8
Häufigkeit	57 %	20 %	7 %	3 %	2 %	11%

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

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 pyrotechnischen Zünders verursachte Druck- und Flammenfront sich im Versuchselevator ausbreitete. Abbildung 4.1 zeigt exemplarisch für Versuch G4 (Druckentlastung in den Elevatorschächten und am -kopf) 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. Über 2 Sekunden später, also 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 4.2) wird deutlich, dass die Flammenausbreitung nach der Zündung in einer Höhe von 5 Metern in den Schächten unterbrach ($t \approx 0,15$ s) und ca. 2 Sekunden später ($t \approx 2,4$ s) an der Messposition P4.1 fortgesetzt wurde. Die durch die Primärexplosion entstehenden Flammen erloschen also nach wenigen Metern (nach $H = 4$ bis 5 m) in den Schächten breiteten sich dann aber kombiniert mit einer Sekundärexplosion mit geringerem reduzierten Explosionsdruck, 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 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 4.2 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. Zusammengefasst ließ sich beobachten, dass die erzeugte Primärexplosion zum maximalen reduzierten Explosionsdruck führte, die Flammenausbreitung allerdings nach 4 bis 5 Metern, kurz vor den ersten Entlastungsflächen, zum Erliegen kam. Durch die Druckwelle der Primärexplosion wurden alle Entlastungsflächen geöffnet und unverbrannter Staub ausgetragen. Ca. 2 Sekunden später entstand dann in Höhe der ersten Entlastungsflächen eine Sekundärexplosion, welche eine zweite, geringere Druckwelle mit Flammenausbreitung erzeugte und den zuvor ausgetragenen unverbrannten Staub im Außenbereich entzündete. Ähnliche Effekte konnten auch bei den beiden anderen untersuchten Entlastungsflächenkonfigurationen beobachtet werden.

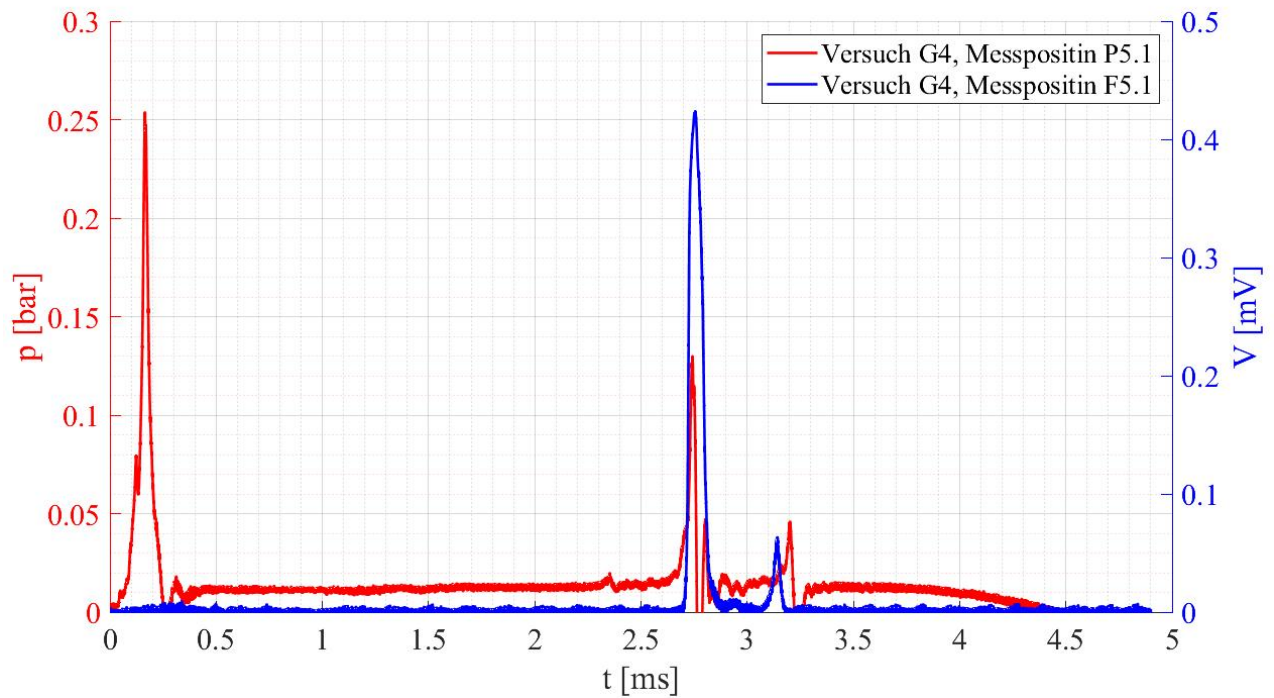


Abbildung 4.1: Bei Versuch G4 an der Messposition P5.1 und F5.1 gemessener Druck-Zeit-Verlauf und Spannungs-Zeit-Verlauf.

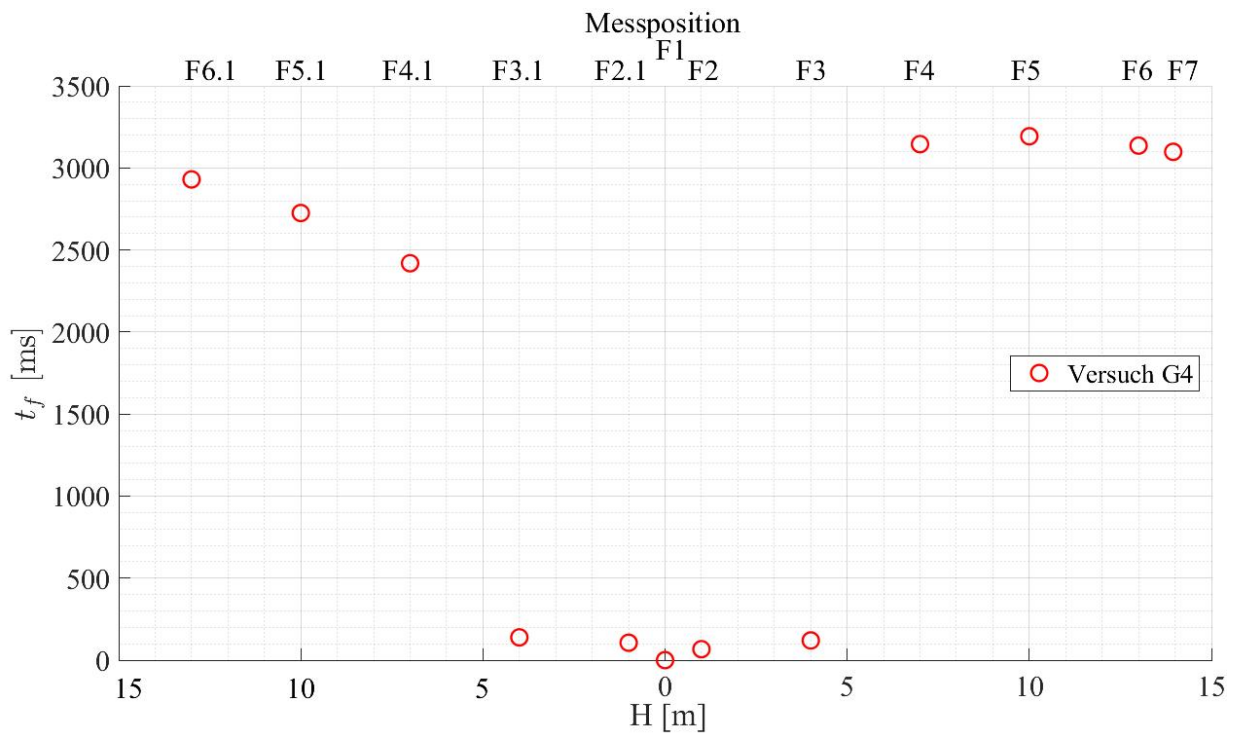


Abbildung 4.2: Bei Versuch G4 bestimmte Flammenlaufzeiten t_f in Abhängigkeit von der Messposition.



Abbildung 4.3: Ausschnitt der bei Versuch G4 erstellten Videosequenz zum Zeitpunkt $t= 0,2$ s (Primärexplosion) und $t= 2,7$ s (Sekundärexplosion) nach der Zündung.

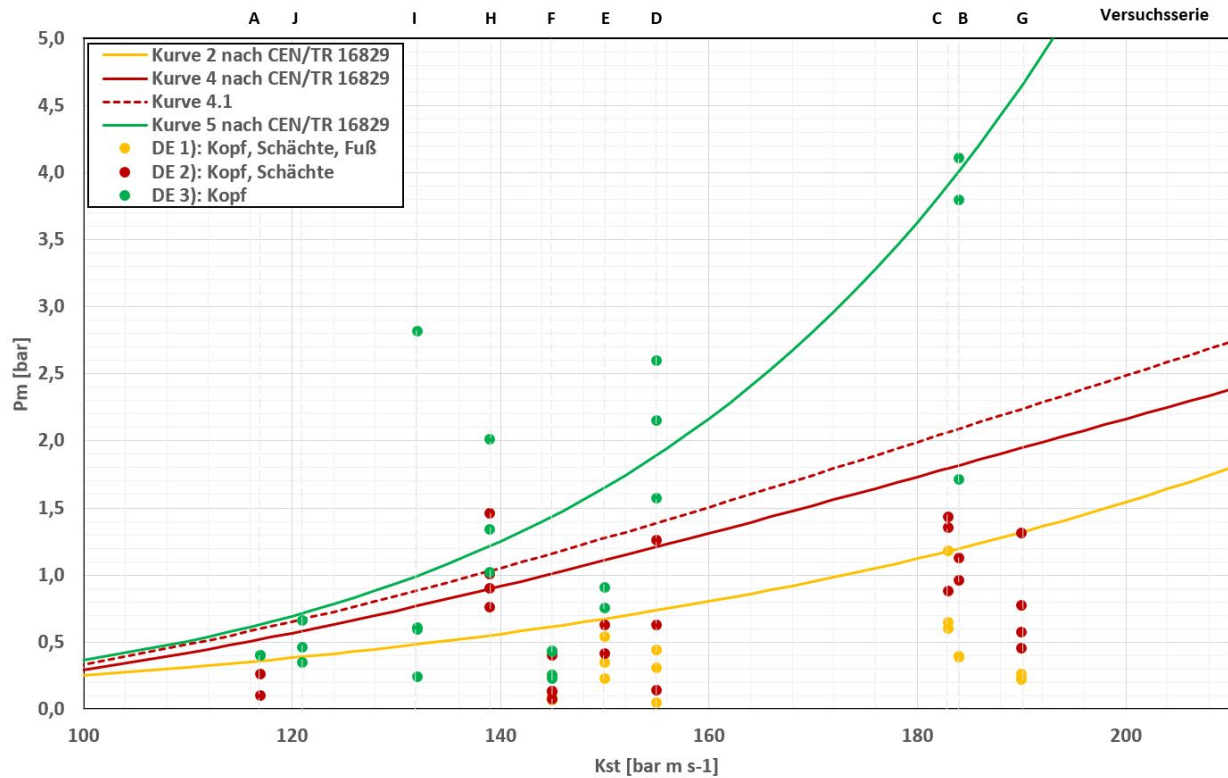


Abbildung 4.4: Maximaler Explosionsdruck p_m der Versuchsserien A bis J in Abhängigkeit vom K_{St} -Wert (GM) der verwendeten Produkte, sowie die in CEN/TR 16829 empfohlenen Mindestfestigkeiten von Becherelevatoren mit rechteckigen Schächten bei entsprechender Entlastungsflächenkonfiguration (Kurven 2, 4 und 5) [6].

4.2 Maximaler Explosionsdruck

Zur Einordnung der während der durchgeführten Versuche auftretenden Überdrücke wurden die nach Abschnitt 3.4.1 definierten maximalen Explosionsdrücke verwendet.

Abbildung 4.4 zeigt die maximalen Explosionsdrücke p_m aller durchgeführten Einzelversuche in Abhängigkeit des K_{St} -Wertes der entsprechenden Produkte. Des Weiteren sind die nach CEN/TR 16829 empfohlenen Mindestfestigkeiten von Becherelevatoren mit rechteckigen Schächten (Kurven 2, 4 und 5) ebenfalls in Abhängigkeit des K_{St} -Wertes dargestellt. Die Kurven 2, 4 und 5 geben verschiedene Entlastungsflächenkonfigurationen wieder. Hierbei gilt:

- Kurve 2 - entspricht DE 1): Druckentlastung an Elevatorkopf, -schächten und -fuß (Einbauabstand der Entlastungsflächen in den Schächten: 6 m).
- Kurve 4 - entspricht DE 2): Druckentlastung an Elevatorkopf und -schächten (Einbauabstand der Entlastungsflächen in den Schächten: 6 m).
- Kurve 5 - entspricht DE 3): Druckentlastung ausschließlich am Elevatorkopf (Einbauabstand der Entlastungsflächen in den Schächten: 12 m oder Druckentlastung ausschließlich am Elevatorkopf mit einer maximalen Schachtlänge von 12 m).

Die in Abbildung 4.4 dargestellten Werte sind zusätzlich in Tabelle A.2 und A.3 im Anhang aufgelistet. Die in den Tabellen A.2/A.3 in Spalte 7 dargestellte Mindestfest-

festigkeit von Rechteckschachtelevatoren p_{min} wurden nach Formel 1.1 in Abschnitt 1.3 bestimmt. Hierfür wurde für den in Spalte 4 gezeigten K_{st} -Wert des verwendeten Staubes die nach CEN/TR 16829 empfohlene Mindestfestigkeit bei entsprechender Druckentlastungsflächenkonfigurationen berechnet. Die in Formel 1.1 benötigten Koeffizienten wurden Tabelle 1.1 entnommen.

Betrachtet man die in Abbildung 4.4 gelb dargestellten Ergebnisse bei Druckentlastung am Elevatorkopf, den Elevatorschächten und dem Elevatorfuß (DE 1) ist erkennbar, dass die maximalen Explosionsdrücke p_m am Rundschachtelevator die empfohlenen Mindestfestigkeiten von Rechteckschachtelevatoren (Kurve 2 nach CEN/TR 16829) nicht überschreiten. Die nach CEN/TR 16829 empfohlenen Mindestfestigkeiten sind bei dieser Anordnung der Entlastungsflächen und bei dem untersuchten Bereich des K_{st} -Wert auch für Rundschachtelevatoren ausreichend.

Bei Entlastungsflächenkonfiguration 2) (rote Datenpunkte, bzw. rote Kurve) überschreiten unter Einbezug der Messunsicherheit zwei Messwerte deutlich (Versuch H1 und H3 mit Malzstaub) und ein Versuch geringfügig (Versuch D9 mit Malzstaub) p_{min} für Rechteckschachtelevatoren. Die Überschreitung von p_{min} beträgt hierbei im Einzelfall bei Versuch H1 bis zu 63% . Unter Berücksichtigung dieser Werte kann die Anwendbarkeit von Kurve 4 nach CEN/TR 16829 auf Rundschachtelevatoren zunächst nicht bestätigt werden. Es wird deshalb empfohlen, bei Rundschachtelevatoren die Festigkeiten bei dieser Entlastungsflächenkonfiguration um mindestens 15 % zu erhöhen (rot gestrichelte Kurve). Dies deckt unter Einbezug der Messunsicherheit das beobachtete Überschreiten von p_{min} am Rundschacht weitestgehend ab. Lediglich ein Messwert (Versuch H1 mit Malzstaub) übersteigt dann die empfohlenen Mindestfestigkeiten. Es ist anzumerken, dass die Versuchsreihe H und speziell der Messwert H1 kritisch hinterfragt werden müssen. Wie in Abbildung 4.4 deutlich zu erkennen, sind die gemessenen reduzierten Explosionsdrücke von Versuchsreihe H trotz des vermeintlich geringen K_{st} -Wert des Staubes von $K_{st} = 138 \text{ bar} \cdot \frac{m}{s}$ vergleichsweise hoch. Es wurden weitere 5 Versuchsreihen mit insgesamt 14 Versuchen mit Stäuben mit teilweise deutlich höheren K_{st} -Werten durchgeführt, die zu geringeren reduzierten Explosionsdrücken im Vergleich zu Versuchsreihe H führten. Diese Versuche unterschritten in 13 Fällen die empfohlenen Mindestfestigkeiten für Rechteckschachtelevatoren. Zum gegenwärtigen Zeitpunkt wurde keine Erklärung dafür gefunden, warum Versuchsreihe H und speziell Versuch H1 zu vergleichsweise hohen reduzierten Explosionsdrücken führte.

Bei Entlastungsflächenkonfiguration 3) (grüne Datenpunkte, bzw. grüne Kurve), also Druckentlastung ausschließlich am Elevatorkopf bzw. Druckentlastung in den Schächten mit Abständen von 12 m, überschreiten 6 Messwerte teilweise erheblich die empfohlenen Mindestfestigkeiten von Rechteckschachtelevatoren. Betracht man diese in Tabelle 4.2 nochmals detailliert dargestellten Messwerte, ist erkennbar, dass der am Rundschachtelevator gemessene Explosionsdruck p_m die Mindestfestigkeit für Rechteckschachtelevatoren bei dieser Entlastungsflächenkonfiguration um bis zu 184 % übersteigt. Dies wurde sowohl für Malzstaub als auch für Weizenstärke in einem Bereich des K_{st} -Wertes des Staubes von $120 < K_{st} < 190$ beobachtet. Auf Grund der Anzahl und der Höhe der Überschreitung von p_{min} muss die Anwendbarkeit von Kurve 5 für Rechteckschachtelevatoren nach CEN/TR 16829 auf Rundschachtelevatoren bei Stäuben mit K_{st} -Werten größer $120 \text{ bar} \cdot \frac{m}{s}$ klar angezweifelt werden. Es wurde beobachtet, dass eine

DE	Versuch	Kst [$\frac{\text{bar} \cdot \text{m}}{\text{s}}$]	p_m [bar]	Messort [-]	p_{min} [bar]	$p_m - p_{min}$ [bar]	$\frac{p_m - p_{min}}{p_{min}}$ [% von p_{min}]
2) Kopf, Schächte	H1	139	1,46	P3.1	0,90	0,56	63
2) Kopf, Schächte	H3	139	1,01	P3.1	0,90	0,11	12
2) Kopf, Schächte	D9	155	1,26	P2.1	1,21	0,05	4
3) Kopf	B7	184	4,11	P6.1	4,01	0,10	2
3) Kopf	D6	155	2,60	P3;P4	1,89	0,71	37
3) Kopf	D7	155	2,15	P5.1	1,89	0,26	14
3) Kopf	H5	139	2,02	P5.1	1,21	0,81	66
3) Kopf	H6	139	1,34	P1.1	1,21	0,13	10
3) Kopf	I1	132	2,82	P5.1	0,99	1,83	184

Tabelle 4.2: Auflistung aller Versuche deren Explosionsdruck p_m die geltenden Mindestfestigkeiten für Rechteckschachtelevatoren p_{min} überschreitet.

erhöhte freie Querschnittsfläche des Runderlevators im Vergleich zum Rechteckschachtelevator in Kombination mit Stäuben mit K_{St} -Werten größer $120 \text{ bar} \cdot \frac{\text{m}}{\text{s}}$ bei einem Abstand der Entlastungsflächen von 12 Metern zu heftigen Explosionsabläufen und in in Folge dessen zu hohen reduzierten Explosionsdrücken führen kann. Die reduzierten Explosionsüberdrücke überschritten deutlich die empfohlenen Mindestfestigkeiten für Rechteckschachtelevatoren.

Besonders auffällig ist Versuch I1 mit Weizenstärke, bei dem ein unerwartet hoher Explosionsüberdruck von $p_m = 2,8 \text{ bar}$ gemessen wurde. Dieser liegt mindestens um den Faktor 4,2 höher als die vergleichbaren restlichen Versuche mit Weizenstärke und übersteigt um $\Delta p = 1,8 \text{ bar}$ die empfohlene Mindestfestigkeit von Rechteckschachtelevatoren bei diesem K_{St} -Wert. Dieser vergleichsweise heftige Explosionsverlauf mit Weizenstärke konnte nicht reproduziert werden (Es wurden insgesamt 6 Explosionsversuche bei diesen Bedingungen durchgeführt). Die Ursache für diesen besonders heftigen Explosionsablauf ist aktuell nicht bekannt. Auffällig ist, dass bei dieser Druckentlastungsflächenkonfiguration (DE nur am Kopf) auch bei anderen Stäuben (oftmals Malzstaub) bei einigen wenigen Versuchen deutlich erhöhte Überdrücke gemessen wurden.

Es wurde beobachtet, dass bei einzelnen Versuchen die gemessenen maximalen Explosionsüberdrücke im Vergleich zu den übrigen Versuchen der Versuchsreihe aus bisher unbekanntem Gründen besonders hoch waren. Eine mögliche Ursache könnte sein, dass bei idealen Bedingungen zum Zündzeitpunkt (ideale Staubkonzentration, hohe Turbulenz, hoher Sauerstoffanteil) eine Art „Durchzünden“ stattfindet, bei dem die Reaktionsgeschwindigkeit der Deflagration auf Grund der idealen Anfangsbedingungen in Kombination mit einer erhöhten freien Querschnittsfläche und langem Laufweg bis zur ersten Druckentlastung besonders stark beschleunigt. Die Konsequenz daraus wäre eine deutlich höhere Flammengeschwindigkeiten und höhere Explosionsdrücke im Versuchselevator. Dieses Phänomen, welches nur sporadisch auftritt, nicht reproduziert werden konnte und vermutlich von einer Vielzahl von Parametern zum Zündzeitpunkt abhängt, ist vermutlich mit ein Grund für die außergewöhnlich hohe Streuung der Messwerte bei dieser Entlastungsflächenkonfiguration. Dieses Phänomen ist in den folgenden Abbildungen dargestellt. Die beiden Abbildungen 4.5 und 4.6 zeigen exemplarisch die

während Versuch B7 gemessenen Druck/Zeit- und Spannungs/Zeitverläufe aller Messpositionen. Versuch B7 ist eine Malzstaubexplosion mit Druckentlastung ausschließlich am Elevatorkopf. Bei Versuch B7 wurden die im Rahmen dieses Projektes höchsten reduzierten Explosionsdrücke von bis zu 4,11 bar im Rücklaufschacht gemessen. In den beiden Abbildungen 4.5 und 4.6 ist deutlich zu erkennen, wie sich die Flammengeschwindigkeiten mit zunehmender Schachtlänge erhöhen. Besonders im Rücklaufschacht (siehe Abbildung 4.6 ist eine sehr deutliche Flammenbeschleunigung zu beobachten. Erkennbar ist dies an den sehr klaren Flanken der Spannungs/Zeitverläufe der Flammensensoren F4.1 bis F6.1 im Rücklaufschacht, sowie an den sich deutlich verkürzenden Zeitintervallen zwischen den ansteigenden Flanken dieser Messpositionen. Die Flammenbeschleunigung im Rücklaufschacht ist so stark, dass an Messposition 6.1 im Rücklaufschacht der maximale Explosionsdruck sowie die Flammenfront zeitgleich auftreten.

Diesen erhöhten reduzierten Explosionsüberdrücken kann mit einer erhöhten Festigkeit des gesamten Elevatorgehäuses entgegnet werden. Die Richtlinie VDI 2263 Blatt 8.1 gibt hierzu an:

"Besitzt der Becherelevator runde Schächte, so ist die freie Querschnittsfläche im Inneren wesentlich größer als im Falle rechteckiger Schächte. Es können dadurch erheblich höhere Flammengeschwindigkeiten und in der Folge höhere Explosionsdrücke auftreten. In diesem Fall sollte die Explosionsfestigkeit des gesamten Gehäuses einschließlich Elevatorfuß und -kopf [...] mindestens verdoppelt werden." [13]

Überträgt man diese Anforderung auf die grüne Datenkurve (Druckentlastung am Elevatorkopf oder in den -schächten im Abstand von 12 m), würden alle Messwerte mit Ausnahme des Messwertes von Versuch I1 unterhalb dieser Kurve liegen. Es würden sich sehr hohe notwendige Festigkeiten ergeben. Ungeachtet der Wirtschaftlichkeit dieser Maßnahme wird die Anwendung von Kurve 5 für Rundschachtelevatoren nach VDI 2263 8.1 bzw. CEN/TR 16829 mit Verdopplung der Festigkeit dennoch nicht empfohlen. Grund hierfür ist die hohe Streuung der Messwerte bei dieser Entlastungsflächenkonfiguration, sowie das zuvor beschriebene Phänomen des "Durchzündens". Auf Grund dieser beiden Aspekte kann auf Grundlage der aktuellen Datenlage keine belastbare Empfehlung für diese Entlastungsflächenkonfiguration ausgesprochen werden. Die Anwendung von Kurve 5 nach CEN/TR 16829 auf Rundschachtelevatoren wird deshalb nicht empfohlen.

Es wird deutlich, dass sich eine erhöhte freie Querschnittsfläche des Rundschachtelevators von 14 % im Vergleich zum Rechteckschacht mit zunehmendem Abstand der Entlastungsflächen in einem erhöhten maximalen Explosionsdruck äußern kann. Bei Entlastungsflächenkonfiguration 2) ist die Erhöhung von p_m vergleichsweise gering. Bei Entlastungsflächenkonfiguration 3) können bei Stäuben mit einem K_{St} -Wert ≥ 120 bar·m·s⁻¹ durch die erhöhte freie Querschnittsfläche am Rundschachtelevator Explosionsdrücke entstehen, welche diejenigen am Rechteckschacht erheblich überschreiten. Eine im Vergleich zum Rechteckschacht begünstigte Ausbreitung der Explosion, bedingt durch das erhöhte freie Volumen, äußert sich zunehmend stark mit erhöhten Abständen der Druckentlastungsflächen. Schachtlängen von 12m bis zur ersten Druckentlastung ermöglichen eine erhebliche Beschleunigung des Verbrennungsvorganges und damit erhöhte Explosionsdrücke im Gesamtsystem im Vergleich zum Rechteckschacht.

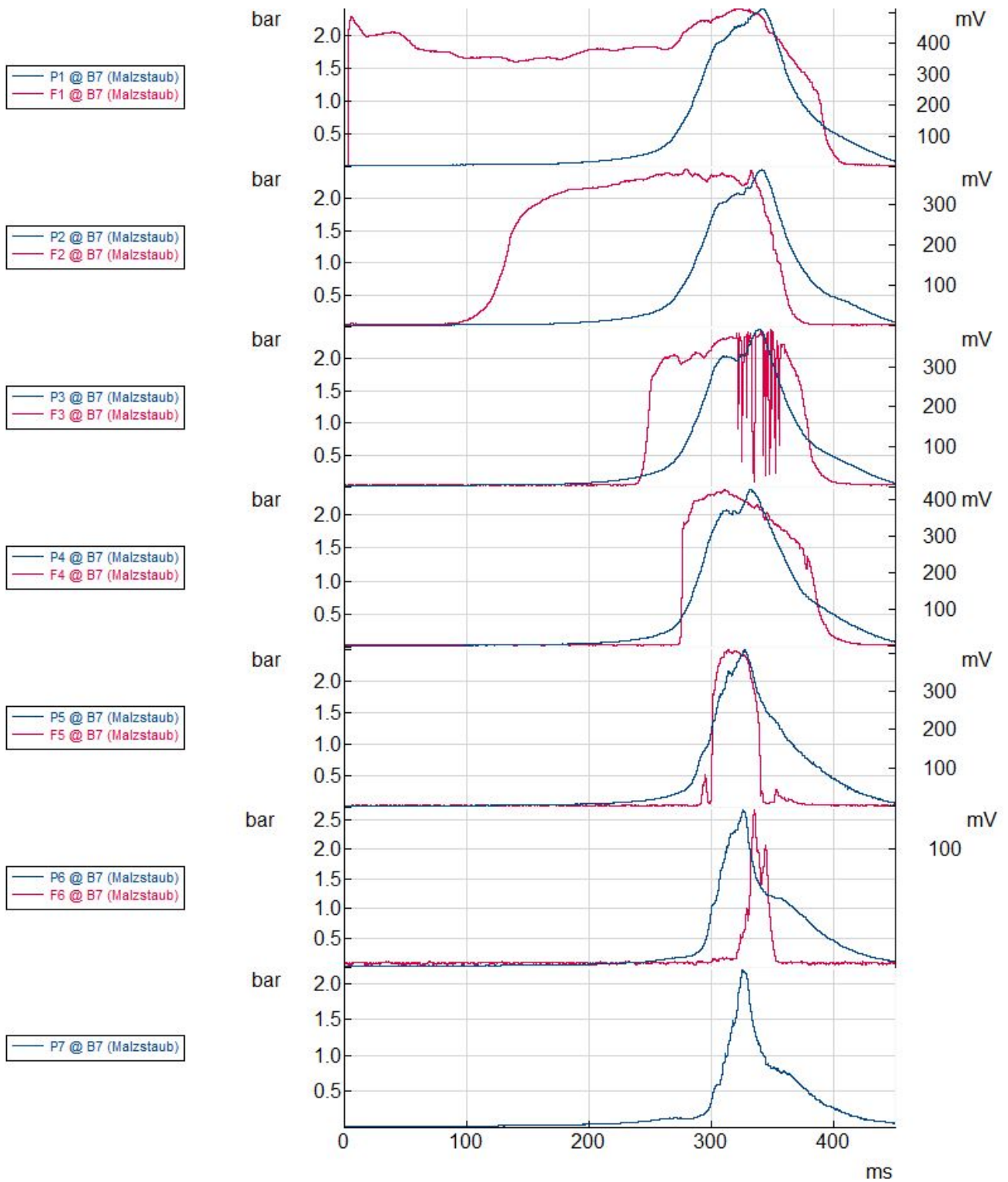


Abbildung 4.5: Bei dem Versuch B7 (DE am Elevatorkopf) mit Malzstaub gemessenen Druck- und Flammensignale im Förderschacht in aufsteigender Reihenfolge (Elevatorfuß bis -kopf). Blaue Linien: Druck/Zeitverläufe, rote Linien: Spannungs/Zeitverläufe der Flammensensoren.

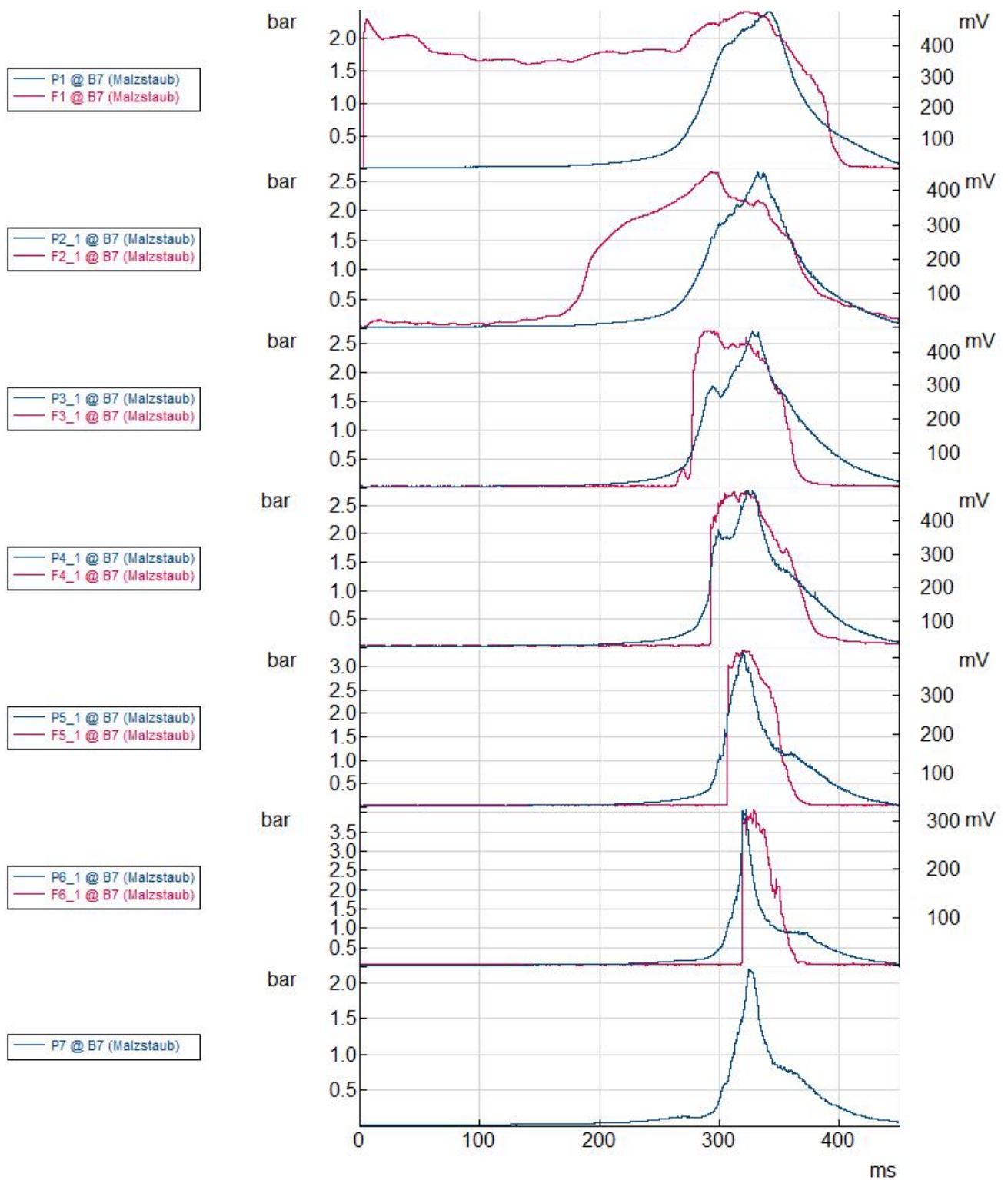


Abbildung 4.6: Bei dem Versuch B7 (DE am Elevatorkopf) mit Malzstaub gemessenen Druck- und Flammensignale im Rücklaufschacht in aufsteigender Reihenfolge (Elevatorfuß bis -kopf). Blaue Linien: Druck/Zeitverläufe, rote Linien: Spannungs/Zeitverläufe der Flammensensoren.

Für die Auslegung von Druckentlastungsflächen an Rundschachtelevatoren wird deshalb folgendes empfohlen:

1. Keine Anwendung von Kurve 5 nach CEN/TR 16829.
2. Anwendung von Kurve 4 nach CEN/TR 16829 mit Erhöhung von p_{min} um 15 %.
3. Anwendung von Kurve 2 nach CEN/TR 16829 ohne Einschränkung.

Die Empfehlungen gelten unter folgenden Randbedingungen:

- Zündortlage im Elevator (kein Eintrag von Explosionen aus angeschlossenen Anlagenteilen)
- organische Stäube
- maximaler Explosionsüberdruck der Stäube $p_{max} \leq 10$ bar
- runder Schachtquerschnitt
- freie Fläche bezogen auf den Schachtquerschnitt ≤ 70 %
- Becherabstand ≤ 280 mm mit $K_{St} \leq 150$ bar·m·s⁻¹
- Becherabstand ≤ 140 mm mit $K_{St} \leq 210$ bar·m·s⁻¹
- Material der Förderbecher: Kunststoff oder Metall
- jede Druckentlastungsfläche \geq Schachtquerschnittsfläche
- statischer Ansprechüberdruck der Druckentlastungseinrichtung $p_{stat} \leq 0,1$ bar
- freie Explosionsdruckentlastung ohne Abblasrohre
- Druckentlastungsfähigkeit der Entlastungseinrichtung $EF = 1$

4.2.1 maximaler Explosionsdruck ohne Entlastungsflächen

In der aktuellen Richtlinie VDI 2263 8.1 zu Becherelevatoren findet sich folgender Abschnitt:

Bei Schüttgütern, deren Feinstaubanteile K_{St} -Werte ≤ 100 bar · m/s aufweisen, kann unabhängig von der Länge des Elevators auf die Druckentlastung verzichtet werden, wenn eine ausreichende Explosionsfestigkeit von $p \geq 1$ bar (Überdruck) gegeben ist. [13]

Diese Aussage basiert auf den im Rahmen des Projektes F-05-0701 der FSA durchgeführten Explosionsversuchen mit Weizenmehl an einem Rechteckschachtelevator. Dabei wurden Versuche ohne Druckentlastungsflächen durchgeführt. Die Ergebnisse wurden anschließend mit identisch durchgeführten Versuchen, allerdings mit der Verwendung

von Druckentlastung am Elevatorkopf, verglichen. Es wurde deutlich, dass im Rahmen der Messunsicherheit keine erhöhte Flammengeschwindigkeit im Vergleich zu identisch durchgeführten Versuchen mit Druckentlastung am Elevatorkopf auftrat. Weiterhin wurde deutlich, dass unabhängig von der Druckentlastungsfläche im Elevatorkopf keine Beschleunigung der Flammenfront über die ersten wenigen Meter der Elevatorschächte hinaus und keine erhöhten Explosionsüberdrücke bei Elevatoren ohne Druckentlastung zu beobachten sind. Es kann daher unabhängig der Elevatorlänge auf Druckentlastungen in Rechteckschachtelevatoren verzichtet werden kann, wenn der Abrieb des geförderten Produktes einen K_{St} - Wert von $K_{St} \leq 100 \text{ bar}\cdot\text{m/s}$ aufweist.

Vergleicht man diese Versuchsergebnisse nun mit den aktuellen Ergebnissen von Explosionsversuchen mit Weizenmehl am Rundschachtelevator mit Druckentlastung im Elevatorkopf ist erkennbar, dass trotz einer erhöhten freien Querschnittfläche des Rundschachtelevators bei diesen Versuchen keine erhöhte Flammengeschwindigkeit oder erhöhter reduzierter Explosionsüberdruck im Vergleich zum Rechteckschachtelevator auftritt. Außerdem ist zu beobachten, dass analog zu den Ergebnissen am Rechteckschachtelevator, bei Weizenmehl keine erhebliche Beschleunigung der Flammenfront innerhalb der ersten 5 Meter des Versuchselevators zu beobachten ist. Die maximalen Explosionsdrücke treten analog zum Rechteckschachtelevator in diesem Bereich auf. Dies wurde bei beiden Versuchsreihen mit Weizenmehl (A und J) am Rundschachtelevator beobachtet. Auf Grund der vorliegenden Daten ist zu erwarten, dass auch bei geschlossenem Rundschachtelevator bei geförderten Produkten mit einem K_{St} - Wert des Produktabriebes von $K_{St} \leq 100 \text{ bar}\cdot\text{m/s}$ keine signifikant höheren Explosionsüberdrücke auftreten. Aus diesem Grund wurde im Rahmen dieses Projektes auf weitere Versuche am geschlossenen Versuchselevator mit Weizenmehl verzichtet.

Es kann deshalb empfohlen werden, dass auch bei Rundschachtelevatoren in denen Produkte gefördert werden, deren Abriebstaub einen K_{St} - Wert von $K_{St} \leq 100 \text{ bar}\cdot\text{m/s}$ aufweist unabhängig von der Elevatorlänge auf Druckentlastungsflächen verzichtet werden kann sofern die Festigkeit $p \geq 1 \text{ bar}$ (Überdruck) gegeben ist.

4.2.2 Ort des maximalen Explosionsdrucks

Betrachtet man den Ort bzw. die Messposition, an welcher der maximale Explosionsdruck p_m auftritt, ist unabhängig von der Entlastungsflächenkonfiguration ein erhöhtes Auftreten von p_m im Rücklaufschacht zu beobachten. Abbildung 4.7 verdeutlicht dies grafisch. Hier sind alle am Rundschachtelevator gemessenen maximalen Explosionsdrücke p_m in Abhängigkeit der Messposition und der Entlastungsflächenkonfiguration dargestellt. Es ist erkennbar, dass p_m im überwiegenden Teil der Versuche in den Elevatorschächten und hier hauptsächlich im Rücklaufschacht gemessen wurde. In 73 % der durchgeführten Versuche trat p_m im Rücklaufschacht, in 12 % der Versuche im Förderschacht und in 15 % der Versuche im Elevatorfuß oder -kopf auf.

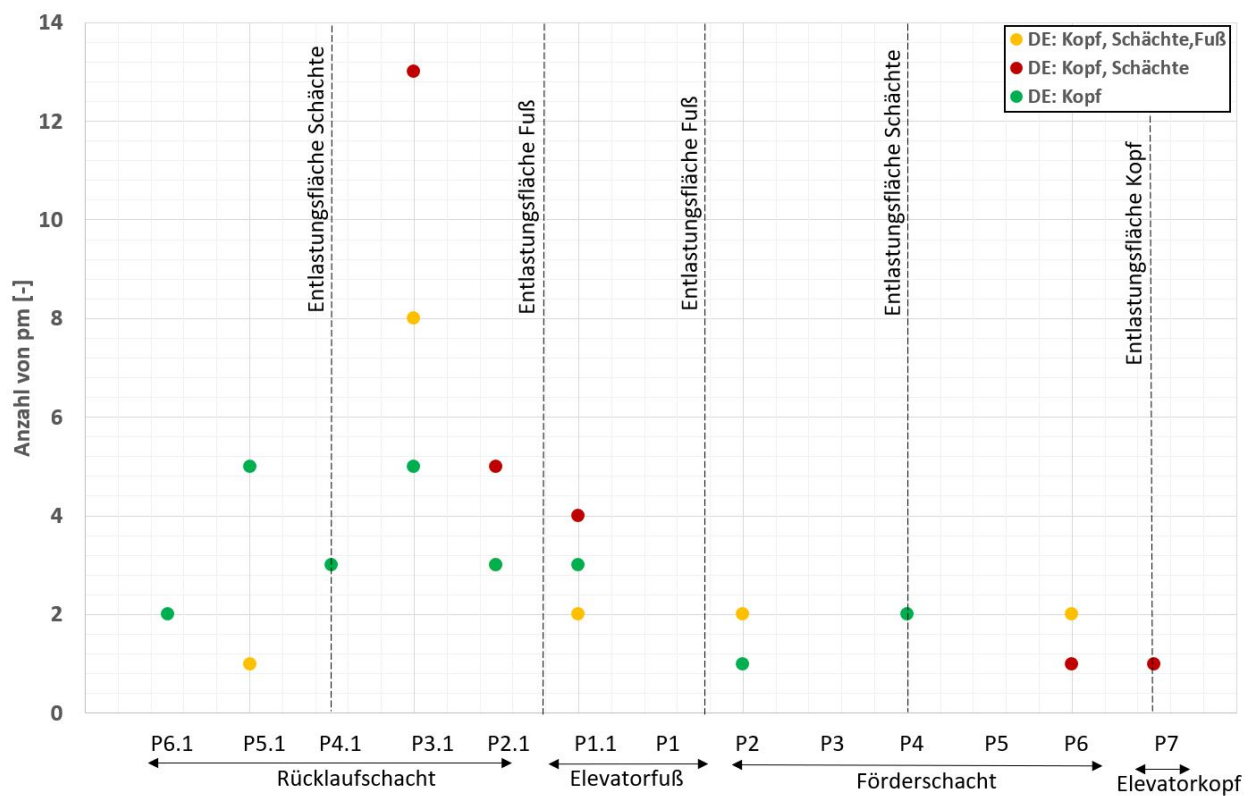


Abbildung 4.7: Anzahl und Ort des Auftreten des maximalen Explosionsdruck p_m aller am Rundschachtelevator durchgeführten Versuche in Abhängigkeit der Entlastungsflächenkonfiguration.

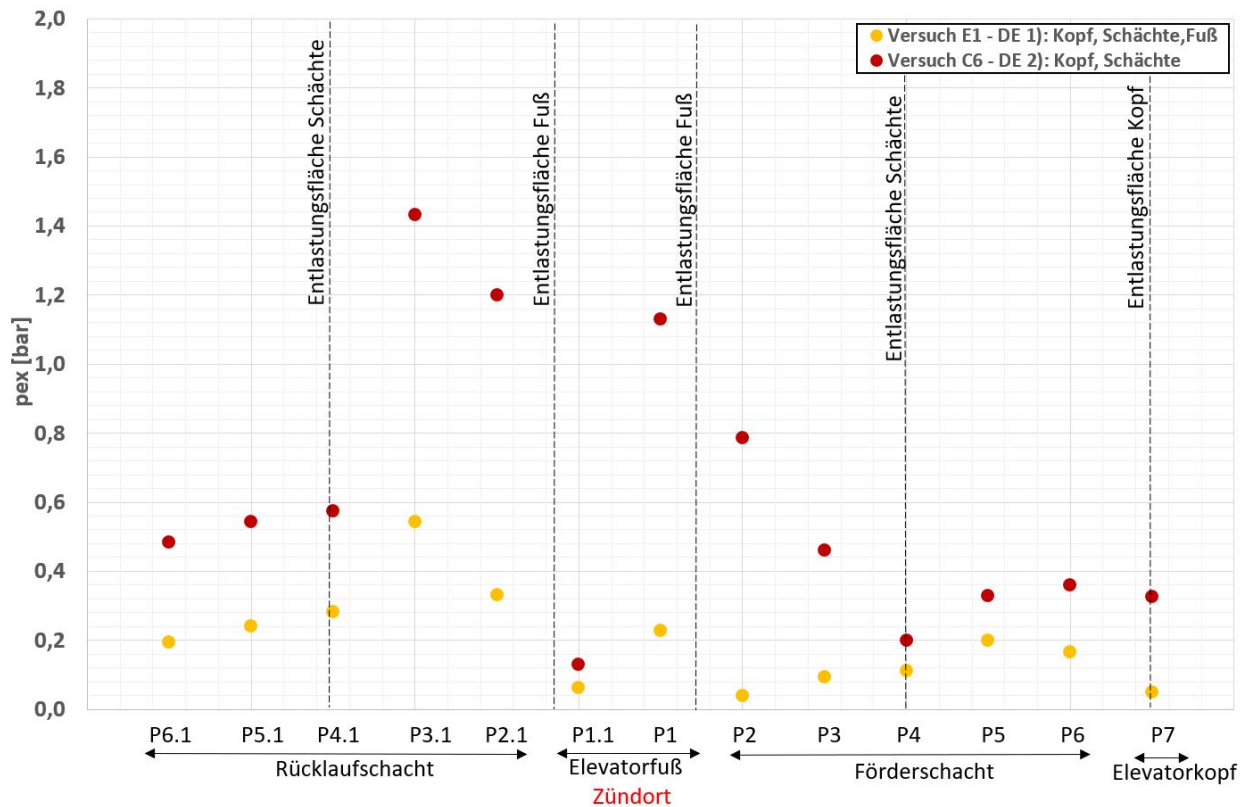


Abbildung 4.8: Darstellung des Explosionsdrucks p in Abhängigkeit der Messposition für zwei exemplarisch ausgewählte Versuche bei Entlastungsflächenkonfiguration DE 1) und DE 2). Versuch E1 mit Maisstärke, Versuch C6 mit Maisstärke.

4.2.3 Explosionsdruck nach Entlastungsflächen

Betrachtet man zusätzlich die Entwicklung des Explosionsdrucks speziell nach den Entlastungsflächen, lassen sich grundsätzlich zwei Szenarien charakterisieren. Hierbei ist von Bedeutung, welcher Abstand zwischen Entlastungsflächen und Zündort vorliegt bzw. welches Druckniveau vorherrscht. Bei Entlastungsflächenkonfiguration 2), also Druckentlastung am Elevatorkopf und an den Elevatorschächten, wurde nach den Entlastungsflächen in den Schächten stets ein geringerer oder zumindest nicht erhöhter Explosionsdruck im Vergleich zu der Messposition vor den Entlastungsflächen beobachtet. Versuch C6 in Abbildung 4.8 zeigt dies exemplarisch. Bei diesem Explosionsversuch mit Maisstärke und Druckentlastung am Elevatorkopf und in den Elevatorschächten sinkt der Druck an Messposition P5.1 im Rücklaufschacht nach der Entlastungsfläche im Schacht erheblich. Das Druckmaximum tritt vor der Entlastungsfläche im Rücklaufschacht, also an Messposition P3.1 auf.

Bei geringem Abstand der Entlastungsflächen zum Zündort, also bei Druckentlastung am Elevatorkopf, den Elevatorschächten und in der Nähe des Elevatorfußes, wurde in 67% der durchgeführten Versuche ein Anstieg des Explosionsdrucks nach den Entlastungsflächen in der Nähe des Elevatorfußes beobachtet. Der exemplarisch ausgewählte Versuch E1 in Abbildung 4.8 zeigt dies. Hier wird im Rücklaufschacht nach der Entlastungsfläche in der Nähe des Elevatorfußes an den Messpositionen P2.1 und P3.1 ein im Vergleich zum Elevatorfuß deutlich erhöhter Explosionsdruck beobachtet. Der Grund hierfür ist das Öffnen der Entlastungsflächen noch in der Anlaufphase der Staubexplosion und das vergleichsweise geringe Druckniveau zu diesem Zeitpunkt. Der statische

Ansprechdruck der Entlastungsflächen von $p_{stat} = 100$ mbar wird während der Anlaufphase der Staubexplosion im Elevatorfuß zunächst nicht erreicht. Die sich entwickelnde Flammen- bzw. Druckfront passiert die Entlastungsflächen zumindest teilweise während des Öffnungsvorganges und breitet sich weiter im Versuchselevator aus. Die Folge ist eine weitere Beschleunigung des Verbrennungsvorganges nach den Entlastungsflächen in Zündortnähe und damit ein weiterer Anstieg des Explosionsdruck nach den Entlastungsflächen. Folglich führen Entlastungsflächen am bzw. in der Nähe des Elevatorfußes bei Entzündung des Staub-Luft Gemisch im Elevatorfuß zu einer deutlichen Reduzierung des maximalen Explosionsdrucks im Gesamtsystem, verhindern aber nicht einen weiteren Druckanstieg oder eine Beschleunigung des Verbrennungsvorganges nach den Entlastungsflächen.

Bei Entlastungsflächen, die in einem größeren Abstand (hier $H = 6$ m) zum Zündort verbaut werden, ist dieses Phänomen nicht zu erkennen. Die Anlaufphase der Staubexplosion ist bereits überwunden und die Druckwelle, welche der Flammenfront vorausseilt, öffnet die Entlastungsflächen noch vor Ankunft der Flammenfront. Eine weitere Beschleunigung der Verbrennung und damit ein Verstärken der Druckentwicklung nach den Entlastungsflächen konnte nicht beobachtet werden.

4.3 Weitere Erkenntnisse

Sowohl im Rahmen dieses Projektes als auch bei vorangegangenen Projekten wurde bei Explosionsversuchen an Elevatoren eine starke Streuung der Messergebnisse festgestellt. Im Rahmen dieses Projekts traten die größten Streuungen bei Druckentlastung ausschließlich am Elevatorkopf in Kombination mit Malzstaub auf. In einem Zwischenbericht [8] wurde die These formuliert, dass auf Grund der möglicherweise unterschiedlichen Produktzusammensetzung bedingt durch die Herstellung bzw. Herkunft von Malzstaub innerhalb einer Charge, Streuungen der Ergebnisse erklärt werden können. Da der verwendete Malzstaub der abgeschiedene Staub aus einer Förderanlage für Malz einer Großbrauerei darstellt und dadurch keine konstante Produktqualität oder Zusammensetzung gewährleistet ist, wurde vermutet, dass unterschiedliche Feinanteile in den einzelnen Verpackungseinheiten die starke Streuung der Messergebnisse mit diesem Malzstaub erklären könnten [8]. Hierbei wurde vermutet, dass Inhomogenitäten im Produkt Malzstaub zu unterschiedlichen K_{St} -Werten innerhalb einer Produktcharge führen könnten. Das hätte zur Folge, dass gemessene maximale Explosionsdrücke bei Malzstaub möglicherweise nicht korrekten K_{St} -Werten zugeordnet würden.

Um diese Hypothese zu untersuchen, wurde deshalb ein Konzept erarbeitet, das es ermöglicht durch repräsentative Probenteilung homogene Teilmengen aus einer Großmenge Malzstaub zu erzeugen. Hierfür wurde eine Apparatur verwendet, welche mit einfachen Mitteln die Teilung von Malzstaub sowie die Erstellung einer für die Gesamtmenge repräsentativen Probe ermöglicht. Durch eine anschließende Kennzahlermittlung sowie weitere Explosionsversuche am Rundschachtelevator sollte dann die aufgestellte These bekräftigt oder widerlegt werden.

Die für die Probenteilung verwendete Apparatur ist einfach konstruiert und ist in Abbildung 4.9 dargestellt. Sie besteht im Wesentlichen aus 4 abgewinkelten Vierkantroh-

ren ((3) in Abbildung 4.9), die nebeneinander verschweißt wurden. Auf die Oberkante wurde ein scharfkantiges Blechkreuz (7) verbaut, welches die Oberfläche in 4 gleichgroße Abschnitte unterteilt. Auf diesem Blechkreuz befindet sich ein Trichter (1), dessen Auslauföffnung die gesamte Oberfläche der Vierkantrohre abdeckt. In den Trichter wird mittels einer Förderschnecke (2) kontinuierlich Malzstaub gefördert. Der Produktstrom des Malzstaubs rutscht durch den Trichter auf das Blechkreuz und wird von diesem in 4 identische Produktströme unterteilt. Diese gleiten dann durch die abgewinkelten Vierkantrohre in je ein separates Auffanggefäß (6). Die abgewinkelten Enden der Vierkantrohre wurden mit Plastikrohren (5) verlängert. Über verschließbare Öffnungen in diesen Rohren (4) können den zuvor geteilten Produktströmen Proben entnommen werden.

Mit dem beschriebenen Aufbau wurde der Malzstaub für Versuchsserie H vorbereitet. Dafür wurde zunächst 800 kg Malzstaub abgewogen. Diese 800 kg wurden in einem ersten Durchgang gemäß der in Abbildung 4.10 schematisch dargestellten Vorgehensweise in 4 Teilmengen mit jeweils 200 kg unterteilt. Jeweils 2 dieser Teilmengen wurden anschließend zusammengeführt. So entstanden 2 Teilmengen mit jeweils 400 kg Malzstaub. Mit diesen beiden Teilmengen wurde anschließend der Vorgang wiederholt und erneut jeweils 4 Teilmengen erzeugt. Somit entstanden aus den 800 kg Malzstaub durch 2 Teilungsvorgänge 8 identische Teilmengen Malzstaub zu je 100 kg Produkt. Während der zweiten Teilung wurden an den Öffnungen der Apparatur (4) in identischen Zeitabständen und in zufälliger Reihenfolge geringe Produktmengen entnommen. Diese entnommenen Mengen wurden zu einer für die Gesamtmenge Malzstaub repräsentativen Probe zusammengeführt und analysiert. Somit sind die daraus resultierenden explosionstechnischen Kenngrößen ebenfalls für die gesamte Menge Malzstaub repräsentativ.

Mit den erzeugten Teilmengen wurde anschließend Versuchsserie H durchgeführt.

Vergleicht man die Ergebnisse der Explosionsversuche mit Malzstaub von Versuchsserie H (mit repräsentativer Probenteilung) mit den Ergebnissen durchgeführter Versuchsserien mit Malzstaub ohne Probenteilung, lassen sich folgende Aspekte festhalten.

- Die Hypothese, dass Inhomogenitäten im Produkt Malzstaub zu unterschiedlichen K_{st} -Werten innerhalb einer Produktcharge führen können, kann nicht bestätigt werden.
- repräsentative Probenteilung von Malzstaub führt nicht zu einer Verringerung der Streuung der Messergebnisse.
- Explosionsversuche am Rundschachtelevator mit Malzstaub sind trotz einer nicht standardisierten Herstellung von Malzstaub belastbar.

Diese Aussagen basieren auf dem Vergleich des maximalen Explosionsdrucks p_m von Versuchsreihe H mit bereits durchgeführten Versuchsreihen am Rundschachtelevator ohne Probenteilung. Betrachtet man hierfür exemplarisch Versuchsreihe D ist erkennbar, dass die Streuung von p_m bei Druckentlastung ausschließlich am Elevatorkopf identisch ist. Die maximale Streuung innerhalb der Versuchsreihen D und H bei dieser Entlastungsflächenkonfiguration beträgt jeweils 1,0 bar. Bei Entlastungsflächenkonfiguration 2), also Druckentlastung am Elevatorkopf und in den Elevatorschächten wurde

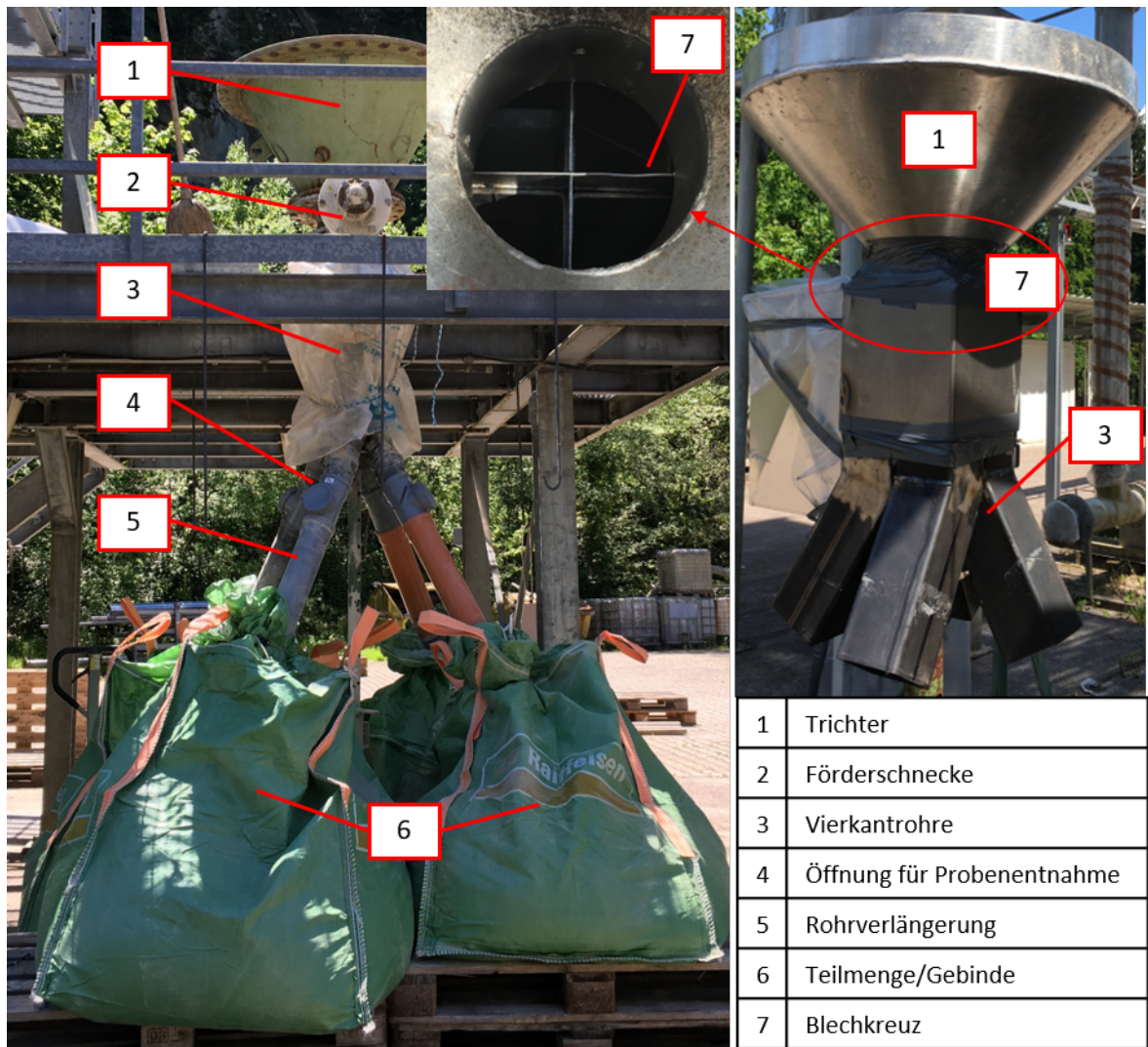


Abbildung 4.9: Apparatur zur repräsentativen Probenteilung von Malzstaub.

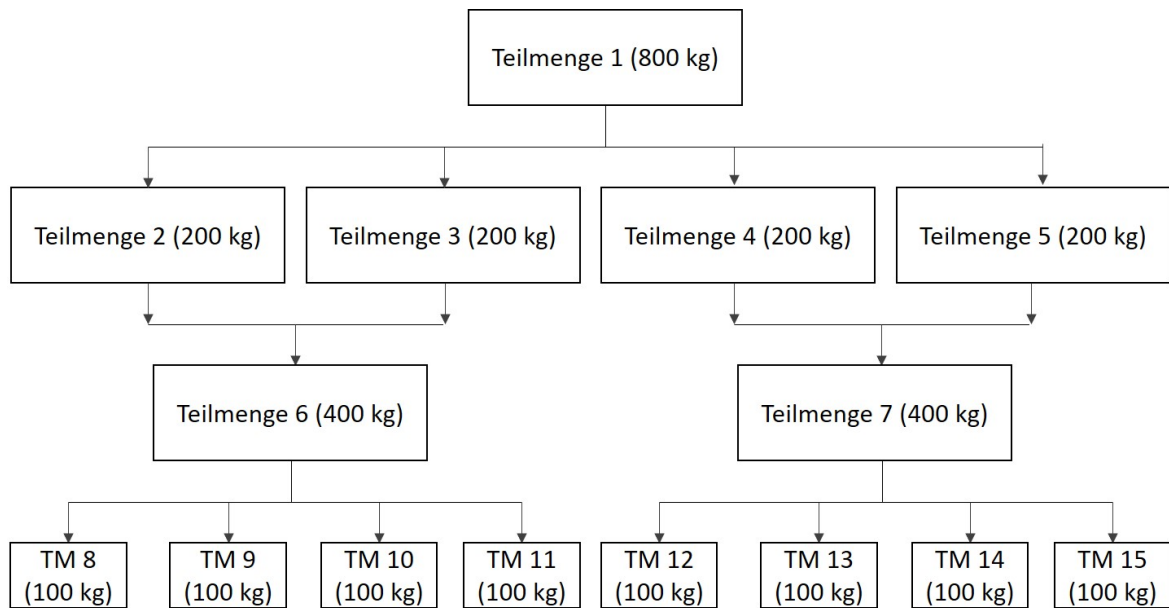


Abbildung 4.10: Schematischer Ablauf zur Erstellung von 8 identischen Teilmengen (TM) aus einer Großmenge Malzstaub.

bei Versuchsreihe D eine im Vergleich zu Versuchsreihe H erhöhte Streuung der Messwerte beobachtet. Bei Versuchsreihe D beträgt bei DE) die maximale Streuung 1,1 bar, bei Versuchsreihe H hingegen 0,7 bar.

Durch den Vorgang der repräsentativen Probenentteilung konnte die maximale Streuung der Messergebnisse folglich nicht reduziert werden. Dies entkräftet wiederum die in [8] aufgestellte These, dass innerhalb einer Versuchsreihe aufgrund von Inhomogenitäten im Produkt und daraus resultierend unterschiedlichen Feinanteilen in den Malzstaubgebunden den durchgeführten Versuchen unterschiedliche K_{St} -Werte zugeordnet werden müssten. Wäre dieser Effekt bei Explosionsversuchen am Elevator dominierend, hätte eine repräsentative Probenentteilung, welche identische Teilmengen hervorbringt, und eine für alle Teilmengen repräsentative Bestimmung der explosionstechnischen Kenngrößen ermöglicht, eine Verringerung der Streuung der Ergebnisse zur Folge haben müssen.

Da trotz Probenentteilung die Streuung der Messergebnisse speziell bei Druckentlastung am Elevatorkopf sehr hoch ist, kann dies nicht auf unterschiedliche Partikelgrößenverteilungen des Staubes bei den jeweiligen Einzelversuchen zurück zu führen sein. Möglicherweise dominieren andere Effekte wie Konzentrationsverteilung des Staubes oder der Turbulenzzustand zum Zündzeitpunkt (nähere Ausführung siehe Kapitel 5 Diskussion).

Kapitel 5

Diskussion

Wie in Abschnitt 4 beschrieben, kann Kurve 2 (Druckentlastung an Elevatorkopf, -schächten und Fuß) nach CEN/TR 19826 auch für Rundschachtelevatoren angewendet werden. Die Datenlage bei dieser Entlastungsflächenkonfiguration ist sehr umfangreich und die Ergebnisse sind belastbar.

Kurve 4 nach CEN/TR (Druckentlastung an Elevatorkopf und -schächten) kann unter Verwendung eines Zuschlages der Festigkeit von mindestens 15 % auch für Rundschachtelevatoren verwendet werden. Hierbei ist zu beachten, dass Versuch H1 mit Malzstaub trotz der Erhöhung der Festigkeit um 15% die empfohlene Mindestfestigkeit um 0,43 bar übersteigt. Diese Überschreitung ist jedoch ein Einzelfall und wurde lediglich bei dem genannten Versuch beobachtet. Insgesamt wurden bei dieser Entlastungsflächenkonfiguration 24 Versuche durchgeführt, deren Explosionsdrücke p_m alle (mit Ausnahme von Versuch H1) unterhalb der empfohlenen Mindestfestigkeit mit 15 % Zuschlag liegen. Versuch H1 ist trotz des vergleichsweise niedrigen K_{St} -Wert des Staubes von $K_{St} = 139 \text{ bar} \cdot \frac{\text{m}}{\text{s}}$ der höchste am Elevator gemessene Explosionsdruck bei dieser Entlastungsflächenkonfiguration. Alle durchgeführten Versuche mit einem deutlich höheren K_{St} -Wert des Staubes (K_{St} im Bereich von $K_{St} = 180 \text{ bar} \cdot \frac{\text{m}}{\text{s}}$ bis $K_{St} = 190 \text{ bar} \cdot \frac{\text{m}}{\text{s}}$) wiesen einen geringeren maximalen Explosionsdruck p_m auf. Es wurden 9 Explosionsversuche mit K_{St} -Werten im Bereich von $K_{St} = 180 \text{ bar} \cdot \frac{\text{m}}{\text{s}}$ bis $K_{St} = 190 \text{ bar} \cdot \frac{\text{m}}{\text{s}}$ bei dieser Entlastungsflächenkonfiguration durchgeführt. Auch p_m der beiden Versuche H2 und H3 mit Malzstaub liegen deutlich unterhalb des p_m von H1. Der Grund für diesen hohen Explosionsdruck bei dem vergleichsweise geringen K_{St} -Wert kann zum gegenwärtigen Zeitpunkt nicht festgestellt werden. Ein sicherheitstechnische Risiko lässt sich daraus nicht ableiten. Die Wahrscheinlichkeit, dass eine Überschreitung von p_{min} bei dieser Entlastungsflächenkonfiguration auftritt, ist gering.

Bei Druckentlastung ausschließlich am Elevatorkopf bzw. in den Schächten im Abstand von 12 m (Kurve 5 nach CEN/TR 16829) konnten deutlich erhöhte Explosionsdrücke im Vergleich zum Rechteckschachtelevator bzw. zu geltenden Auslegungsempfehlungen beobachtet werden. Auf Grund der großen Anzahl der hohen Explosionsdrücke in einem Bereich des K_{St} -Wert zwischen $120 \text{ bar} \cdot \frac{\text{m}}{\text{s}} < K_{St} < 190 \text{ bar} \cdot \frac{\text{m}}{\text{s}}$ kann eine Anwendung dieser Entlastungsflächenkonfiguration auf Rundschachtelevatoren nicht empfohlen werden. Der erhöhte freie Querschnitt am Rundschacht im Vergleich zum Rechteckschachtelevator von ca. 14 % hat bei dieser Entlastungsflächenkonfiguration

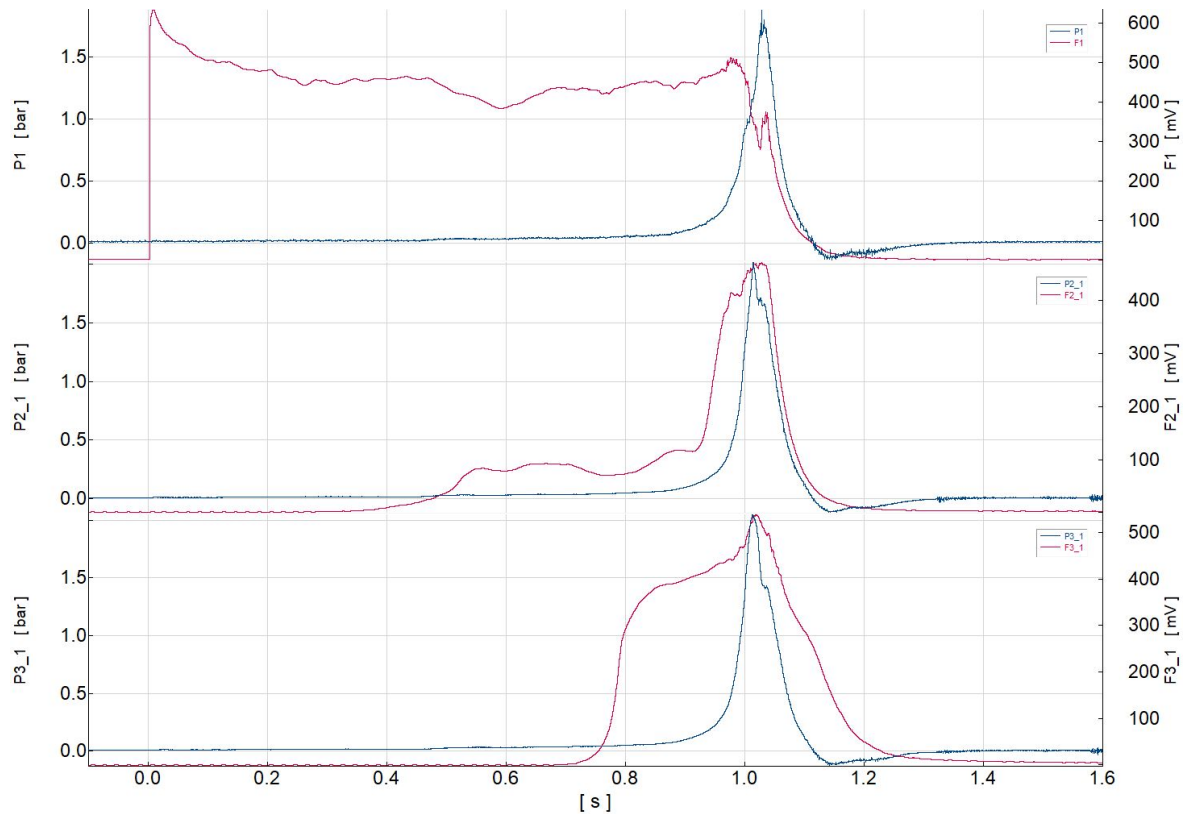


Abbildung 5.1: Flammen- und Druckausbreitung an den Messpositionen P1 bis P3.1 im Rücklaufschacht der Malzstaubexplosion D6. DE am Elevatorkopf. Blaue Linien: Druck/Zeitverläufe, rote Linien Spannungs/Zeitverläufe der Flammensensoren.

einen deutlichen Einfluss auf den maximalen Explosionsdruck. Auffällig ist hierbei die vergleichsweise hohe Streuung der Messergebnisse innerhalb einer Versuchsreihe. Bei Versuchsreihe H mit Malzstaub hat diese Streuung den Faktor 2, bei Versuchsreihe B mit Malzstaub 2,4 und bei Weizenstärke (Versuchsreihe I) den Faktor 4,2. Dies ist im Vergleich zu den restlichen Entlastungsflächenkonfigurationen außergewöhnlich hoch. Ein möglicher Grund hierfür könnte eine örtlich und zeitlich stark variierende Staubkonzentration im Versuchselevator sein, die sich bei der Ausbreitung der Verbrennung bei dieser Entlastungsflächenkonfiguration besonders stark bemerkbar macht. Ein Argument für diese These ist die Beobachtung, dass sich Staubexplosionen im Elevatorfuß oftmals deutlich verzögert nach der Auslösung des pyrotechnischen Zünders ausbreiten. Abbildung 5.1 zeigt dies exemplarisch für die Malzstaubexplosion D6. Dabei ist erkennbar, dass zum Zündzeitpunkt ($t=0$ s) an der Messposition F1 im Elevatorfuß eine Flamme vorhanden ist (rote Messkurve). Die Verbrennung im Elevatorfuß hält zunächst an, bis beim Zeitpunkt von $t=0,85$ s erstmals ein Druckanstieg beobachtet wird. Die Druckwelle breitet sich dann im Elevatorschacht aus. Die eigentliche Deflagration, die zu einem Druckanstieg im Elevator führt, tritt in diesem Versuch also zeitversetzt ($\Delta t \approx 0,85$ s) zum Zündzeitpunkt auf. Zuvor werden lediglich Flammen beobachtet, also eine Art Brand, die nicht mit einem Druckanstieg einher gehen. Dieses Phänomen wurde mehrfach und unabhängig von der Entlastungsflächenkonfiguration oder des verwendeten Staubes beobachtet. Dabei traten Verzögerungen zum Zündzeitpunkt

von $\Delta t \approx 0,3$ s bis $\Delta t \approx 1,4$ s auf. Dies kann auf ein nicht explosionsfähiges Staub-Luft Gemisch im Elevatorfuß zum Zündzeitpunkt zurück zu führen sein. Dabei kann zum einen die Staubkonzentration c_s außerhalb der zündfähigen Konzentration liegen, oder zum Anderen die Verwirbelung des Staubes nicht ausreichend gegeben sein. Letzteres lässt sich ausschließen, da das schnell laufende Becherwerk und die Umlenkung der durch die Becher erzeugten Luftströmung am Elevatorfuß für eine ausreichende Turbulenz sorgen müssten. Deshalb ist die Ursache eher in der Staubkonzentration zu suchen. Denkbar wäre, dass am Elevatorfuß eine Staubkonzentration vorliegt, die oberhalb der OEG liegt. Auf Grund der Produktvorlage im Elevatorfuß ist eine große Menge stark staubendes Produkt vorhanden, das beim Elevatorleerlauf aufgewirbelt werden kann und die Staubkonzentration auf ein Niveau oberhalb des explosionsfähigen Bereiches anheben könnte. Hierfür spricht ebenfalls, dass bei einer zu geringen Staubkonzentration im Elevatorfuß vermutlich auch kein Brand mit einer deutlichen Ausprägung von Flammen möglich wäre. Entwickelt sich dann bei der Zündung des pyrotechnischen Zünders eine Flamme im Elevatorfuß wird ein Teil des Staubes verbrannt. Durch die entstehenden Verbrennungsgase und deren Expansion wird ein Teil des Staubes in die Elevatorschächte ausgetragen. Entsteht dann durch die reduzierte Staubkonzentration ein zündfähiges Staub/Luft-Gemisch, wird dieses unmittelbar durch die vorhandene Flamme entzündet. Die resultierende Flammenfront und Druckwelle breitet sich anschließend im Versuchselevator aus.

Der Zustand im Elevatorfuß zu Beginn der Staubexplosion ist dann von einer Vielzahl, nicht quantifizierbarer Faktoren beeinflusst. Hierzu zählen Staubkonzentration und Turbulenzzustand, Sauerstoffgehalt sowie Temperatur und Korngrößenverteilung der in Luft dispergierten Partikeln. Dies führt zu einer möglicherweise starken Variation der Anfangszustände des Explosionsereignisses, die sich wiederum in einem breiten Bereich von maximalen Explosionsdrücken äußern können. Diese variablen Anfangszustände beeinflussen Explosionsabläufe in Elevatoren ohne Druckentlastung in den Schächten auf Grund des langen Ausbreitungsweges der Verbrennung vermutlich besonders stark. Eine notwendige minimale Schachtlänge oder ein minimales Volumen, welches zur Entstehung der beschriebenen Effekte möglicherweise Voraussetzung ist, ist ohne Druckentlastung eher gegeben. Wird die Verbrennung bereits nach einigen Metern entlastet, ist dies nicht der Fall, wodurch die genannten Effekte nicht auftreten oder keinen Einfluss besitzen. Als weitere Variable kommt bei dieser Druckentlastungskonfiguration der Turbulenzzustand sowie die Staubkonzentration in den Schächten hinzu, die örtlich und zeitlich ebenfalls stark variieren können. Ist beispielsweise bei einer Deflagration des Staub-Luft-Gemisches im Elevatorfuß eine für Staubexplosionen günstige Staubkonzentration in einem Teilbereich der Schächte oder in den gesamten Schächten vorhanden und ist ein günstiger Anfangszustand vorzufinden, ist mit einer starken Beschleunigung des Verbrennungsvorganges bereits zu Beginn der Verbrennung und resultierend daraus mit starker Druckentwicklung zu rechnen. Ist der Anfangszustand im Elevatorfuß dagegen ungünstig und/oder sind die lokalen Staubkonzentrationen in den Schächten ebenfalls nicht ideal, hätte dies schwächerer Explosionsverläufe mit geringeren Explosionsdrücken zur Folge. Da der Strömungszustand im Versuchselevator komplex ist und die Staubkonzentrationen in den Schächten im zeitlichen Verlauf örtlich stark schwanken können, entsteht ein hochdynamisches System das unter Einbezug des variablen Anfangszustandes zu unterschiedlichen Verbrennungsabläufen und daraus

resultierend stark schwankenden Explosionsdrücken besonders bei größeren Schachtlängen führen kann.

Hinzu kommen mögliche Unterschiede im Turbulenzzustand bedingt durch Luftströmungen zwischen den beiden Elevatorschächten (Förder- und Rücklaufschacht), die einen möglichen Erklärungsansatz für das verstärkte Aufkommen von p_m im Rücklaufschacht darstellen können (vgl. Abschnitt 4.2.2). Die schnell laufenden Becher in den Schächten erzeugen eine Luftströmung in Laufrichtung des Becherwerkes. Das bedeutet, dass vom Elevatorfuß ausgehend Luft den Förderschacht hinauf sowie den Rücklaufschacht herab strömt. Bei einem Staubexplosionsereignis im Elevatorfuß entstehen Verbrennungsgase die mit hoher Geschwindigkeit in beide Elevatorschächte expandieren. Im Förderschacht folglich in Strömungsrichtung und im Rücklaufschacht entgegen der durch das Becherwerk erzeugten Luftströmung. Die entgegengesetzte Strömung im Rücklaufschacht (durch das Becherwerk erzeugte Luftströmung vom Elevatorkopf zum Elevatorfuß sowie die Expansionsströmung vom Elevatorfuß zum Elevatorkopf) erzeugt eine erhöhte Turbulenz, die sich in einer stärkeren Verwirbelung der Partikeln äußert. Hinzu kommt, dass die Expansionsströmung im Rücklaufschacht in die geöffneten Förderbecher hinein strömt (im Förderschacht strömt die Expansion in Laufrichtung des Becherwerkes, also auf die abgerundete, strömungsgünstige Rückseite der Förderbecher). Eine Anströmung der Förderbecher an die geöffnete Seite erzeugt einen zusätzlichen Strömungswiderstand, der zu zusätzlicher Verwirbelung bzw. Turbulenz beiträgt. Für diesen Erklärungsansatz sprechen die Erkenntnisse eines Forschungsprojektes zur Ausbreitung von Staubexplosionen in Rohrleitungen pneumatischer Förderanlagen. Hier wurden ebenfalls bei einer Ausbreitung der Staubexplosion entgegen der Strömungsrichtung in der Rohrleitung erhöhte Explosionsdrücke beobachtet [14]. Ein weiterer Erklärungsansatz für das erhöhte Aufkommen von p_m im Rücklaufschacht sind Rückstände von Produkt in den Förderbechern. Sind Rückstände in den Bechern vorhanden, werden bei der Änderung der Laufrichtung der Förderbecher am Elevatorkopf diese in den Förderschacht hinein entleert. Die sich im Schacht ausbreitende Druckwelle verstärkt diesen Effekt. Dadurch kann der voranschreitenden Deflagration im Rücklaufschacht zusätzlicher Brennstoff zugeführt werden. Dieser kann zu einer weiteren Beschleunigung des Verbrennungsvorganges führen. Dies in Kombination mit einer erhöhten Turbulenz im Rücklaufschacht führt vermutlich zu einem erhöhten Auftreten von p_m im Rücklaufschacht.

5.1 Ausblick

Im Rahmen der Durchführung dieses Projektes konnten offene Fragen zum Explosionsgeschehen in Rundschachtelevatoren untersucht und beantwortet werden. Einige Fragen und Phänomene sind nach wie vor unklar und erwecken weiteren Untersuchungsbedarf. Zum einen sollte der Frage nach der Staubkonzentrationsverteilung in Elevatoren weitere Aufmerksamkeit geschenkt werden. Hier könnten mittels geeigneten Messgeräten die Staubkonzentrationen in den Elevatorschächten sowie dem Elevatorkopf oder -fuß bestimmt werden. Dadurch könnten Aussagen über dessen örtliche Verteilung oder zeitlichen Verlauf gemacht werden und dadurch die Entstehung und Ausbreitung von

Staubexplosionen in Elevatoren besser beurteilt werden. Des Weiteren wäre es von großem Interesse, Informationen über das Strömungsverhalten innerhalb der Elevator-schächte zu erhalten. Über zunächst stationäre Strömungssimulationen könnten Aussagen zu unterschiedlichen Strömungsprofilen in Förder- und Rücklaufschacht gemacht werden. Durch mögliche Aussagen zu Turbulenzen könnte das Verständnis der Abläufe von Staubexplosionen in Elevatoren verbessert werden.

Weiterhin wäre es von großem Interesse, Zusammenhänge zwischen der Größe von Entlastungsflächen und dem maximalen Explosionsdruck bzw. den maximalen Flamm-geschwindigkeiten an Elevatoren zu untersuchen. Hierdurch könnten weitere und detailliertere Auslegungsempfehlungen zur Größe und Anordnung von Druckentlas-tungseinrichtungen gegeben werden. Bei solchen Untersuchungen könnten Versuchsse-rien mit trägheitsbehafteten Entlastungseinrichtungen integriert werden, die Aussagen zum Einfluss von Entlastungsfähigkeiten auf reduzierte Explosionsdrücke an Elevatoren geben könnten.

Ebenso wären Untersuchungen zum Verhalten von Druckentlastungseinrichtungen in Kombination mit Flammen reduzierenden Elementen (flammenlose Druckentlastungen) interessant. Möglicherweise hohe Staubkonzentrationen in Elevatoren sowie hohe Pro-duktbeladungen könnten sich negativ auf die Funktion solcher Systeme im Vergleich zu Standardanwendungen auswirken.

Literaturverzeichnis

- [1] BARTKNECHT, W.: *Explosionsschutz*, Springer Verlag, Berlin Heidelberg, 1993.
- [2] *DIN EN 14034: Bestimmung der Explosionskenngrößen von Staub/Luft-Gemischen*, Beuth Verlag, Berlin, 2011.
- [3] *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 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 EN 14797: Einrichtungen zur Explosionsdruckentlastung*, Beuth Verlag, Berlin, 2007.
- [6] *CEN/TR 16829 Brand- und Explosionsschutz für Becherwerke*, DIN Deutsches Institut für Normung, Berlin , 2019.
- [7] HOLBROW, P, LUNN, G. A.: *Explosion Venting of Bucket Elevators, Stage 2: Final Report (EC/01/50)*, Health and Safety Laboratory, Buxton, 2001.
- [8] KOENIG, T: *Anwendbarkeit der Auslegungskriterien für die Schutzmaßnahme „Explosionsdruckentlastung“ gemäß VDI 2263-8.1 bzw. CEN/TR 16829 auf Rundsachtelevatoren*, Masterarbeit, Hochschule Mannheim und FSA e.V, Mannheim, 2021.
- [9] 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.
- [10] *VDI Richtlinie 3673 Blatt 1: Druckentlastung von Staubexplosionen*, Beuth Verlag, Berlin, 2002.
- [11] *VDI Richtlinie 2263 Blatt 1: Staubbrände und Staubexplosionen; Gefahren, Beurteilung, Schutzmaßnahmen; Untersuchungsmethoden zur Ermittlung von sicherheitstechnischen Kenngrößen von Stäuben*, Beuth Verlag, Berlin, 2008.

- [12] *VDI Richtlinie 2263 Blatt 8: Staubbrände und Staubexplosionen; Gefahren, Beurteilung, Schutzmaßnahmen; Brand- und Explosionsschutz an Elevatoren.*, Beuth Verlag, Berlin, 2008.
- [13] *VDI Richtlinie 2263 Blatt 8.1: Staubbrände und Staubexplosionen; Gefahren, Beurteilung, Schutzmaßnahmen; Brand- und Explosionsschutz an Elevatoren - Beispiele.*, Beuth Verlag, Berlin, 2008.
- [14] *VOGL, A.: Ablauf von Staubexplosionen in pneumatischen Saug-Flug-Förderanlagen*, Roland Aasanger Verlag, Heidelberg, 1995.

Abbildungsverzeichnis

1.1	Erforderliche Mindestfestigkeit p_{\min} eines Rechteckschachtelevator bei explosionsfester Bauweise in Kombination mit Explosionsdruckentlastung [6].	5
3.1	Rundschachtelevator auf dem Versuchsgelände der FSA in Kappelrodeck. Perspektive: Vorderseite	11
3.2	Skizze des Rundschachtelevators mit <i>Messpositionen</i> und Entlastungsflächen. Perspektive: Rückseite.	12
3.3	Oben: Elevatorfuß mit Schiebern und Zündort. Unten links: Mit PE-Folie verschlossene Druckentlastungsfläche (<i>Elevatorschacht</i>). Unten rechts: Hülse mit Glaslinse.	14
3.4	Verwendete Messtechnik und Zündgerät.	15
3.5	Exemplarischer gemessener Spannungs-Zeit Verlauf der Messposition F2 einer Weizenstärkeexplosion im Versuchselevator bei Druckentlastung nur am Elevatorkopf.	20
4.1	Bei Versuch G4 an der Messposition P5.1 und F5.1 gemessener Druck-Zeit-Verlauf und Spannungs-Zeit-Verlauf.	23
4.2	Bei Versuch G4 bestimmte Flammenlaufzeiten t_f in Abhängigkeit von der Messposition.	23
4.3	Ausschnitt der bei Versuch G4 erstellten Videosequenz zum Zeitpunkt $t=0,2$ s (Primärexplosion) und $t=2,7$ s (Sekundärexplosion) nach der Zündung.	24
4.4	Maximaler Explosionsdruck p_m der Versuchsserien A bis J in Abhängigkeit vom K_{St} -Wert (GM) der verwendeten Produkte, sowie die in CEN/TR 16829 empfohlenen Mindestfestigkeiten von Becherelevatoren mit rechteckigen Schächten bei entsprechender Entlastungsflächenkonfiguration (Kurven 2, 4 und 5) [6].	25
4.5	Bei dem Versuch B7 (DE am Elevatorkopf) mit Malzstaub gemessenen Druck- und Flammensignale im Förderschacht in aufsteigender Reihenfolge (Elevatorfuß bis -kopf). Blaue Linien: Druck/Zeitverläufe, rote Linien: Spannungs/Zeitverläufe der Flammensensoren.	29

4.6	Bei dem Versuch B7 (DE am Elevatorkopf) mit Malzstaub gemessenen Druck- und Flammensignale im Rücklaufschacht in aufsteigender Reihenfolge (Elevatorfuß bis - kopf). Blaue Linien: Druck/Zeitverläufe, rote Linien: Spannungs/Zeitverläufe der Flammensensoren.	30
4.7	Anzahl und Ort des Auftreten des maximalen Explosionsdruck p_m aller am Rundschachtelevator durchgeführten Versuche in Abhängigkeit der Entlastungsflächenkonfiguration.	33
4.8	Darstellung des Explosionsdrucks p in Abhängigkeit der Messposition für zwei exemplarisch ausgewählte Versuche bei Entlastungsflächenkonfiguration DE 1) und DE 2). Versuch E1 mit Maisstärke, Versuch C6 mit Maisstärke.	34
4.9	Apparatur zur repräsentativen Probenentnahme von Malzstaub.	37
4.10	Schematischer Ablauf zur Erstellung von 8 identischen Teilmengen (TM) aus einer Großmenge Malzstaub.	38
5.1	Flammen- und Druckausbreitung an den Messpositionen P1 bis P3.1 im Rücklaufschacht der Malzstaubexplosion D6. DE am Elevatorkopf. Blaue Linien: Druck/Zeitverläufe, rote Linien Spannungs/Zeitverläufe der Flammensensoren.	40
B.1	Zeichnung des Schachtquerschnittes von Rundschachtelevator und Rechteckschachtelevator.	62

Tabellenverzeichnis

1.1	Koeffizienten für die nach Formel 1.1 in Abbildung 1.1 dargestellten Mindestfestigkeiten für Elevatoren mit rechteckigen Schächten[6]. . . .	6
2.1	Aufgrund der geometrischen Ähnlichkeit von Rund- und Rechteckschacht verbaute Größen der Entlastungsflächen $A_{E,rund}$ des verwendeten Rundschachtelevators.	8
2.2	In der 20L Laborapparatur bestimmter <i>maximaler Explosionsdruck</i> p_{max} und K_{St} -Wert aller für Explosionsversuche am Rundschachtelevator verwendeten Stäube.	9
3.1	Im Rahmen dieses Projektes durchgeführte Explosionsversuche am Rundschachtelevator.	18
4.1	Versuchszahl, Häufigkeit und Versuche der im Rahmen dieser Arbeit auftretenden Flammenausbreitungen.	22
4.2	Auflistung aller Versuche deren Explosionsdruck p_m die geltenden Mindestfestigkeiten für Rechteckschachtelevatoren p_{min} überschreitet. . . .	27
A.1	Explosionstechnische Kenngrößen der für Explosionsversuche am Rundschachtelevator verwendeten Stäube.	51
A.2	Maximale Explosionsdrücke p_{ex} mit Messunsicherheit u der im Rahmen dieses Projektes durchgeführten Explosionsversuche, sowie nach [6] definierten Mindestfestigkeiten p_{min}	52
A.3	Fortsetzung von Tabelle A.2. Maximale Explosionsdrücke p_{ex} mit Messunsicherheit u der im Rahmen dieser Arbeit durchgeführten Explosionsversuche, sowie nach [6] definierten Mindestfestigkeiten p_{min}	53
A.4	Alle am Rundschachtelevator gemessene maximale Explosionsdrücke $P_{m,P}$ bei Druckentlastung an Elevatorkopf, -schächten und -fuß.	54
A.5	Alle am Rundschachtelevator gemessene maximale Explosionsdrücke $P_{m,P}$ bei Druckentlastung an Elevatorkopf und -schächten.	55
A.6	Alle am Rundschachtelevator gemessene maximale Explosionsdrücke $P_{m,P}$ bei Druckentlastung am Elevatorkopf.	56
A.7	Alle am Rundschachtelevator gemessene Flammenzeiten t_f bei Druckentlastung an Elevatorkopf, -schächten und -fuß.	57

A.8	Alle am Rundschachtelevator gemessene Flammenzeiten t_f bei Druckentlastung an Elevatorkopf und -schächten.	58
A.9	Alle am Rundschachtelevator gemessene Flammenzeiten t_f bei Druckentlastung am Elevatorkopf.	59
B.1	Daten und Abmessungen des verwendeten Rechteckschachtelevator [9].	60
B.2	Daten und Abmessungen des verwendeten Rundschachtelevator.	61
B.3	Messtellenübersicht der verwendeten Drucksensoren.	63
B.4	Messtellenübersicht der verwendeten Flammensensoren.	64

Anhang A

Messergebnisse tabellarisch

Schüttgut	Versuchsserie		20 L Kugel				1m ³ Behälter		MZE				S _N	F		
			P _{max}		K _{St}		P _{max}	K _{St}	UEG		MZE				MZT	
			GM	UM	GM	UM	GM	UM	GM	UM	GM	UM			GM	UM
Weizenmehl	A	8,2	6,3	117	59	n.b.	n.b.	30	250	100 < MZE ≤ 300	100 < MZE ≤ 500	420	450	0,6	8,4	
Malzstaub	B	8,7	7,3*	184	96*	n.b.	n.b.	60	125	10 < MZE ≤ 30	10 < MZE ≤ 30	390	470	14	4,9	
Maisstärke, getr.	C	8,8	8,8	183	183	8,1	231	60	60	5 < MZE ≤ 10	5 < MZE ≤ 10	380	380	10	1,9	
Malzstaub 4.1	D	8,5	7,9*	143	84*	n.b.	n.b.	30	125	3 < MZE ≤ 10	10 < MZE ≤ 30	n.b.	n.b.	n.b.	8,2	
Malzstaub 4.2	D	8,3	7,2*	155	58*	n.b.	n.b.	60	500	10 < MZE ≤ 30	30 < MZE ≤ 100	n.b.	n.b.	n.b.	8,2	
Maisstärke, ungetr.	E	8,7	8,1	160	127	8,9	151	30	125	3 < MZE ≤ 10	30 < MZE ≤ 100	n.b.	400	n.b.	12,6	
Weizenstärke (P20.5)	F	8,2	8,0	145	113	n.b.	n.b.	60	n.b.	10 < MZE ≤ 30	n.b.	380	n.b.	6,3	11,4	
Maisstärke, getr. (P19.1)	G	9,0	9,0	190	190	8,5	196	60	60	3 < MZE ≤ 10	3 < MZE ≤ 10	340	340	19,2	1,1	
Malzstaub (P21.1)	H	8,1	7,6*	139	90*	n.b.	n.b.	n.b.	125	3 < MZE ≤ 10	n.b.	n.b.	400	9,46	3,9	
Weizenstärke (P21.2)	I	8,3	7,5	132	114	7,5	119	125	n.b.	10 < MZE ≤ 30	n.b.	400	n.b.	3,55	11,6	
Weizenmehl (P20.1)	J	8,1	7,1	121	54	8,2	110	30	250	10 < MZE ≤ 30	n.b.	400	n.b.	0,45	11,3	

n.b.: nicht bestimmt

*: abgesiebt auf 500 µm

Tabelle A.1: Explosionstechnische Kenngrößen der für Explosionsversuche am Rundschachtelevator verwendeten Stäube.

Ver- such	DE	Produkt-	Kst [$\frac{\text{bar}\cdot\text{m}}{\text{s}}$]	p_m [bar]	u [mbar]	p_{\min} [bar]	$p_{\text{ex}} > p_{\min}$
B1	1)	Malzstaub	184	0,39	32,6	1,20	nein
B2	1)	Malzstaub	184	0,39	32,6	1,20	nein
C1	1)	getr.Maisstärke	183	1,18	32,6	1,18	nein
C2	1)	getr.Maisstärke	183	0,60	32,6	1,18	nein
C3	1)	getr.Maisstärke	183	0,65	32,6	1,18	nein
D1	1)	Malzstaub 4.1	155	0,31	32,6	0,73	nein
D3	1)	Malzstaub 4.2	155	0,44	32,6	0,73	nein
E1	1)	Maisstärke	150	0,54	32,6	0,67	nein
E2	1)	Maisstärke	150	0,35	32,6	0,67	nein
E7	1)	Maisstärke	150	0,23	32,6	0,67	nein
F1	1)	Weizenstärke P20.5	145	0,25	32,6	0,61	nein
F2	1)	Weizenstärke P20.5	145	0,07	32,6	0,61	nein
F3	1)	Weizenstärke P20.5	145	0,09	32,6	0,61	nein
F4	1)	Weizenstärke P20.5	145	0,08	32,6	0,61	nein
G1	1)	getr. Maisstärke P19.1	190	0,23	32,6	1,32	nein
G2	1)	getr. Maisstärke P19.1	190	0,22	32,6	1,32	nein
G3	1)	getr. Maisstärke P19.1	190	0,26	32,6	1,32	nein
A1	2)	Weizenmehl	117	0,26	32,6	0,52	nein
A2	2)	Weizenmehl	117	0,10	32,6	0,52	nein
B3	2)	Malzstaub	184	0,96	32,6	1,82	nein
B4	2)	Malzstaub	184	1,13	32,6	1,82	nein
C4	2)	getr. Maisstärke	183	0,88	32,6	1,80	nein
C5	2)	getr. Maisstärke	183	1,35	32,6	1,80	nein
C6	2)	getr. Maisstärke	183	1,43	32,6	1,80	nein
D4	2)	Malzstaub 4.1	155	0,62	80,4	1,21	nein
D5	2)	Malzstaub 4.2	155	0,14	80,4	1,21	nein
D9	2)	Malzstaub 4.1	155	1,26	80,4	1,21	nein
E3	2)	Maisstärke	150	0,41	32,6	1,11	nein
E4	2)	Maisstärke	150	0,63	32,6	1,11	nein
F5	2)	Weizenstärke P20.5	145	0,13	32,6	1,01	nein
F6	2)	Weizenstärke P20.5	145	0,14	32,6	1,01	nein
F7	2)	Weizenstärke P20.5	145	0,07	32,6	1,01	nein
F8	2)	Weizenstärke P20.5	145	0,40	32,6	1,01	nein
G4	2)	getr. Maisstärke P19.1	190	0,57	32,6	1,95	nein
G5	2)	getr. Maisstärke P19.1	190	1,31	32,6	1,95	nein
G6	2)	getr. Maisstärke P19.1	190	0,46	32,6	1,95	nein
G7	2)	getr. Maisstärke P19.1	190	0,77	32,6	1,95	nein
H1	2)	Malzstaub P21.1	139	1,46	32,6	0,90	ja
H2	2)	Malzstaub P21.1	139	0,76	32,6	0,90	nein
H3	2)	Malzstaub P21.1	139	1,01	32,6	0,90	ja
H4	2)	Malzstaub P21.1	139	0,90	32,6	0,90	nein

Tabelle A.2: Maximale Explosionsdrücke p_{ex} mit Messunsicherheit u der im Rahmen dieses Projektes durchgeführten Explosionsversuche, sowie nach [6] definierten Mindestfestigkeiten p_{\min} .

Ver- such	DE	Produkt-	Kst [$\frac{\text{bar} \cdot \text{m}}{\text{s}}$]	p_m [bar]	u [mbar]	p_{\min} [bar]	$p_{\text{ex}} > p_{\min}$
A3	3)	Weizenmehl	117	0,40	32,6	0,63	nein
A4	3)	Weizenmehl	117	0,40	32,6	0,63	nein
B5	3)	Malzstaub	184	3,80	80,4	4,01	nein
B6	3)	Malzstaub	184	1,71	80,4	4,01	nein
B7	3)	Malzstaub	184	4,11	80,4	4,01	ja
D6	3)	Malzstaub 4.1	155	2,60	80,4	1,89	ja
D7	3)	Malzstaub 4.1	155	2,15	80,4	1,89	ja
D8	3)	Malzstaub 4.2	155	1,58	80,4	1,89	nein
E5	3)	Maisstärke	150	0,76	32,6	1,65	nein
E6	3)	Maisstärke	150	0,90	32,6	1,65	nein
F9	3)	Weizenstärke P20.5	145	0,43	32,6	1,44	nein
F10	3)	Weizenstärke P20.5	145	0,25	32,6	1,44	nein
F11	3)	Weizenstärke P20.5	145	0,23	32,6	1,44	nein
F12	3)	Weizenstärke P20.5	145	0,44	32,6	1,44	nein
H5	3)	Malzstaub P21.1	139	2,02	80,4	1,21	ja
H6	3)	Malzstaub P21.1	139	1,34	80,4	1,21	ja
H7	3)	Malzstaub P21.1	139	1,02	80,4	1,21	nein
I1	3)	Weizenstärke P21.2	132	2,82	80,4	0,99	ja
I2	3)	Weizenstärke P21.2	132	0,61	80,4	0,99	nein
I3	3)	Weizenstärke P21.2	132	0,59	80,4	0,99	nein
I4	3)	Weizenstärke P21.2	132	0,24	80,4	0,99	nein
J1	3)	Weizenmehl P20.1	121	0,66	32,6	0,71	nein
J2	3)	Weizenmehl P20.1	121	0,46	32,6	0,71	nein
J3	3)	Weizenmehl P20.1	121	0,35	32,6	0,71	nein

Tabelle A.3: Fortsetzung von Tabelle A.2. Maximale Explosionsdrücke p_{ex} mit Messunsicherheit u der im Rahmen dieser Arbeit durchgeführten Explosionsversuche, sowie nach [6] definierten Mindestfestigkeiten p_{\min} .

Vers. [-]	Datum [-]	Temp. [°C]	Luftd. [mbar]	Produkt [-]	E _i [kJ]	Förderschacht										Rücklaufschacht					
						P1 [bar]	P2 [bar]	P3 [bar]	P4 [bar]	P5 [bar]	P6 [bar]	P7 [bar]	P8/P1.1 [bar]	P2.1 [bar]	P3.1 [bar]	P4.1 [bar]	P5.1 [bar]	P6.1 [bar]			
B1	06.08.2014	18	k.A	Malzstaub (1) 3	2	0,36	0,29	0,31	0,21	0,24	0,23	0,16	0,07	0,36	0,39	0,14	0,25	0,21			
B2	06.08.2014	19	k.A	Malzstaub (1) 3	2	0,34	0,32	0,33	0,20	0,21	0,22	0,18	0,10	0,34	0,39	0,16	0,25	0,24			
C1	11.08.2014	17	953	getr. Maisstärke	2	0,55	0,25	0,21	0,10	0,19	0,22	0,26	0,11	0,52	1,18	0,58	0,51	0,39			
C2	11.08.2014	19	953	getr. Maisstärke	2	0,44	0,24	0,24	0,08	0,15	0,18	0,18	0,11	0,42	0,60	0,18	0,22	0,19			
C3	11.08.2014	19	953	getr. Maisstärke	2	0,37	0,20	0,18	0,08	0,16	0,17	0,18	0,10	0,35	0,65	0,25	0,29	0,21			
D1	15.01.2015	2	950	Malzstaub 4.14.4.2	2	0,02	0,01	0,11	0,07	0,01	0,15	0,02	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,02			
D2	15.01.2015	2	950	Malzstaub 4.14.4.2	2	0,02	0,00	0,01	0,02	0,00	0,05	0,02	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,02			
D3	15.01.2015	2	950	Malzstaub 4.14.4.2	5	0,16	0,14	0,22	0,10	0,44	0,44	0,36	0,14	0,20	0,21	0,18	0,30	0,34			
E1	29.02.2016	0	947	Maisstärke 3402	5	0,23	0,04	0,09	0,11	0,20	0,17	0,05	0,06	0,33	0,54	0,28	0,24	0,20			
E2	29.02.2016	0	948	Maisstärke 3402	5	0,21	0,06	0,15	0,13	0,13	0,11	0,05	0,05	0,28	0,35	0,14	0,13	0,11			
E7	01.03.2016	0	953	Maisstärke 3402	5	0,18	0,06	0,15	0,10	0,10	0,09	0,06	0,05	0,23	0,20	0,10	0,10	0,09			
F1	13.01.2021	0	953	Maisstärke 3402	5	0,22	0,20	0,15	0,07	0,09	0,09	0,00	0,00	0,25	0,24	0,12	0,11	0,09			
F2	13.01.2021	0	952	Maisstärke 3402	5	0,07	0,06	0,06	0,05	0,06	0,05	0,00	0,06	0,06	0,05	0,04	0,07	0,05			
F3	14.01.2021	-1	958	Maisstärke 3402	5	0,08	0,09	0,06	0,04	0,04	0,05	0,00	0,08	0,06	0,05	0,04	0,04	0,05			
F4	14.01.2021	-1	951	Maisstärke 3402	5	0,08	0,08	0,07	0,05	0,05	0,06	0,00	0,08	0,06	0,06	0,05	0,06	0,06			
G1	21.01.2021	5	935	Maisst. P19.1	5	0,14	0,20	0,20	0,11	0,13	0,10	0,08	0,21	0,23	0,16	0,09	0,10	0,09			
G2	22.01.2021	5	929	Maisst. P19.1	5	0,19	0,21	0,18	0,08	0,11	0,11	0,10	0,22	0,13	0,12	0,09	0,10	0,11			
G3	22.01.2021	7	929	Maisst. P19.1	5	0,16	0,23	0,11	0,13	0,16	0,14	0,10	0,26	0,13	0,11	0,09	0,10	0,12			

DE: Kopf, Schächte, Fuß

Tabelle A.4: Alle am Rundschachtelevator gemessene maximale Explosionsdrücke $P_{m,P}$ bei Druckentlastung an Elevatorkopf, -schächten und -fuß.

Vers.		Datum	Temp.	Luftd.	Produkt	E _i	Förderschacht										Rücklaufschacht					
[-]	[-]	[-]	[°C]	[mbar]	[-]	[kJ]	P1	P2	P3	P4	P5	P6	P7	P8/P1.1	P2.1	P3.1	P4.1	P5.1	P6.1			
							P _{m,p} [bar]	P _{m,p} [bar]	P _{m,p} [bar]	P _{m,p} [bar]	P _{m,p} [bar]	P _{m,p} [bar]	P _{m,p} [bar]	P _{m,p} [bar]	P _{m,p} [bar]	P _{m,p} [bar]	P _{m,p} [bar]	P _{m,p} [bar]	P _{m,p} [bar]			
A1	31.07.2014	k.A	k.A	k.A	Weizenmehl	5	0,09	0,09	0,10	0,09	0,09	0,08	0,26	0,04	0,09	0,09	0,07	0,08	0,07			
A2	04.08.2014	k.A	k.A	k.A	Weizenmehl	5	0,07	0,07	0,07	0,07	0,06	0,06	0,04	0,05	0,09	0,10	0,06	0,06	0,06			
B3	06.08.2014	21	k.A	k.A	Malzstaub (1) 3	2	0,94	0,90	0,77	0,01	0,34	0,43	0,24	0,10	0,96	0,95	0,35	0,52	0,43			
B4	07.08.2014	19	k.A	k.A	Malzstaub (1) 3	2	1,11	1,07	0,96	0,50	0,46	0,01	0,38	0,14	1,13	1,10	0,46	0,61	0,56			
C4	12.08.2014	14	954	954	getr. Maisstärke	2	0,86	0,46	0,27	0,12	0,20	0,22	0,18	0,10	0,87	0,88	0,20	0,27	0,23			
C5	12.08.2014	17	954	954	getr. Maisstärke	2	0,90	0,56	0,40	0,19	0,31	0,27	0,26	0,15	1,04	1,35	0,42	0,43	0,33			
C6	12.08.2014	17	954	954	getr. Maisstärke	2	1,13	0,79	0,46	0,20	0,33	0,36	0,33	0,13	1,20	1,43	0,58	0,54	0,48			
D4	19.01.2015	4	956	948	Malzstaub 4.14.4.2	5	0,59	0,47	0,42	0,32	0,51	0,54	0,34	0,13	0,62	0,59	0,30	0,34	0,41			
D5	19.01.2015	4	956	956	Malzstaub 4.14.4.2	5	0,09	0,08	0,08	0,07	0,11	0,14	0,13	0,06	0,09	0,08	0,07	0,11	0,13			
D9	21.01.2015	8	955	955	Malzstaub 4.14.4.2	5	1,22	1,08	0,88	0,48	0,51	0,61	0,35	0,14	1,26	1,22	0,48	0,51	0,47			
E3	29.02.2016	0	948	948	Maisstärke 3402	5	0,33	0,10	0,23	0,12	0,10	0,10	0,03	0,04	0,40	0,41	0,15	0,13	0,10			
E4	01.03.2016	0	956	956	Maisstärke 3402	5	0,21	0,07	0,16	0,12	0,09	0,08	0,04	0,04	0,54	0,63	0,19	0,16	0,10			
F5	15.01.2021	-3	955	955	Weizenst. P20.5	5	0,13	0,11	0,10	0,07	0,07	0,07	0,06	0,13	0,10	0,07	0,06	0,08	0,07			
F6	18.01.2021	0	959	959	Weizenst. P20.5	5	0,07	0,07	0,05	0,04	0,04	0,05	0,03	0,08	0,13	0,14	0,06	0,06	0,05			
F7	18.01.2021	0	959	959	Weizenst. P20.5	5	0,06	0,06	0,05	0,04	0,04	0,05	0,03	0,07	0,07	0,07	0,05	0,05	0,05			
F8	18.01.2021	0	959	959	Weizenst. P20.5	5	0,40	0,34	0,21	0,09	0,12	0,11	0,06	0,40	0,40	0,24	0,11	0,13	0,10			
G4	25.01.2021	-1	939	939	getr. Maisst. P19.1	5	0,40	0,43	0,29	0,12	0,17	0,17	0,11	0,43	0,46	0,57	0,19	0,25	0,19			
G5	26.01.2021	0	953	953	getr. Maisst. P19.1	5	1,15	0,91	0,47	0,19	0,32	0,29	0,27	1,19	1,24	1,31	0,62	0,63	0,51			
G6	26.01.2021	0	953	953	getr. Maisst. P19.1	5	0,40	0,34	0,25	0,14	0,17	0,14	0,10	0,41	0,42	0,46	0,19	0,23	0,17			
G7	26.01.2021	0	954	954	getr. Maisst. P19.1	5	0,43	0,26	0,18	0,11	0,15	0,14	0,11	0,47	0,59	0,77	0,23	0,28	0,22			
H1	14.06.2021	29	956	956	Malzstaub P21.1	5	1,24	1,06	0,93	0,61	0,90	0,91	0,57	1,28	1,32	1,46	1,23	1,20	1,23			
H2	15.06.2021	29	955	955	Malzstaub P21.1	5	0,75	0,67	0,55	0,28	0,38	0,47	0,31	0,76	0,76	0,70	0,35	0,50	0,46			
H3	16.06.2021	24	952	952	Malzstaub P21.1	5	0,96	0,86	0,67	0,40	0,47	0,59	0,42	0,98	0,95	1,01	0,68	0,74	0,67			
H4	16.06.2021	31	951	951	Malzstaub P21.1	5	0,89	0,81	0,67	0,42	0,44	0,47	0,28	0,90	0,85	0,89	0,44	0,52	0,49			

DE: Kopf, Schächte

Tabelle A.5: Alle am Rundschachtelevator gemessene maximale Explosionsdrücke $P_{m,p}$ bei Druckentlastung an Elevatorkopf und -schächten.

Vers.	Datum	Temp.	Luftd.	Produkt	E _i	Förderschacht										Rücklaufschacht									
						P1	P2	P3	P4	P5	P6	P7	P8/P1.1	P2.1	P3.1	P4.1	P5.1	P6.1							
[-]	[-]	[°C]	[mbar]	[-]	[kJ]	p _{m,p} [bar]	p _{m,p} [bar]	p _{m,p} [bar]	p _{m,p} [bar]	p _{m,p} [bar]	p _{m,p} [bar]	p _{m,p} [bar]	p _{m,p} [bar]	p _{m,p} [bar]	p _{m,p} [bar]	p _{m,p} [bar]	p _{m,p} [bar]	p _{m,p} [bar]	p _{m,p} [bar]	p _{m,p} [bar]	p _{m,p} [bar]	p _{m,p} [bar]	p _{m,p} [bar]		
A3	05.08.2014	k.A	k.A	Weizenmehl	5	0,32	0,29	0,26	0,25	0,23	0,20	0,19	0,11	0,36	0,40	0,38	0,28	0,20							
A4	05.08.2014	k.A	k.A	Weizenmehl	5	0,33	0,35	0,39	0,40	0,39	0,34	0,22	0,11	0,33	0,33	0,32	0,32	0,29							
B5	07.08.2014	19	k.A	Malzstaub (1) 3	2	1,90	1,85	1,86	0,01	2,65	2,43	1,85	0,00	2,12	2,21	2,35	2,87	3,80							
B6	07.08.2014	19	k.A	Malzstaub (1) 3	2	1,42	1,41	1,43	1,41	1,30	1,53	0,93	0,25	1,39	1,40	0,00	1,71	1,44							
B7	11.08.2014	14	k.A	Malzstaub (1) 3	2	2,42	2,47	2,47	2,40	2,53	2,69	2,20	0,82	2,68	2,73	2,78	3,38	4,11							
D6	20.01.2015	6	957	Malzstaub 4.14.4.2	5	1,88	2,15	2,15	2,14	2,01	1,78	1,35	0,52	2,02	2,05	2,04	2,15	2,18							
D7	20.01.2015	8	957	Malzstaub 4.14.4.2	5	0,73	0,56	0,66	0,59	0,59	0,69	0,56	0,14	1,48	1,62	1,77	2,15	1,61							
D8	21.01.2015	8	955	Malzstaub 4.14.4.2	5	0,84	0,85	0,81	0,80	0,82	0,86	0,65	0,28	1,30	1,40	1,57	1,58	1,27							
E5	01.03.2016	0	956	Maistärke 3402	5	0,62	0,26	0,66	0,49	0,39	0,41	0,12	0,07	0,76	0,74	0,60	0,43	0,37							
E6	01.03.2016	0	956	Maistärke 3402	5	0,84	0,29	0,49	0,37	0,31	0,32	0,13	0,12	0,90	0,79	0,51	0,34	0,34							
F9	18.01.2021	0	958	Weizenst. P20.7	5	0,20	0,16	0,15	0,16	0,18	0,16	0,08	0,24	0,33	0,43	0,35	0,27	0,23							
F10	19.01.2021	-1	951	Weizenst. P20.7	5	0,20	0,20	0,18	0,17	0,15	0,14	0,09	0,21	0,15	0,14	0,15	0,15	0,13							
F11	19.01.2021	0	950	Weizenst. P20.7	5	0,23	0,23	0,21	0,19	0,17	0,16	0,09	0,23	0,17	0,16	0,16	0,17	0,15							
F12	19.01.2021	0	949	Weizenst. P20.7	5	0,23	0,17	0,11	0,15	0,16	0,16	0,09	0,25	0,36	0,44	0,35	0,27	0,24							
H5	17.06.2021	27	951	Malzstaub P21.1	5	1,52	1,36	1,17	0,87	1,04	1,10	0,82	1,56	1,55	1,61	2,00	2,02	1,63							
H6	17.06.2021	29	951	Malzstaub P21.1	5	1,33	1,30	1,18	1,10	0,85	1,07	0,61	1,34	1,30	1,24	1,18	1,02	0,88							
H7	18.06.2021	25	951	Malzstaub P21.1	5	1,00	0,95	0,93	0,76	0,66	0,81	0,51	1,02	1,00	1,01	0,96	0,74	0,75							
I1	21.06.2021	21	941	Weizenstärke P21.2	5	1,04	0,75	0,78	0,85	0,92	1,00	0,99	1,13	1,46	1,43	2,15	2,82	2,58							
I2	21.06.2021	23	946	Weizenstärke P21.2	5	0,53	0,47	0,38	0,27	0,29	0,32	0,17	0,22	0,60	0,61	0,49	0,35	0,32							
I3	26.06.2021	15	953	Weizenstärke P21.2	5	0,37	0,26	0,25	0,26	0,29	0,23	0,07	0,16	0,51	0,51	0,59	0,42	0,34							
I4	26.06.2021	18	954	Weizenstärke P21.2	5	0,21	0,19	0,18	0,16	0,17	0,16	0,08	0,08	0,24	0,23	0,23	0,20	0,16							
J1	28.06.2021	22	952	Weizenmehl P20.1	5	0,56	0,48	0,44	0,44	0,42	0,38	0,22	0,23	0,62	0,66	0,64	0,48	0,37							
J2	28.06.2021	25	952	Weizenmehl P20.1	5	0,39	0,36	0,33	0,30	0,30	0,31	0,17	0,15	0,41	0,45	0,46	0,39	0,31							
J3	28.06.2021	28	952	Weizenmehl P20.1	5	0,29	0,29	0,29	0,29	0,28	0,27	0,18	0,12	0,32	0,34	0,35	0,30	0,25							

DE: Kopf

Tabelle A.6: Alle am Rundschachtelevator gemessene maximale Explosionsdrücke P_{m,p} bei Druckentlastung am Elevatorkopf.

Vers.	Datum	Temp. [°C]	Luftd. [mbar]	Produkt	E _i [kJ]	Förderschacht										Rücklaufschacht							
						F1	F2	F3	F4	F5	F6	F7	F8/F1.1	F2.1	F3.1	F4.1	F5.1	F6.1					
[-]	[-]	[-]	[-]	[-]	[-]	t _f [s]	t _f [s]	t _f [s]	t _f [s]	t _f [s]	t _f [s]	t _f [s]	t _f [s]	t _f [s]	t _f [s]	t _f [s]	t _f [s]	t _f [s]	t _f [s]	t _f [s]	t _f [s]	t _f [s]	
B1	06.08.2014	18	k.A	Malzstaub (1) 3	2	0,357	0,287	0,315	0,213	0,236	0,232	0,155	0,069	0,362	0,392	0,141	0,249	0,211					
B2	06.08.2014	19	k.A	Malzstaub (1) 3	2	0,344	0,321	0,326	0,203	0,209	0,222	0,184	0,098	0,339	0,385	0,165	0,254	0,236					
C1	11.08.2014	17	953	getr. Maisstärke	2	0,550	0,250	0,210	0,100	0,190	0,220	0,260	0,110	0,520	1,180	0,580	0,510	0,390					
C2	11.08.2014	19	953	getr. Maisstärke	2	0,440	0,240	0,240	0,079	0,150	0,180	0,180	0,110	0,420	0,600	0,180	0,220	0,190					
C3	11.08.2014	19	953	getr. Maisstärke	2	0,370	0,200	0,180	0,077	0,160	0,170	0,180	0,099	0,350	0,650	0,250	0,290	0,210					
D1	15.01.2015	2	950	Malzstaub 4.14.4.2	2	0,019	0,007	0,108	0,067	0,006	0,150	0,015	0,009	0,011	0,010	0,010	0,006	0,016					
D2	15.01.2015	2	950	Malzstaub 4.14.4.2	2	0,016	0,003	0,009	0,016	0,002	0,046	0,023	0,009	0,007	0,006	0,006	0,007	0,015					
D3	15.01.2015	2	950	Malzstaub 4.14.4.2	5	0,160	0,138	0,220	0,100	0,436	0,441	0,358	0,137	0,196	0,206	0,185	0,296	0,345					
E1	29.02.2016	0	947	Maisstärke 3402	5	0,228	0,038	0,094	0,113	0,201	0,167	0,050	0,062	0,331	0,544	0,283	0,242	0,196					
E2	29.02.2016	0	948	Maisstärke 3402	5	0,208	0,063	0,150	0,133	0,134	0,107	0,055	0,047	0,284	0,345	0,143	0,129	0,106					
E7	01.03.2016	0	953	Maisstärke 3402	5	0,180	0,058	0,150	0,099	0,095	0,087	0,055	0,054	0,230	0,197	0,099	0,099	0,089					
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	0,254	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	0,070	0,049					
F3	14.01.2021	-1	958	Maisstärke 3402	5	0,083	0,086	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	0,081	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	0,229	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	0,218	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	0,258	0,127	0,113	0,085	0,099	0,116					

DE: Kopf, Schächte, Fuß

Tabelle A.7: Alle am Rundschachtelevator gemessene Flammenzeiten t_f bei Druckentlastung an Elevatorkopf, -schächten und -fuß.

Vers.	Datum	Temp. [°C]	Luftd. [mbar]	Produkt	E _i [kJ]	Förderschacht										Rücklaufschacht									
						F1	F2	F3	F4	F5	F6	F7	F8/F1.1	F2.1	F3.1	F4.1	F5.1	F6.1							
[-]	[-]	[°C]	[mbar]	[-]	[kJ]	t _f [s]	t _f [s]	t _f [s]	t _f [s]	t _f [s]	t _f [s]	t _f [s]	t _f [s]	t _f [s]	t _f [s]	t _f [s]	t _f [s]	t _f [s]	t _f [s]	t _f [s]	t _f [s]	t _f [s]	t _f [s]	t _f [s]	
A1	31.07.2014	k.A	k.A	Weizenmehl	5	0,091	0,093	0,095	0,093	0,085	0,079	0,259	0,041	0,091	0,086	0,074	0,078	0,070							
A2	04.08.2014	k.A	k.A	Weizenmehl	5	0,074	0,065	0,068	0,067	0,056	0,056	0,040	0,045	0,091	0,103	0,060	0,060	0,057							
B3	06.08.2014	21	k.A	Malzstaub (1) 3	2	0,941	0,900	0,767	0,008	0,343	0,432	0,244	0,100	0,963	0,948	0,348	0,521	0,427							
B4	07.08.2014	19	k.A	Malzstaub (1) 3	2	1,112	1,074	0,958	0,495	0,464	0,012	0,377	0,142	1,129	1,103	0,461	0,610	0,556							
C4	12.08.2014	14	954	getr. Maisstärke	2	0,858	0,457	0,267	0,122	0,200	0,220	0,185	0,102	0,872	0,884	0,200	0,267	0,227							
C5	12.08.2014	17	954	getr. Maisstärke	2	0,903	0,565	0,404	0,186	0,309	0,269	0,259	0,148	1,035	1,353	0,424	0,429	0,328							
C6	12.08.2014	17	954	getr. Maisstärke	2	1,129	0,787	0,462	0,200	0,330	0,360	0,327	0,130	1,201	1,433	0,575	0,543	0,484							
D4	19.01.2015	4	956	Malzstaub 4.14.4.2	5	0,590	0,473	0,416	0,322	0,511	0,545	0,343	0,133	0,625	0,590	0,296	0,337	0,409							
D5	19.01.2015	4	956	Malzstaub 4.14.4.2	5	0,087	0,079	0,076	0,071	0,105	0,144	0,126	0,063	0,089	0,083	0,070	0,105	0,133							
D9	21.01.2015	8	955	Malzstaub 4.14.4.2	5	1,223	1,077	0,882	0,485	0,507	0,615	0,353	0,136	1,261	1,220	0,481	0,507	0,466							
E3	29.02.2016	0	948	Maisstärke 3402	5	0,332	0,103	0,233	0,119	0,097	0,099	0,033	0,035	0,401	0,414	0,151	0,133	0,102							
E4	01.03.2016	0	956	Maisstärke 3402	5	0,213	0,066	0,162	0,124	0,094	0,081	0,036	0,043	0,540	0,629	0,189	0,164	0,103							
F5	15.01.2021	-3	955	Weizenst. P20.5	5	0,127	0,112	0,104	0,068	0,072	0,070	0,056	0,130	0,096	0,068	0,058	0,077	0,069							
F6	18.01.2021	0	959	Weizenst. P20.5	5	0,067	0,073	0,054	0,042	0,045	0,049	0,034	0,075	0,128	0,138	0,064	0,059	0,050							
F7	18.01.2021	0	959	Weizenst. P20.5	5	0,056	0,061	0,048	0,041	0,043	0,045	0,032	0,065	0,073	0,067	0,048	0,049	0,046							
F8	18.01.2021	0	959	Weizenst. P20.5	5	0,396	0,345	0,207	0,095	0,124	0,106	0,056	0,403	0,402	0,243	0,108	0,131	0,101							
G4	25.01.2021	-1	939	getr. Maisst. P19.1	5	0,395	0,430	0,292	0,116	0,166	0,171	0,108	0,432	0,460	0,574	0,186	0,254	0,190							
G5	26.01.2021	0	953	getr. Maisst. P19.1	5	1,148	0,907	0,473	0,186	0,324	0,289	0,268	1,192	1,243	1,313	0,618	0,629	0,515							
G6	26.01.2021	0	953	getr. Maisst. P19.1	5	0,404	0,343	0,246	0,142	0,174	0,145	0,105	0,412	0,417	0,456	0,186	0,235	0,166							
G7	26.01.2021	0	954	getr. Maisst. P19.1	5	0,429	0,262	0,183	0,107	0,146	0,141	0,114	0,474	0,593	0,772	0,230	0,283	0,216							
H1	14.06.2021	29	956	Malzstaub P21.1	5	1,238	1,064	0,929	0,607	0,895	0,908	0,574	1,283	1,316	1,460	1,229	1,198	1,229							
H2	15.06.2021	29	955	Malzstaub P21.1	5	0,751	0,669	0,553	0,279	0,375	0,466	0,311	0,764	0,756	0,699	0,351	0,496	0,463							
H3	16.06.2021	24	952	Malzstaub P21.1	5	0,962	0,859	0,665	0,401	0,470	0,592	0,422	0,976	0,953	1,005	0,680	0,744	0,669							
H4	16.06.2021	31	951	Malzstaub P21.1	5	0,893	0,806	0,673	0,421	0,438	0,466	0,277	0,900	0,851	0,886	0,443	0,522	0,488							

DE: Kopf, Schächte

Tabelle A.8: Alle am Rundschachtelevator gemessene Flammenzeiten t_f bei Druckentlastung an Elevatorkopf und -schächten.

Vers.	Datum	Temp.	Luftd.	Produkt	E _i	Förderschacht										Rücklaufschacht									
						F1	F2	F3	F4	F5	F6	F7	F8/F1.1	F2.1	F3.1	F4.1	F5.1	F6.1							
[-]	[-]	[°C]	[mbar]	[-]	[kJ]	t _f [s]	t _f [s]	t _f [s]	t _f [s]	t _f [s]	t _f [s]	t _f [s]	t _f [s]	t _f [s]	t _f [s]	t _f [s]	t _f [s]	t _f [s]	t _f [s]	t _f [s]	t _f [s]	t _f [s]	t _f [s]	t _f [s]	
A3	05.08.2014	k.A	k.A	Weizenmehl	5	0,317	0,288	0,265	0,253	0,233	0,204	0,186	0,111	0,364	0,402	0,377	0,283	0,204							
A4	05.08.2014	k.A	k.A	Weizenmehl	5	0,327	0,353	0,395	0,401	0,393	0,344	0,225	0,113	0,326	0,325	0,320	0,317	0,287							
B5	07.08.2014	19	k.A	Malzstaub (1) 3	2	1,901	1,853	1,856	0,007	2,653	2,428	1,846	0,004	2,119	2,207	2,348	2,872	3,797							
B6	07.08.2014	19	k.A	Malzstaub (1) 3	2	1,424	1,407	1,431	1,413	1,295	1,529	0,925	0,245	1,391	1,404	0,003	1,710	1,441							
B7	11.08.2014	14	k.A	Malzstaub (1) 3	2	2,418	2,472	2,472	2,404	2,525	2,695	2,202	0,824	2,684	2,735	2,777	3,378	4,108							
D6	20.01.2015	6	957	Malzstaub 4.14.4.2	5	1,884	2,153	2,151	2,144	2,011	1,776	1,347	0,515	2,020	2,053	2,037	2,147	2,177							
D7	20.01.2015	8	957	Malzstaub 4.14.4.2	5	0,729	0,561	0,660	0,586	0,594	0,691	0,557	0,141	1,480	1,621	1,775	2,152	1,611							
D8	21.01.2015	8	955	Malzstaub 4.14.4.2	5	0,841	0,853	0,807	0,802	0,820	0,856	0,653	0,279	1,296	1,400	1,568	1,576	1,274							
E5	01.03.2016	0	956	Maisstärke 3402	5	0,619	0,256	0,663	0,486	0,387	0,406	0,119	0,074	0,756	0,745	0,605	0,435	0,371							
E6	01.03.2016	0	956	Maisstärke 3402	5	0,839	0,291	0,486	0,367	0,313	0,325	0,132	0,124	0,905	0,788	0,508	0,336	0,338							
F9	18.01.2021	0	958	Weizenst. P20.7	5	0,205	0,155	0,146	0,158	0,181	0,156	0,081	0,241	0,329	0,426	0,346	0,273	0,229							
F10	19.01.2021	-1	951	Weizenst. P20.7	5	0,204	0,204	0,179	0,170	0,153	0,140	0,091	0,205	0,151	0,137	0,149	0,150	0,131							
F11	19.01.2021	0	950	Weizenst. P20.7	5	0,227	0,228	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	5	0,226	0,169	0,114	0,149	0,162	0,165	0,095	0,253	0,357	0,437	0,354	0,272	0,241							
H5	17.06.2021	27	951	Malzstaub P21.1	5	1,520	1,355	1,170	0,872	1,042	1,100	0,821	1,562	1,554	1,605	2,000	2,015	1,630							
H6	17.06.2021	29	951	Malzstaub P21.1	5	1,332	1,300	1,178	1,095	0,851	1,069	0,607	1,341	1,304	1,240	1,183	1,020	0,884							
H7	18.06.2021	25	951	Malzstaub P21.1	5	1,000	0,946	0,930	0,759	0,661	0,805	0,509	1,019	0,997	1,012	0,960	0,738	0,746							
I1	21.06.2021	21	941	Weizenstärke P21.2	5	1,037	0,748	0,784	0,853	0,924	1,000	0,989	1,134	1,460	1,431	2,145	2,820	2,580							
I2	21.06.2021	23	946	Weizenstärke P21.2	5	0,534	0,473	0,383	0,269	0,288	0,321	0,174	0,217	0,596	0,610	0,489	0,347	0,320							
I3	26.06.2021	15	953	Weizenstärke P21.2	5	0,365	0,257	0,249	0,260	0,291	0,229	0,070	0,163	0,508	0,510	0,592	0,415	0,344							
I4	26.06.2021	18	954	Weizenstärke P21.2	5	0,209	0,185	0,176	0,158	0,165	0,158	0,075	0,084	0,241	0,232	0,229	0,200	0,162							
J1	28.06.2021	22	952	Weizenmehl P20.1	5	0,556	0,477	0,444	0,444	0,419	0,379	0,216	0,225	0,623	0,660	0,639	0,477	0,366							
J2	28.06.2021	25	952	Weizenmehl P20.1	5	0,387	0,360	0,327	0,297	0,295	0,314	0,172	0,153	0,410	0,445	0,461	0,389	0,312							
J3	28.06.2021	28	952	Weizenmehl P20.1	5	0,294	0,288	0,291	0,290	0,284	0,273	0,176	0,115	0,315	0,343	0,348	0,302	0,254							

DE: Kopf

Tabelle A.9: Alle am Rundschachtelevator gemessene Flammenzeiten t_f bei Druckentlastung am Elevatorkopf.

Anhang B

Zeichnungen und Datenblätter

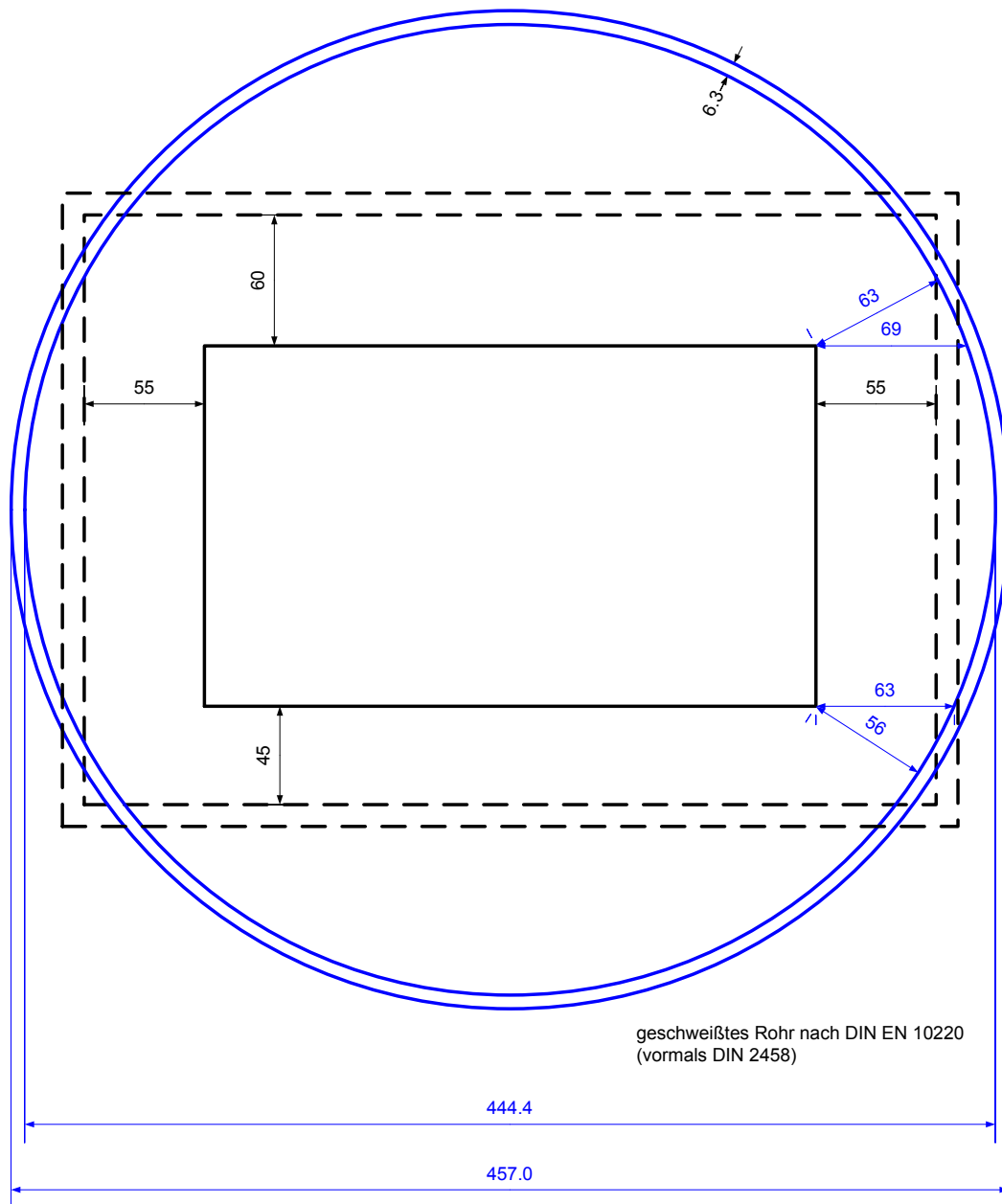
Bezeichnung	Wert
Gesamtlänge des Elevator	$L = 15125 \text{ mm}$
Schachtabbreite	$b_S = 390 \text{ mm}$
Schachttiefe	$a_S = 270 \text{ mm}$
Querschnittsfläche Schacht	$A_S = 0,105 \text{ m}^2$
Becherbreite	$b_B = 280 \text{ mm}$
Bechertiefe	$a_B = 165 \text{ mm}$
Becherbelegung	$B = 7,5 \text{ Becher/m}$
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 Kopf	$A_{E,K} = 0,102 \text{ m}^2$
Entlastungsfläche Schächte (je)	$A_{E,S} = 0,105 \text{ m}^2$
Entlastungsfläche Fuß	$A_{E,F} = 0,073 \text{ m}^2$

Tabelle B.1: Daten und Abmessungen des verwendeten Rechteckschachtelevators [9].

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	$A_{E,K} = 0,180 \text{ m}^2$
Entlastungsfläche Schächte (je)	$A_{E,S} = 0,156 \text{ m}^2$
Entlastungsfläche Fuß	$A_{E,F} = 0,114 \text{ m}^2$

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

Umbau Elevator auf Rundschächte (Variante 1)



Querschnittsfläche Rechteckschacht: 0.1053 m²
 Querschnittsfläche runder Schacht: 0.1551 m²

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

2012-01-22 Sch

Abbildung B.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
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	-	-	-	-	-

Tabelle B.3: Messstellenübersicht 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	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	-

Tabelle B.4: Messstellenübersicht der verwendeten Flammensensoren.

Datenblatt der verwendeten piezoelektrischen Druck-
aufnehmer 7031 der Firma Kistler.

Quarz-Drucksensor, beschleunigungskompensiert
Capteur pression à quartz, avec compensation d'accélération
Quartz Pressure Sensor, Acceleration-Compensated

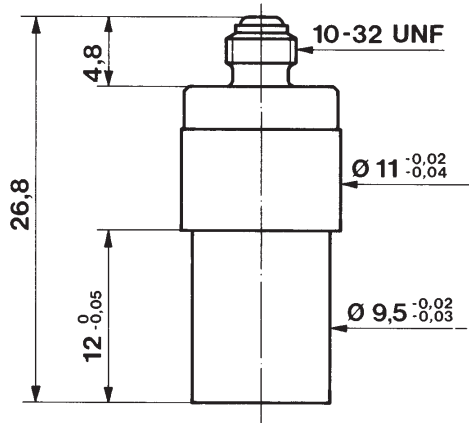
7031

Quarz Drucksensor zum Messen dynamischer und quasistatischer Drücke bis 250 bar bei Temperaturen bis 200 °C. Der eingebaute Beschleunigungssensor kompensiert Störsignale die durch Schock oder Vibration in Richtung der Sensorachse entstehen.

Capteur de pression à quartz pour mesurer des pressions dynamiques et quasistatiques jusqu'à 250 bar à des températures jusqu'à 200 °C. L'accéléromètre incorporé compense les signaux d'interférence provenant des chocs et vibrations dans la direction de l'axe du capteur.

Quartz pressure sensor for measuring dynamic and quasistatic pressures up to 250 bar at temperatures up to 200 °C. The built-in accelerometer compensates interference signals produced by shock or vibration in the direction of the sensor axis.

- Beschleunigungskompensiert
Compensé aux accélération
Acceleration compensated
- Hohe Empfindlichkeit
Haute sensibilité
High sensitivity
- Temperaturen bis zu 200 °C
Températures jusqu'à 200 °C
Temperatures up to 200 °C



2:1

Technische Daten

Données techniques

Technical Data

Bereich	Gamme	Range	bar	0 ... 250
Kalibrierte Teilbereiche	Gamme partielles étalonnées	Calibrated partial ranges	bar	0 ... 25
Überlast	Surcharge	Overload	bar	0 ... 2,5
Empfindlichkeit	Sensibilité	Sensitivity	bar	350
Eigenfrequenz	Fréquence propre	Natural frequency	pC/bar	≈ -55
Linearität	Linéarité	Linearity	kHz	≈80
Beschleunigungsempfindlichkeit	Sensibilité aux accélérations	Acceleration sensitivity	%FSO	≤ ±1
Betriebstemperaturbereich	Gamme de température d'utilisation	Operating temperature range	bar/g	<0,0001
Temperaturkoeffizient der Empfindlichkeit	Coefficient de température de la sensibilité	Temperature coefficient of sensitivity	°C	-150 ...200
Isolationswiderstand	Résistance d'isolement	Insulation resistance	%/°C	0,02
Stoßfestigkeit	Résistance au choc	Shock resistance	TΩ	≥10
Kapazität	Capacité	Capacitance	g	5000
Gewicht	Poids	Weight	pF	20
Stecker, Teflon-Isolator	Connecteur, isolateur en téflon	Connector, teflon insulator	g	10,8
				10-32 UNF

1 N (Newton) = 1 kg·m·s⁻² = 0,1019... kp = 0,2248... lbf; 1 kp = 1 kgf = 9,80665 N; 1 inch = 25,4 mm; 1 kg = 2,2046... lb; 1 Nm = 0,73756... lbft

* In all Kistler documents, the decimal sign is a comma on the line (ISO 31-0:1992).

Beschreibung

Description

Description

Der zu messende Druck wirkt über die Membrane auf das Quarzkristall-Messelement, das den Druck p (bar) in eine elektrische Ladung Q (pC = pico-Coulomb) umwandelt. Die Membrane aus rostfreiem Stahl ist mit dem Sensorgehäuse aus rostfreiem Stahl hermetisch und bündig verschweisst. Das durch die Masse des Sensors bei Beschleunigung (Schock oder Vibration) erzeugte Signal wird durch das Signal mit umgekehrten Vorzeichen eines eingebauten Beschleunigungssensors kompensiert.

Par l'intermédiaire du diaphragme, la pression agit sur l'élément de mesure à quartz qui transforme la pression p (bar) en charge électrique Q (pC = pico-Coulomb). Le diaphragme en acier inoxydable est soudé hermétiquement, au ras du front, au boîtier en acier inoxydable. Les signaux dus aux accélérations (choque ou vibrations) sont compensés par un signal de polarité inverse provenant d'un accéléromètre compensateur incorporé.

The measured pressure acts through the diaphragm on the quartz crystal measuring element, which transforms the pressure p (bar) into an electric charge Q (pC = pico-Coulomb). The stainless steel diaphragm is welded flush and hermetically to the stainless steel sensor housing. The signal produced by acceleration (shock or vibration) due to the sensor mass, is compensated by a signal of inverse polarity yielded by the built-in accelerometer.

Der Stecker-Anschluss ist mit dem Gehäuse verschweisst, jedoch ist sein Teflon-Isolator nicht völlig dicht.

La prise électrique est soudée au boîtier, cependant son isolateur en téflon n'est pas rigoureusement étanche.

The connector is welded to the body, but its teflon insulator is not absolutely tight.

Anwendung

Der Drucksensor Typ 7031 eignet sich besonders für die Messung schneller Druckverläufe an stark vibrierenden Messobjekten. Dieser Sensor ist rund 10 mal weniger vibrationsempfindlich als der Standardsensor Typ 601A. Bei besonders beschränkten Einbaueverhältnissen oder sehr hohen Messfrequenzen ist der Drucksensor 6031 zu verwenden.

Montage

Der Sensor kann mittels eines Montagenippels (Fig. 1) oder eines Steckernippels (Fig. 2) im Messobjekt oder dem Adapter montiert werden. Bei der Montage nach Fig. 2 werden Sensor und Steckernippel zu einer Montageeinheit zusammenschraubt. Die Trennfläche kann mit "Loctite" gedichtet werden.

Siehe auch Datenblätter für:

Werkzeuge	4.012
Adapter	4.016
Steckernippel	4.014
Kabel	15.035

Application

Le capteur type 7031 est adapté à la mesure de variations rapides de pression dans des dispositifs vibrant. Ce capteur est à peu près 10-fois moins sensible aux vibrations que le capteur standard type 601A. On choisit le capteur miniature 6031 pour des dispositifs à dimensions réduites ou pour les fréquences très élevées.

Montage

Le capteur peut être monté directement dans le dispositif de mesure ou dans l'adaptateur à l'aide d'un écrou de montage (fig. 1) ou d'un écrou connecteur (fig. 2). Pour le montage selon fig. 2, le capteur et l'écrou connecteur forment une unité. La jonction capteur - écrou connecteur peut être rendue étanche avec du "Loctite".

Voir aussi les notices techniques suivantes:

Outils	4.012
Adaptateurs	4.016
Écrous connecteurs	4.014
Câbles	15.035

Application

The quartz pressure sensor Type 7031 is suited for dynamic pressure measurements on heaving vibrating objects. This sensor is about 10 times less sensitive to vibrations than the standard Type 601A. For very high frequencies or reduced mounting space the sensor 6031 is used.

Mounting

The sensor can be mounted directly into the measuring object or the adapter by means of a mounting nut (fig. 1) or a connecting nipple (fig. 2). When mounted with a connecting nipple, the latter is preassembled with the sensor to a mounting unit. The junction between nipple and sensor can with sealed by "Loctite".

See also datasheets for:

Tools	4.012
Adapters	4.016
Connecting nipples	4.014
Cables	15.035

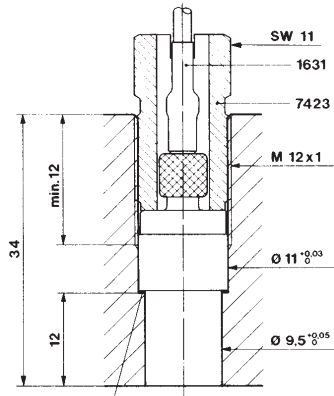


Fig. 1: 1135
1137

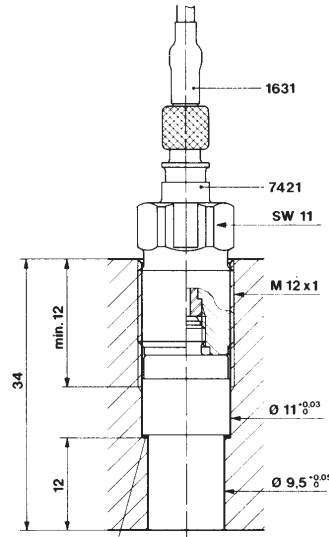


Fig. 2: 1135
1137

Zubehör

Cu-Dichtung	1135
Ni-Dichtung	1135A
Teflon-Dichtung	1137
Schlüssel für Steckernippel 7421	1303
Stufenbohrer	1333
Auszehwerkzeug für 10-32 UNF	1311
Montagenippel SW8	7423
Steckernippel 10-32UNF/10-32UNF	7421
Steckernippel 10-32UNF/BNC	7401
Steckernippel 10-32UNF/TNC	7411
Steckernippel luftgekühlt 10-32UNF/10-32UNF	7461
Schrumpfschlauch für Stecker	1021
Montageadapter M14 x 1,25	7501
Montageadapter M5	7503
Kühladapter M18 x 1,5	7505
Kühladapter M14 x 1,25	7507

Accessoires

Joint en cuivre	1135
Joint en nickel	1135A
Joint en téflon	1137
Clé pour écrou connecteur 7421	1303
Aléreuse progressive	1333
Outil extracteur pour 10-32 UNF	1311
Écrou de montage OCW8	7423
Écrou connecteur 10-32UNF/10-32UNF	7421
Écrou connecteur 10-32UNF/BNC	7401
Écrou connecteur 10-32UNF/TNC	7411
Écrou connecteur refroidi par air 10-32UNF/10-32UNF	7461
Gaine thermorétractable pour connecteur	1021
Adaptateur de montage M14 x 1,25	7501
Adaptateur de montage M5	7503
Adaptateur refroidi M18 x 1,5	7505
Adaptateur refroidi M14 x 1,25	7507

Type

Accessories

Copper seal	1135
Nickel seal	1135A
Teflon seal	1137
Key for connecting nipple 7421	1303
Step drill	1333
Extraction tool 10-32 UNF	1311
Mounting nut WS8	7423
Connecting nipple 10-32UNF/10-32UNF	7421
Connecting nipple 10-32UNF/BNC	7401
Connecting nipple 10-32UNF/TNC	7411
Connecting nipple air cooled 10-32UNF/10-32UNF	7461
Heat-shrink tubing for connector	1021
Mounting adapter M14 x 1,25	7501
Mounting adapter M5	7503
Cooling adapter M18 x 1,5	7505
Cooling adapter M14 x 1,25	7507

Datenblatt der verwendeten piezoelektrischen Druck-
aufnehmer 7261 der Firma Kistler.

**QUARZKRISTALL-NIEDERDRUCKAUFNEHMER
CAPTEUR DE BASSES PRESSIONS A QUARTZ
LOW PRESSURE QUARTZ TRANSDUCER**

Type

7261

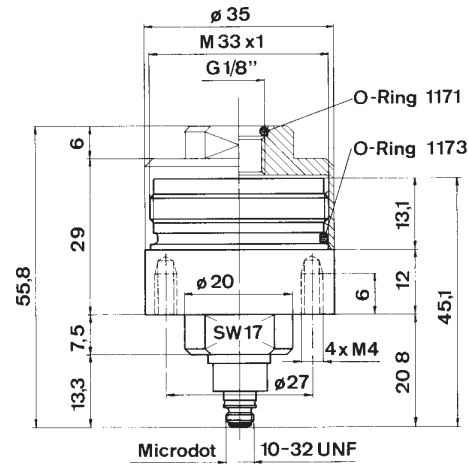
Quarzkristall-Niederdruckaufnehmer für die Messung dynamischer und quasi-statischer Drücke von Vakuum bis 10 bar. Hohe Eigenfrequenz, bündig aufgeschweisste Membrane.

Capteur de basses pressions à quartz pour la mesure de pressions dynamiques et quasi-statiques du vide jusqu'à 10 bar. Fréquence propre élevée, membrane soudée au ras du front.

Low pressure quartz transducer for dynamic and short term static pressure measurements from vacuum to 10 bar. High resonant frequency, flush welded diaphragm.



1:1



TECHNISCHE DATEN

DONNEES TECHNIQUES

TECHNICAL DATA

Messbereich	gamme de mesure	measuring range	bar	-1 ... 10
kalibrierte Teilbereiche	gammes partielles étalonnées	calibrated partial ranges	bar	0 ... 1
max. zulässiger Druck	pression maximale	max. pressure	bar	0 ... -1
Ansprechschwelle	résolution	resolution	bar	12
Empfindlichkeit	sensibilité	sensitivity	bar	$1,5 \cdot 10^{-5}$
Eigenfrequenz	fréquence propre	resonant frequency	pC/bar	2200
mit Deckel	avec couvercle	with cover	kHz	≈ 13
mit Röhrchen 1227	avec tuyau 1227	with tube 1227	kHz	≈ 2,5
Linearität	linéarité	linearity	kHz	≈ 0,35
Hysterese	hystérésis	hysteresis	%FSO	≤ ± 0,8
Totvolumen	volum mort	dead volume	%FSO	< 0,5
Volumenänderung	respiration	volume change	cm ³	1,5
Isolationswiderstand	résistance d'isolement	insulation resistance	mm ³ /bar	2,5
Kapazität	capacité	capacitance	Ω	> 5 · 10 ¹³
Beschleunigungsempfindlichkeit	sensibilité à l'accélération	acceleration sensitivity	pF	24
Temperaturkoeffizient der Empfindlichkeit	coefficient de température de la sensibilité	temperature coefficient of sensitivity	bar/g	< 10 ⁻³
Temperaturfehler	erreur de température	temperature error	%/°C	-0,02
Betriebstemperaturbereich	température d'utilisation	operating temperature range	bar/°C	0,015
zulässige Beschleunigung	accélération admissible	max. acceleration (shock)	°C	-40 ... 240
Gewicht	poids	weight	g	2000
			g	180

1 bar = 10⁵ N · m⁻² = 1,019... at = 14,50... psi; 1 at = 1 kp · cm⁻² = 1 kgf · cm⁻² = 0,980665 bar; 1 psi = 0,06894... bar; 1 in = 25,4 mm

Das vom Druckaufnehmer abgegebene Ladungssignal (pC = pico Coulomb) wird im K/AG SW/SS Ladungsverstärker in eine proportionale Ausgangsspannung umgewandelt; diese ist von der Länge des Aufnehmerkabels weitgehend unabhängig. Die maximal mögliche Ausgangsspannung am Standardverstärker 5001 beträgt 10 V. Im empfindlichsten Bereich ergeben sich 0,001 bar/V für den Aufnehmer 7261.

Le signal de charge fourni par le capteur (pC = pico Coulombs) est transformé en une tension de sortie proportionnelle dans l'amplificateur de charge K/AG SW/SS. Cette tension est indépendante de la longueur du câble de connexion dans des limites assez larges. La valeur maximale de la tension de sortie à l'amplificateur standard 5001 est de 10 V. 0,001 bar/V resultent sur la gamme la plus sensible pour le capteur 7261.

The charge signal of the transducer (pC = pico Coulombs) is transformed into a proportional output voltage in the K/AG SW/SS charge amplifier. Within wide limits, the output voltage does not depend on the length of the transducer cable. At the standard amplifier 5001 it has a max. value of 10 V. On the most sensitive range, 0,001 bar/V are obtained for the transducer 7261.

000-053m-08.74 (DB03.7261m)

BESCHREIBUNG

Der zu messende Druck wirkt über die Membrane auf das Quarzkristall Messelement, das den Druck in eine elektrische Ladung umwandelt. Die Membrane aus rostfreiem Stahl ist mit dem Aufnehmergehäuse aus rostfreiem Stahl hermetisch und bündig verschweisst. Die Quarze sind in hochempfindlicher Anordnung (Transversaleffekt) in der Quarzkammer eingebaut, letztere ist ihrerseits mit dem Gehäuse hermetisch verschweisst. Der abschraubbare Deckel und der Schlauchnippel vereinfachen in vielen Fällen den Anschluss an den Messdruck.

ANWENDUNG

Der Niederdruckaufnehmer 7261 eignet sich, ohne Deckel verwendet, für die Messung schneller Druckverläufe. Bei montiertem Deckel und Anschlussnippel reduziert sich die maximale Messfrequenz wegen der Bildung eines Helmholtz-Resonators beträchtlich. Quasistatische Messungen von einigen Minuten Dauer sind unter gewissen Bedingungen möglich.

Typische Anwendungen: Dynamische und quasistatische Druckmessungen, z.B. in Rohrleitungen von Gebläsen und Kompressoren zur Untersuchung des Schwingungsverhaltens der Luftsäulen, Messung der Druckverhältnisse an Vergasern von Ottomotoren im dynamischen Betrieb, Druckmessungen an pneumatischen Regelkreisen und logischen Schaltungen, Messung von Druckstößen in Heizkesseln, z.B. bei Ölfeuerungen, Messung von dynamischen Luftdruckschwankungen, z.B. Infraschall.

MONTAGE

Der Aufnehmer 7261 wird normalerweise nicht montiert, sondern nur durch einen Schlauch mit dem Messdruck verbunden. Zu diesem Zweck wird der Schlauchnippel 1227 (inkl. O-Ring-Dichtung 1171) mitgeliefert (Fig. 2). Müssen rasche Druckschwankungen gemessen werden, soll die Verbindungsleitung möglichst kurz sein und einen grossen Querschnitt aufweisen. Es empfiehlt sich in diesem Fall ein 1/8"-Gas-Rohr direkt in den Deckel einzuschrauben. Soll der Einbau bündig zum Messraum erfolgen, kann dazu entweder das Gewinde M33 x 1 verwendet werden (Fig. 3, linke Hälfte) oder man steckt die Frontpartie des Aufnehmers in eine Bohrung von 33 mm ϕ und befestigt den Aufnehmer mittels eines Flansches (Fig. 3, rechte Hälfte). Zur Abdichtung dient in allen Fällen der O-Ring 1173. Zur Montage des Aufnehmers stehen 4 Gewindelöcher M4 zur Verfügung (Fig. 1 und 2). Es empfiehlt sich, die Microdot-Steckverbindung mit einem Thermoschrumpfschlauch abzudichten und zu sichern.

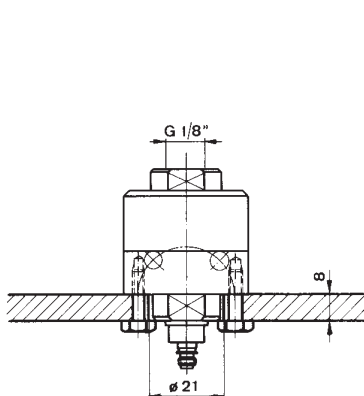


Fig. 1

DESCRIPTION

Par l'intermédiaire de la membrane, la pression agit sur l'élément de mesure à quartz, qui transforme la pression en charge électrique. La membrane en acier inoxydable est soudée hermétiquement, au ras du front, au boîtier en acier inoxydable. Les éléments à quartz sont montés, en un ensemble de haute sensibilité (effet transversal), dans la chambre à quartz, elle-même soudée hermétiquement au boîtier. Le couvercle à visser et le raccord simplifient en quelques cas la connexion à la pression.

APPLICATION

Sans couvercle, le capteur de basse pression 7261 se prête à la mesure de variations de pression rapides. Avec le couvercle et le raccord, la fréquence maximale de mesure est réduite considérablement à cause de la résonance de la cavité. Suivant les conditions, des mesures quasistatiques de quelques minutes de durée sont possibles.

Applications typiques: Mesure de pression dynamique et quasistatique, p.ex.: dans les souffleries et les compresseurs pour l'étude des oscillations des colonnes d'air, mesure des pressions dynamiques dans les carburateurs, mesures sur circuits de réglage et circuits logiques pneumatiques, mesure de coups de pressions dans des chaudières de chauffage, p.ex. dans des chauffages au mazout, mesure de variations dynamiques de la pression atmosphérique, p.ex.: infrasons.

MONTAGE

Normalement, le capteur 7261 n'est pas monté sur l'objet de la mesure, mais relié par un tuyau. A cette fin, le raccord 1227 (y compris le joint d'étanchéité "O" 1171) est fourni avec le capteur (Fig. 2). Pour mesurer des variations rapides de la pression, le tuyau de raccordement doit être court et de section important. Dans ce cas, il est recommandé de visser un tuyau 1/8" gaz directement dans le couvercle. Si le capteur doit être monté au ras de la chambre de mesure, on peut soit utiliser le filetage M33 x 1 (Fig. 3 à gauche) soit introduire le capteur avec sa partie frontale dans un alésage de 33 mm ϕ et le fixer par une bride (Fig. 3 à droite). Dans tous les cas l'anneau "O" 1173 assure l'étanchéité. Les 4 trous taraudés M4 peuvent être utilisés pour fixer le capteur (Fig. 1 et 2).

Il est recommandé d'assurer la connexion Microdot du câble par une gaine thermo-rétractable qui assure en même temps l'étanchéité.

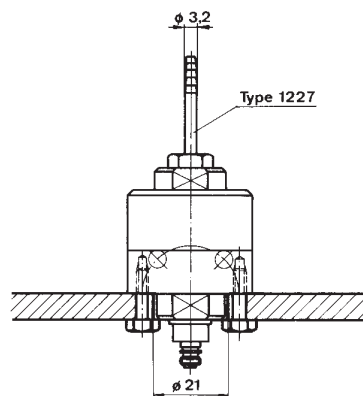


Fig. 2

DESCRIPTION

The measured pressure acts through the diaphragm on the quartz crystal measuring element which transforms the pressure into an electrostatic charge. The stainless steel diaphragm is welded flush and hermetically to the stainless steel transducer body. The quartz elements are mounted in a highly sensitive arrangement (transversal effect) in the quartz chamber, which is welded hermetically to the body. The screw-on cover and the hose nipple simplify in many cases the connection to the measured pressure.

APPLICATION

The low pressure transducer 7261 is suited for fast dynamic pressure measurements if used without cover. In case both cover and nipple are mounted, the frequency response is reduced considerably due to the Helmholtz resonator effect. Quasistatic measurements of several minutes duration are possible under appropriate conditions.

Typical applications: Dynamic and quasistatic pressure measurements, e.g. in pipes of blowers or compressors for investigating the dynamic behaviour of the air columns, pressure measurements in carburetors of combustion engines and in pneumatic control circuits and fluidics, measurement of pressure pulses in automatic oil firing plants, measurement of fast atmospheric pressure fluctuations, e.g. infrasound.

MOUNTING

Usually the transducer 7261 is not mounted on the test object but connected by a hose. For this purpose the hose nipple (including O-ring seal 1171) is supplied (Fig. 2). For measuring fast pressure variations, the connecting hose or pipe should be short and of adequate cross-section. For this case it is recommended to use a 1/8" gas pipe that is screwed directly into the cover. If flush mounting is desired, the thread M33 x 1 may be used (Fig. 3, left half) or the transducer may be introduced with its front part into a bore of 33 mm ϕ and fixed with a flange (Fig. 3, right half). In all cases the O-ring 1173 is used for sealing. The four threaded holes M4 may be used for fixing the transducer (Fig. 1 and 2).

It is recommended to use a thermo-shrink-sleeve to seal and secure the Microdot-connection of the transducer cable.

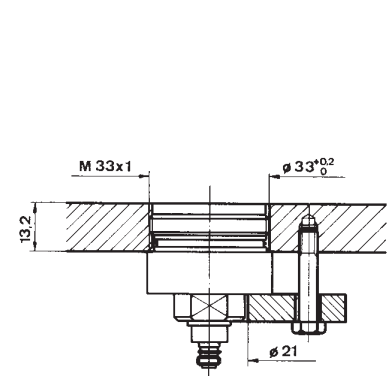


Fig. 3

Datenblatt der verwendeten Ladungsverstärker 5015
der Firma Kistler.

Ladungsmeter

Typ 5015A...

Universell für die piezoelektrische Messtechnik einsetzbar

Dieses Gerät kann überall eingesetzt werden, wo mechanische Größen mit piezoelektrischen Sensoren gemessen werden. Piezoelektrische Sensoren geben eine elektrische Ladung ab, welche sich direkt proportional zu der auf den Sensor einwirkenden Belastung verändert.

- Einkanal-Ladungsverstärker
- Piezotron-Eingang (Option)
- Measure-Sprung kompensiert
- Flüssigkristallanzeige (128 x 128 Pixel)
- menügeführte Bedienung
- direkte Signalauswertung
- flexibel einstellbare Hoch- und Tiefpassfilter
- kompatibel zum Ladungsverstärker Typ 5011B
- PC-Software und Virtual Instrument Driver für LabVIEW™

Beschreibung

Der Typ 5015A... ist nicht nur ein Ladungsverstärker, sondern ein universelles Ladungsmeter mit grafikfähiger Flüssigkristallanzeige. Die Ausführung als 19"-Rack-Einschub eignet sich jedoch auch für messtechnische Aufgaben im industriellen Umfeld. Es können Momentan-, Spitzen- und Mittelwerte sowie Referenzabweichungen dargestellt werden. Durch den Einsatz modernster Technologie konnten die naturgemäss vorhandenen Störgrößen nahezu eliminiert werden. Das Gerät zeichnet sich durch hervorragende technische Daten einerseits und eine äusserst einfache Bedienung andererseits aus.

Anwendung

Das Gerät wurde als Nachfolger des bewährten Ladungsverstärkers Typ 5011B für die Bereiche Forschung, Entwicklung und Labor konzipiert.



Technische Daten

Ladungseingang

Steckertyp	BNC neg.	
Messbereich FS	pC	±2 ... 2'200'000
Messfehler		
Bereich FS <10 pC	%	<±3
Bereich FS <100 pC	%	<±1
Bereich FS ≥100 pC	%	<±0,5
Drift, Messart DC (Long)		
bei 25 °C	pC/s	<±0,03
bei 50 °C	pC/s	<±0,3
Max. Gleichtaktspannung zwischen Ein- und Ausgangsmasse	V	<±30
Überlastung (Overload)	%FS	≈±105

Spannungseingang (Piezotron®)

Steckertyp	BNC neg.	
Messbereich FS	mV	±2 ... 20'000
Messfehler		
Bereich FS <10 mV	%	<±3
Bereich FS <100 mV	%	<±1
Bereich FS ≥100 mV	%	±±0,5
Drift, Messart DC (Long)		
bei 25 °C	mV/s	<±0,03
bei 50 °C	mV/s	<±0,3
Max. Gleichtaktspannung zwischen Ein- und Ausgangsmasse	V	<±30
Überlastung (Overload)	%FS	±±105
Modus Piezotron		
Stromversorgung	mA	4 ±10 %
Eingangsspannungshub	V	0 ... 20

Spannungsausgang

Steckertyp	BNC neg.	
Ausgangsbereich FS	V	±10/±5/±2,5/±2
Ausgangsstrom	mA	<±2
Ausgangswiderstand	Ω	≈10
Measure-Sprung	elektr. korrigiert	
Measure-Sprung	mV	<±3
Korrekturzeit, inkl. Verzögerungszeit	ms	<15 ¹⁾
Nullpunktfehler	mV	<±2
Ausgangsstörsignal (0,1 Hz ... 1 MHz), Typ 5015Axxx0		
Bereich FS, TP-Filter aus		
2,000 ... 9,999 pC	mVpp	<140 ... <40
10,00 ... 99,99 pC	mVpp	<30 ... <10 ¹⁾
100,0 ... 999,9 pC	mVpp	<15 ... <7 ¹⁾
...	mVpp	<15 ... <7 ¹⁾
0,220 ... 2,200 nC	mVpp	<15 ... <7 ¹⁾
Bereich FS, TP-Filter ≤30 kHz		
2,000 ... 9,999 pC	mVpp	<60 ... <20
10,00 ... 99,99 pC	mVpp	<20 ... <7 ¹⁾
...	mVpp	<10 ... <5 ¹⁾
0,220 ... 2,200 nC	mVpp	<10 ... <5 ¹⁾
Ausgangsstörsignal (0,1 Hz ... 1 MHz), Typ 5015Axxx1		
Bereich FS, TP-Filter aus		
2,000 ... 9,999 pC, mV	mVpp	<220 ... <50
10,00 ... 99,99 pC, mV	mVpp	<50 ... <12 ¹⁾
100,0 ... 999,9 pC, mV	mVpp	<20 ... <7 ¹⁾
...	mVpp	<20 ... <7 ¹⁾
0,220 ... 2,200 nC	mVpp	<20 ... <7 ¹⁾
Bereich FS, TP-Filter ≤30 kHz		
2,000 ... 9,999 pC, mV	mVpp	<180 ... <50 ¹⁾

10,00 ... 99,99 pC, mV	mVpp	<30 ... <10 ¹⁾
100,0 ... 999,9 pC, mV	mVpp	<10 ... <5 ¹⁾
...	mVpp	<10 ... <5 ¹⁾
0,220 ... 2,200 nC	mVpp	<10 ... <5 ¹⁾

¹⁾ Werte gültig ab MCC-Version V2.xx

Frequenzeingang des Messverstärkers

DC (Long), TP-Filter aus		
Bandbreite (-3 dB)	kHz	≈0 ... 200
Gruppenlaufzeit	μs	≈10

Hochpassfilter (1. Ordnung)

Analog-Hochpassfilter		
DC (Long)		
Bereich FS Ladung, (Spannung)		
≥2 pC, (mV)	s	10'000
≥1'000 pC, (mV)	s	100'000
Zeitkonstanten		
Medium	s	10/100/1'000/2'200
Short	s	0,1/1/10/220
Toleranz	%	<±20

Mittels DSP berechnete Hochpassfilter-Funktionen

Zeitkonstanten		
Bereich FS Ladung, (Spannung)		
≥2 pC, (mV)	s	0,01/0,1/1
≥100 pC, (mV)	s	0,01/0,1/1/10
≥1'000 pC, (mV)	s	0,01/0,1/1/10/100
≥10'000 pC, (mV)	s	0,01/0,1/1/10/100
Toleranz	%	<±20
Grenzfrequenzen		
-3 dB	Hz	16/1,6/0,16/0,016/0,0016
-10 %	Hz	30/3/0,3/0,03/0,003
-5 %	Hz	50/5/0,5/0,05/0,005
-1 %	Hz	100/10/1/0,1/0,01
Toleranz	%	<±20

Tiefpassfilter

Mittels DSP berechnete Tiefpassfilter-Funktionen

Filterart	IIR, lineare Phase	
Ordnung	2. oder 5.	
Grenzfrequenz (-3 dB)	Hz	5 ... 30'000
Stufen	1/2/3/5	
Toleranz	%	<±10

Signalauswertung

Abtastraten		
TP-Filter ein	ksps	400
TP-Filter aus	ksps	1'000
Minimale Impulsdauer für die Erfassung von Minimum- und Maximumwert		
TP-Filter 5 Hz ... 30 Hz	µs	>2'500
TP-Filter 50 Hz ... 300 Hz	µs	>250
TP-Filter 500 Hz ... 3 kHz	µs	>25
TP-Filter 5 kHz ... 30 kHz	µs	>2,5
TP-Filter aus	µs	>1
Max. Integrationszeit für die Mittelwertbildung		
	min	<75
Integrationszeit für die Aktualisierungsrate der Flüssigkristallanzeige		
Momentanwert	ms	300
Signalauswertung	ms	300
Balkenanzeige	ms	17,5

Fernsteuerung "Remote Control"

Steckertyp	MiniDin-Rundstecker	
Steckerbelegung		
Eingänge mit internem Pull-up Widerstand		
Pin 4 (Eingang)	Fenster (fern)	
Pin 5 (Eingang)	Measure (fern)	
Pin 6	DGND	
Eingangsspiegel		
logisch inaktiv oder Eingang offen		
	V	3,5 ... 30
logisch aktiv		
	V(mA)	0 ... 1 (0 ... 4)
Verzögerungszeit		
Fenster (fern)	ms	<0,5
Measure (fern)	ms	<15

Digitale Messwertübertragung

Die PC-Software (Windows® oder der VI-Driver (LabVIEW™)) ermöglichen die kontinuierliche Übertragung der Messdaten über die serielle Schnittstelle RS-232C (nicht über IEEE-488).

Abtastraten	ksps	0,1/0,25/0,5/1
-------------	------	----------------

RS-232C Schnittstelle (galvanisch getrennt)

EIA-Standard	RS-232C	
Steckertyp	DB-9S (D-Sub)	
Steckerbelegung		
Pin 2	Rx/D	
Pin 3	Tx/D	
Pin 5	SG	
Max. Kabellänge bei		
9'600 bps	m	<15
19'200 bps	m	<15
38'400 bps	m	<12
57'600 bps	m	<10
115'200 bps	m	<5
Max. Eingangsspannung, dauernd		
	V	<±20
Max. Spannung zwischen Signalmasse- und Schutzerde		
	V _{RMS}	<20
Baud-Raten		
	bps	1'200/9'600/ 19'200/38'400/ 57'600/115'200
Daten-Bit		
		8
Stopp-Bit		
		1
Parität		
		keine
SW Handshake		
		kein

IEEE-488 Schnittstelle (Option)

Standard	IEEE-488.1-1987	
Steckertyp	Microribbon Serie 57 (24-polig)	
Max. Abstand zwischen den Geräten		
	m	2
Max. Buslänge		
	m	20
Max. Anzahl Geräte		
		15
Adressierbereich		
		0 ... 30
Funktion		
		Listener und Talker
Interface-Funktionen		
		SH1, AH1, L4, LE0, T6, TE0, SR1, RL2, PP0,DC1, DT1, C0, E1
Multiline Commands		
		DCL, SDC, GET, UNL, UNT, SPE, SPD
Uniline Commands		
		IFC, REN, EOI, SRQ, ATN

Netzanschluss

Netzsteckertyp (2P+E, Schutzklasse I)		IEC 320C14
Spannung umschaltbar	V~	115/230
Netzspannungstoleranz	%	-22, +15
Netzfrequenz	Hz	48 ... 62
Leistungsaufnahme	VA	≈20
Spannung zwischen Signalmasse und Schutzerde	V _{RMS}	<50
Sicherungen		
F1 (träge)	mA	100
F2 (träge)	mA	100

Übrige Daten

Schutzart		IP40, IEC 60529
Betriebstemperatur	°C	0 ... 50
Lagertemperatur	°C	-10 ... 70
Relative Luftfeuchtigkeit, nicht kondensierend	%	10 ... 80
Vibrationsfestigkeit (20 Hz ... 2 kHz, Dauer 16 min, Zyklus 2 min.)	g	<10
Stoßfestigkeit (1ms)	g	<200
Gehäuseabmessung mit Rahmen (BxHxT)	mm	105,3x142x253,15
ohne Rahmen (BxHxT)	mm	71,1x128,7x230
Frontplatte (gemäss DIN 41494, Teil 5)	HT/TE	3/14
Gewicht	kg	≈2,3

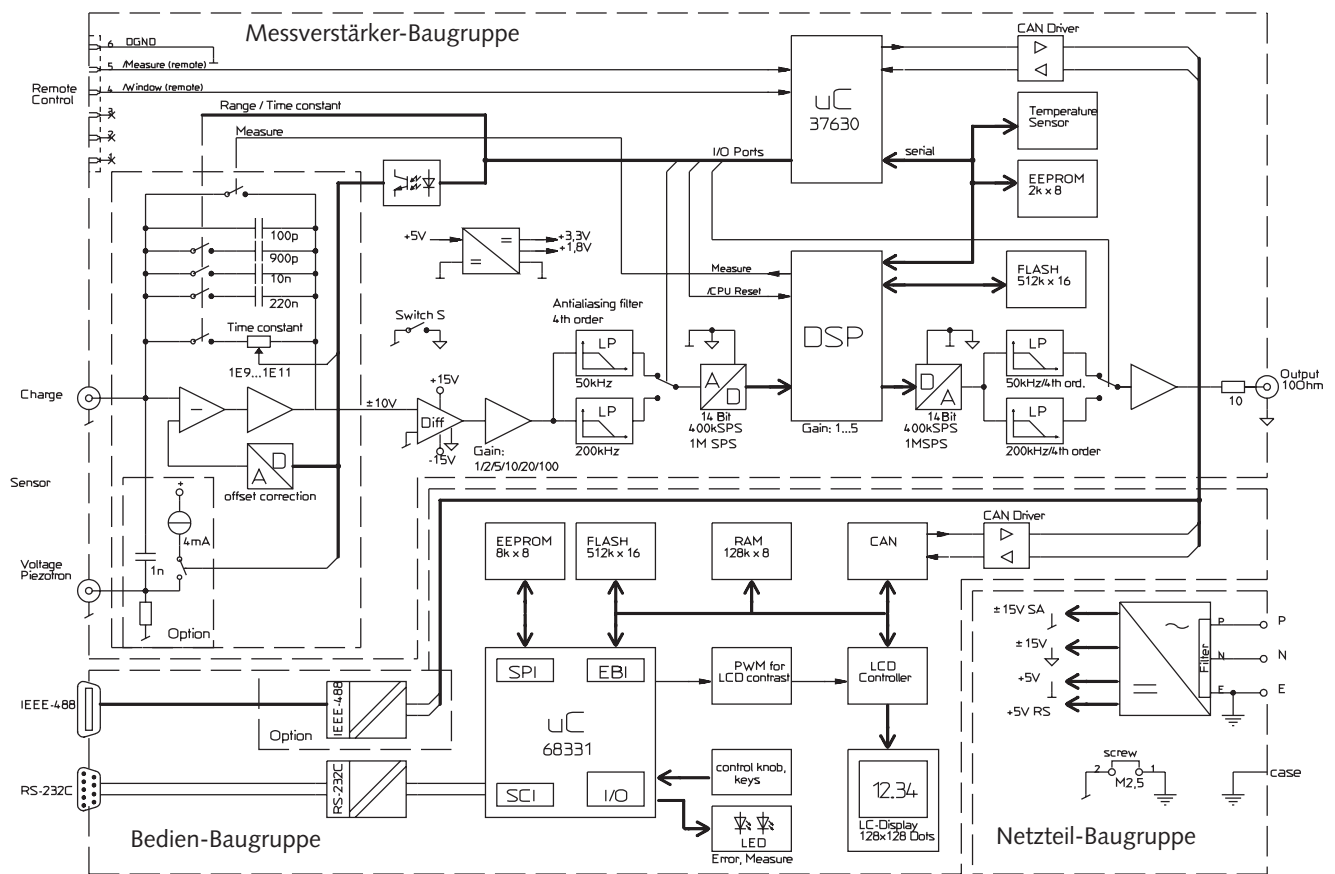


Bild 1: Blockschema des Ladungsmeter Typ 5015A...

000-297d-11.03 (DB11.5015Ad)

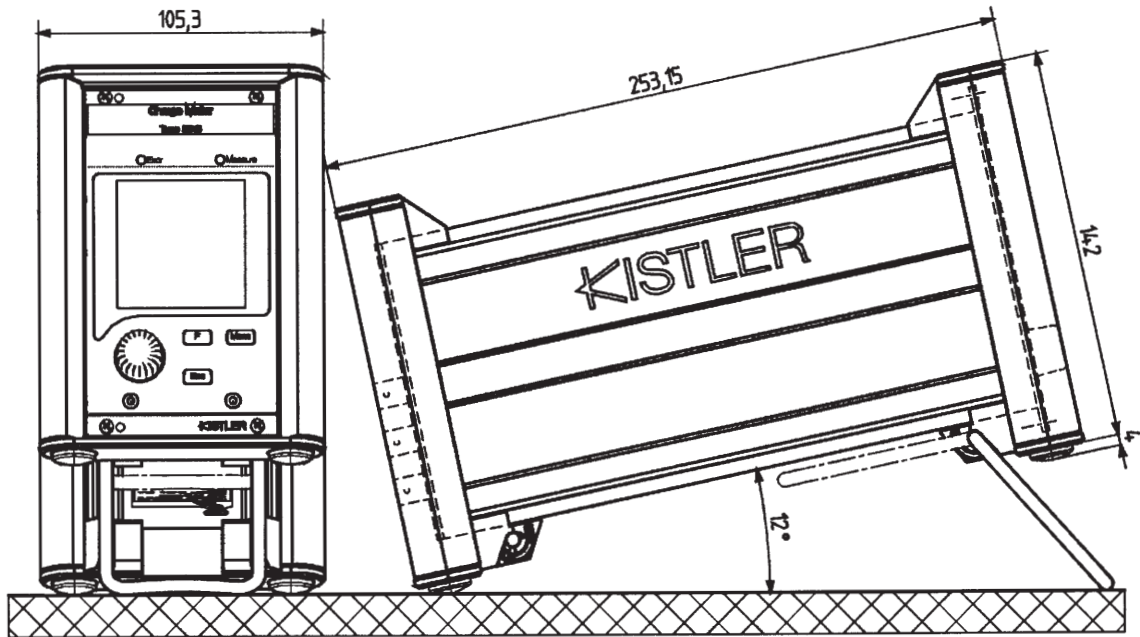


Bild 2: Tischgerät Typ 5015A1... (stapelbar)

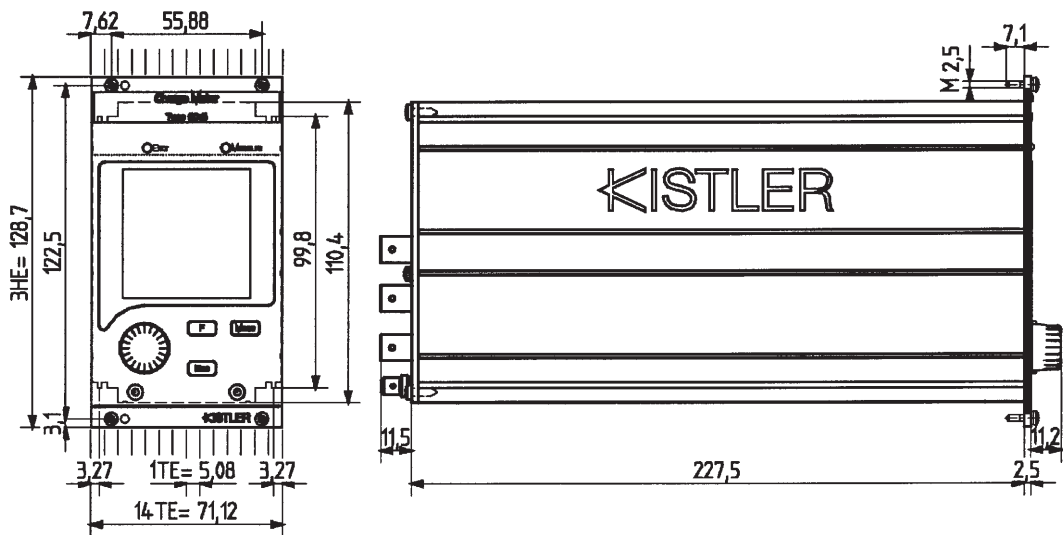


Bild 3: 19"-Rack-Einschub Typ 5015A0...

000-297d-11.03 (DB11.5015Ad)

Mitgeliefertes Zubehör

Ladungsmeter Typ 5015A... mit

- länderspezifischem Netzkabel
- Stecker für Fernsteuereingang 'Remote Control'
- Selbstklebeschild mit Netzspannungsangaben
- Flash-Loader mit aktueller Firmware
- Demo-Programm für die Visualisierung des Anzeige-Displays auf einem PC
- PC-Software und VI-Driver für LabVIEW™ für die Gerätekonfiguration und die Messdatenerfassung
- Bedienungsanleitung
- Kalibrierschein

Zubehör (optional)

- RS-232C Kabel, l = 5 m, Nullmodem, DB-9P/DB-9S, Typ 1200A27
- oder PC-Link-Kabel RS-232C, l = 3 m, DB-25P/DB-9S, Typ 1465A3
- dazu passender D-Sub-Adapter, DB-9P/DB-25S, Typ 1479

Gerätevarianten und Optionen

Die vollständige Typenbezeichnung des Ladungsmeters setzt sich aus der Grundtypenbezeichnung Typ 5015A... und vier weiteren Ziffern zusammen.

Der Grundtyp beinhaltet ein Einkanal-Ladungsmeter (mit Ladungseingang für piezoelektrische Sensoren) mit Bedieneinheit und RS-232C Schnittstelle in den folgenden Varianten:

Bestellschlüssel

Ausführung als 19"-Rack-Einschub nach DIN 41494; Breite 14 TE und Höhe 3 HE	0
Ausführung als Tischgerät mit Aufstellbügel	1
ohne Schnittstellenoption	0
mit IEEE-488 Schnittstelle (Option)	1
werksseitig auf 230 V~ eingestellt; Netzumschaltung auf 115 V ~ anwenderseitig jederzeit möglich	0
werksseitig auf 115 V~ eingestellt; Netzumschaltung auf 230 V~ anwenderseitig jederzeit möglich	1
ohne Spannungseingang	0
mit Spannungseingang für Sensoren mit eingebauter Piezotron®- Elektronik (Option)	1

5015A □ □ □ □

