Forschungsgesellschaft
für angewandte
Systemsicherheit und
Arbeitsmedizin

FSA- Forschungsbericht

Konstruktiver Explosionsschutz für Elevatoren

Dr. **M. Roser** BGN und FSA, Kappelrodeck
Dr.-Ing. **A. Vogl**, BGN und FSA, Mannheim
Prof. Dr. **S. Radandt**, FSA, Brühl

Projekt Nr.: F-05-0701

Datum: 15.06.2010

FSA Forschungsgesellschaft für angewandte Systemsicherheit und Arbeitsmedizin e.V.
Dynamostraße 7 – 11, D-68165 Mannheim

Projekt:	Konstruktiver Explosionsschutz von Elevatoren
Projekt-Nr.:	F-05-0701
Experimentelle Untersuchungen:	Versuchsanlage der BGN/FSA, Ganseck 4, 77876 Kappelrodeck
Datum der Untersuchungen:	18.05.2007 – 26.11.2007 02.09.2008 – 09.10.2008 (Malzstaub 2) 18.06.2009 – 24.06.2009 (zusätzliche Versuche mit Maisstärke)
Versuchs-durchführung:	W. Fischer, M. Roth, H. Wolf, Dr. Roser

Gliederung

		Seite
	Kurzfassung / Abstract	4
1.	Einführung	4
2.	Kenntnisstand und Zielsetzung	5
3.	Versuchsaufbau	7
4.	Explosionstechnische Untersuchungen	10
	4.1 Charakteristische Kenngrößen der verwendeten Stäube	10
	4.2 Versuchsdurchführung	10
	4.3 Versuchsergebnisse	12
	4.3.1 Ergebnisse mit Weizenmehl Typ 550	12
	4.3.2 Ergebnisse mit Malzstaub 1	16
	4.3.3 Ergebnisse mit Malzstaub 2	18
	4.3.4 Ergebnisse mit Maisstärke	19
5.	Zusammenfassung und Diskussion der Ergebnisse	21
6.	Literaturhinweise	26
7.	Anhang	28
	7.1 Bilddokumentation	
	7.2 Messergebnisse	
	7.3 Zeitliche Druck- und Flammenverläufe von ausgewählten Versuchen	
	7.4 Weitere Informationen zu den Kennzahlen der verwendeten Stäuben	

Kurzfassung

Becherelevatoren werden in großer Zahl für die Senkrechtförderung brennbarer Schüttgüter eingesetzt. In Abhängigkeit der Betriebsbedingungen muss im Innern sowohl mit dem Auftreten explosionsfähiger Staub/Luft-Gemische als auch mit wirksamen Zündquellen gerechnet werden. Maßnahmen zur Zündquellenvermeidung reichen für den sicheren Betrieb oft nicht aus, so dass zusätzliche konstruktive Schutzmaßnahmen ergriffen werden müssen. Weil keine ausreichende Grundlage für die Auslegung der explosionsfesten Bauweise in Verbindung mit Explosionsdruckentlastung vorhanden ist, wurden auf dem Versuchsgelände der BGN und der FSA in Kappelrodeck Explosionsversuche im Großmaßstab durchgeführt. Die Vorgehensweise wird beschrieben und die Ergebnisse werden vorgestellt.

Abstract

Bucket elevators are widely used for the vertical conveying of combustible bulk materials. Depending on the operating conditions the occurrence of explosible dust/air mixtures as well as potential ignition sources has to be assumed. In many cases measures for the prevention of ignition sources are not sufficient, so additional design features for safety must be taken.

Because there was no sufficient data base to design explosion resistant bucket elevators in combination with explosion venting, large scale tests were carried out on the test site of BGN and FSA in Kappelrodeck. The tests will be described and the results presented.

1 Einführung

Elevatoren sind Geräte für die Senkrechtförderung von Schüttgütern. Sie werden in unterschiedlichen Ausführungen hergestellt, wobei für die Förderung von Schüttgütern mit einem Schüttgewicht kleiner als 1 kg / dm³, und hierunter fallen im Allgemeinen die brennbaren Schüttgüter, zumeist Becherelevatoren eingesetzt werden. Als Zugmittel kommen Ketten oder Gurtbänder in Betracht, an denen die Becher montiert sind. Bei Schüttgütern mit einem Schüttgewicht < 1 kg / dm³ werden im Allgemeinen Gurtbänder verwendet.

Die vorliegenden Untersuchungen beziehen sich auf Becherelevatoren mit Doppelschacht (Förder- und Rücklaufschacht) und mit Gurtband als Zugmittel. Die Gurtbänder werden durch Reibschluss über eine Umlenktrommel im Elevatorkopf angetrieben. Diese Bauart ist in der Praxis am häufigsten anzutreffen und wird mit Förderhöhen bis zu ca. 50 m und mit Förderleistungen bis über 600 t/h gebaut.

Bei den geförderten Schüttgütern reicht die Spannweite von pulverförmigen Produkten bis hin zu Granulaten, Körnern und Pellets, die mehr oder weniger große Feinstaubanteile besitzen können. Auf Grund des schnell laufenden Becherwerks muss im Innern dieser Elevatoren daher mit dem Auftreten explosionsfähiger Staub/Luft-Gemische gerechnet werden. Da sowohl geräteeigene als auch von außen eingetragene Zündquellen wirksam werden können [1], müssen Becherelevatoren im Hinblick auf Staubexplosionsgefahren besonders sorgfältig betrachtet werden (Bild 1).

In Abhängigkeit der Betriebsbedingungen kann die Beschränkung auf Maßnahmen zur Zündquellenvermeidung das Risiko einer Staubexplosion meist nicht ausreichend

minimieren, so dass zusätzliche konstruktive Schutzmaßnahmen ergriffen werden müssen. Hierzu zählt zum Beispiel die druckstoßfeste Bauweise in Verbindung mit Explosionsdruckentlastung und explosionstechnischer Entkopplung gegenüber angeschlossenen Anlagenteilen, um die möglichen Auswirkungen einer Staubexplosion auf ein ausreichend sicheres Maß zu begrenzen [1].
Bei der Auslegung der Explosionsdruckentlastung stößt man jedoch auf die Problematik, dass das vorhandene Regelwerk [2,3] auf Grund der besonderen geometrischen Verhältnisse bei Elevatoren nicht angewandt werden kann.

2 Kenntnisstand und Zielsetzung

Aus frühren explosionstechnischen Untersuchungen von Becherelevatoren ist bekannt [4-6], dass auch bei voller Beladung eines Elevators mit explosionsfähigen Schüttgütern eine Entzündung der Staub/Luft-Gemische erfolgen und in der Folge eine Flammenfortpflanzung auftreten kann. Die Explosionsüberdrücke sind auf Grund der im normalen Förderbetrieb vorhandenen hohen Staubkonzentrationen jedoch niedrig und liegen im Allgemeinen deutlich unterhalb 0.5 bar.
Sehr kritisch einzuschätzen ist dagegen der so genannte „Leerlaufbetrieb“, in dem die vorhandenen Staubablagerungen durch das schnell laufende Becherwerk aufgewirbelt werden. Unter diesen Betriebsbedingungen muss in Abhängigkeit der Schüttguteigenschaften (K_{St} – Wert, Pmax) mit hohen Flammengeschwindigkeiten und Explosionsdrücken gerechnet werden.
In bisherigen Forschungsarbeiten [4,5] wurde der Schwerpunkt der experimentellen Untersuchungen daher auf die Betrachtung optimaler Staubkonzentrationen von im Allgemeinen 500 bis 1000 g/m³ gelegt. Die Explosionsversuche wurden in der Regel so durchgeführt, dass mit unter Überdruck stehenden Staubvorratsbehältern (z.B. 20 bar) und mit Hilfe von Schnellöffnungsventilen definierte Staubmengen bei laufendem Becherwerk in den Elevatorkopf, -fuß und in die Schächte eingedüst wurden.

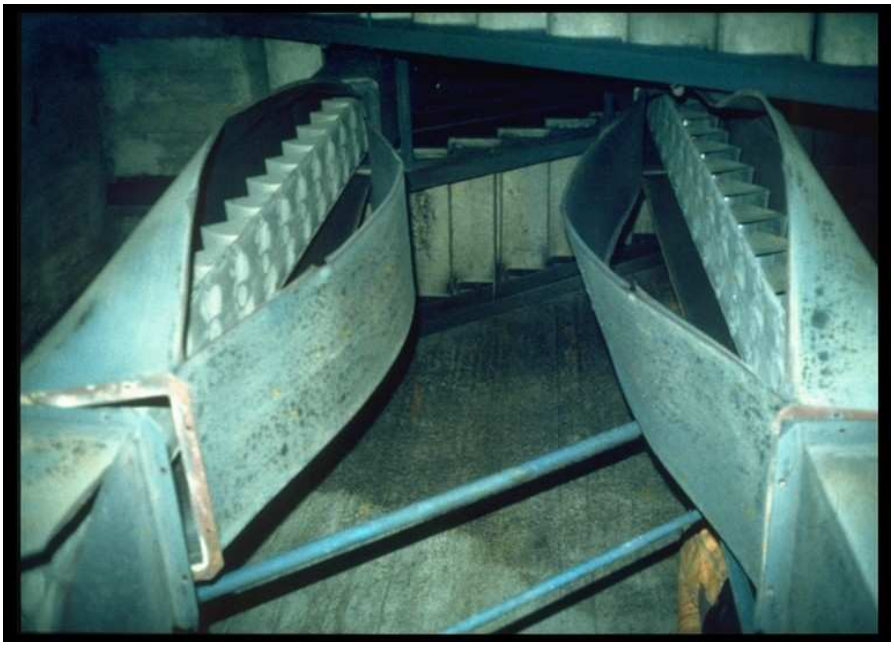


Bild 1: Aufgerissene Elevatorschächte nach einer Staubexplosion

Aus Untersuchungen von Bartknecht [4] resultierte die Forderung, dass durch Löschmittelsperren geschützte Elevatoren explosionsfest für einen Überdruck von 3 bar zu bauen sind, wenn brennbare Stäube der Staubexplosionsklasse St1 ($K_{St} \leq 200$ bar·m·s^{-1}) gefördert werden. Übersteigt die Förderhöhe 30 m, so sind alle 30 m zusätzliche Löschmittelsperren vorzusehen.

Für die Auslegung der Explosionsdruckentlastung von Becherelevatoren wurden zahlreiche Explosionsversuche im Rahmen eines europäischen Forschungsprojekts von P. Holbrow und G.A. Lunn durchgeführt [5]. Untersucht wurden Becherelevatoren in Einfach- und Doppelschachtausführung. Als Versuchsstäube dienten Milchpulver (K_{St} = 86 bar·m·s^{-1}) und verschiedene Maisstärken mit K_{St} = 147, 180 und 211 bar·m·s^{-1}.
Prinzipiell traten bei diesen Untersuchungen die höchsten Explosionsdrücke dann auf, wenn definierte Staubmengen zur Erzielung optimaler Konzentrationen mit Hilfe von Druckbehältern in den Elevator eingedüst wurden. Die Explosionsdrücke im praxisnahen Betrieb mit voller Staubbeladung des Elevators waren dagegen sehr niedrig.
Es zeigte sich ferner, dass sich eine Verkleinerung der Becherabstände (Becherabstände ≤ 280 mm) auf Grund der Versperrung der Elevatorschächte dämpfend auf den Explosionsablauf auswirkt, wenn der staubspezifische K_{St}-Wert kleiner ist als 150 bar·m·s^{-1}. Wurde hingegen Maisstärke mit K_{St} = 211 bar·m·s^{-1} verwendet, so konnte eine deutliche Steigerung der Flammengeschwindigkeiten und Explosionsdrücke beobachtet werden.
Es wird vermutet, dass durch die Verkürzung der Becherabstände eine Steigerung der turbulenten Strömungsverhältnisse innerhalb der Elevatorschächte verursacht wird. Diese können sich bei Stäuben mit höherer Verbrennungsgeschwindigkeit und somit höherem K_{St}-Wert in stärkerem Maße steigernd auf die Explosionsheftigkeit auswirken als sich die Einbauten (Becherwerk) durch Versperrung und Wärmeentzug dämpfend auf die deflagrative Verbrennung auswirken.
Die Explosionsversuche wurden generell mit Druckentlastungsöffnungen am Elevatorkopf und –fuß durchgeführt, wobei die einzelnen Druckentlastungsflächen der Querschnittsfläche des Elevatorschachts entsprachen. In Abhängigkeit der Elevatorfestigkeit und des K_{St}-Wertes müssen außerdem zusätzliche Entlastungsöffnungen in definierten Abständen in den Elevatorschächten angebracht werden. Die maximal zulässigen Abstände können einem Diagramm entnommen werden.

Die vorhandenen Untersuchungsergebnisse sind noch immer eine unbefriedigende Basis für die Auslegung der explosionsfesten Bauweise in Verbindung mit Explosionsdruckentlastung. Die Gründe liegen darin, dass ein Großteil der Versuche mit Stäuben mit
K_{St} ~ 200 bar·m·s^{-1} und mit Staubeinblasverfahren durchgeführt wurden. Dies führt zu sehr hohen Festigkeitsanforderungen (Bartknecht), die in der Praxis nur schwer zu erfüllen sind. Tatsächlich besitzen die typischerweise in Elevatoren geförderten Schüttgüter mit wenigen Ausnahmen K_{St}-Werte unterhalb 150 bar·m·s^{-1}.
Die Untersuchungsergebnisse von Holbrow und Lunn haben wertvolle Erkenntnisse zum grundlegenden Verständnis des Explosionsablaufs in Elevatoren erbracht (z.B. Einfluss des Becherabstandes). Betrachtet man jedoch die Versuchsergebnisse der Stäube mit K_{St} = 150 bar·m·s^{-1}, so scheinen die Ergebnisse nicht immer plausibel. Ferner ergaben Explosionsversuche (Vorversuche) der FSA mit einem Staub mit niedrigem K_{St}-Wert (Weizenmehl Typ 550 mit K_{St} ~ 100 bar·m·s^{-1}) höhere Explosionsdrücke als vergleichbare

Versuche von Holbrow und Lunn. Letzteres könnte durch andere Produkteigenschaften, z.B. Staubungsverhalten (Dispergierbarkeit), und andere Bauweise des Elevatorfußes zu erklären sein.

Das Ziel neuer experimenteller Untersuchungen bestand darin, unter Berücksichtigung der vorhandenen Forschungsergebnisse weitergehende Erkenntnisse für die Auslegung der explosionsfesten Bauweise in Verbindung mit Explosionsdruckentlastung von Becherelevatoren zu erhalten. Dabei sollte auch die Frage geklärt werden, ob unter bestimmten Voraussetzungen (K_{St} – Wert, Explosionsfestigkeit) auf eine zusätzliche Explosionsdruckentlastung verzichtet werden kann.

Zielsetzung des Projekts:

- Konstruktiver Explosionsschutz für Becherelevatoren mit rechteckigem Förder- und Rücklaufschacht

- Auslegung der explosionsfesten Bauweise in Verbindung mit Explosionsdruck-entlastung

- Klärung der Frage, ob unter bestimmten Bedingungen (Explosionsfestigkeit, K_{St}-Wert) auf eine zusätzliche Explosionsdruckentlastung verzichtet werden kann

- Durchführung der Versuche unter möglichst realistischen Betriebsbedingungen

- Verwendung von Schüttgütern mit K_{St} ~ 100, 150 und 200 bar·m·s^{-1}

- Einbringung der Ergebnisse in technisches Regelwerk

Für die Erreichung der oben genannten Ziele wurden auf der Versuchsanlage der BGN und FSA in Kappelrodeck praxisnahe Explosionsversuche im Großmaßstab durchgeführt.

3 Versuchsaufbau

Für die explosionstechnischen Untersuchungen wurde ein Becherelevator mit Doppelschacht (Förder- und Rücklaufschacht) eingesetzt. Nach Versuchen in der handelsüblichen Ausführung wurde der Versuchs-Elevator schließlich mit einer erhöhten Druckstoßfestigkeit von ca. 3.5 bar hergestellt. Die Länge der Elevatorschächte betrug ca. 13 m bei einer Gesamtlänge des Elevators von ca. 15 m.
Im Hinblick auf die Flammenfortpflanzung spielt die Versperrung der Elevatorschächte durch das Becherwerk und somit die verbleibende freie Querschnittsfläche eine wichtige Rolle. Für die Versuche wurde ein Elevatortyp moderner Bauart mit hoher Becherbelegung (Becherabstand 130 mm) und mit maximalen allseitigen Wandabständen von weniger als 70 mm gewählt, was dem heutigen Stand der Technik entspricht. Größere Wandabstände können die Flammenbeschleunigung begünstigen und somit höhere Explosionsdrücke verursachen, als sie im verwendeten Elevator gemessen werden. Die geometrischen Abmessungen und technische Daten können Tabelle 1 entnommen werden.

Der Versuchs-Elevator konnte nach Bedarf am Elevatorfuß, -kopf und in der Mitte der Elevatorschächte (ca. 6 m über dem Elevatorfuß) mit einer Explosionsdruckentlastung ausgerüstet werden. Die Druckentlastungsflächen entsprachen jeweils der Querschnittsfläche des Elevatorschachts von 0.105 m². Der statische Ansprechdruck der Entlastungseinrichtungen betrug p_{stat} = 0.1 bar.

Tabelle 1: Technische Daten des Versuchs-Elevators

Gesamtlänge	15125 mm
Schachtabmessungen	270 mm x 390 mm
Querschnittsfläche	0.105 m²
Becherabmessung	165 mm x 280 mm
Becherbelegung	7.5 Becher/m
Bechervolumen	~ 3 l (~ 1.8 kg Maisstärke)
Becherabstand	130 mm
Wandabstand vorne	~ 60 mm
Wandabstand seitlich	~ 55 mm
Wandabstand hinten	~ 45 mm
Freie Querschnittsfläche	54 %
Förderleistung	~ 150 t/h Getreide (Schüttgewicht: 0.75 t/m³)
Fördergeschwindigkeit	3.5 m/s
Entlastungsfläche (je)	0.105 m²

Der Elevator wurde ferner über eine Rohrleitung DN 100 an eine Entstaubungsanlage angeschlossen, die wahlweise zu- oder abgeschaltet werden konnte.
Sowohl am Elevatorfuß und -kopf als auch entlang der Elevatorschächte wurden in definierten Abständen piezoelektrische Druckaufnehmer und Flammenmelder installiert.

In Bild 2 ist das Prinzipbild des Versuchs-Elevators dargestellt, aus dem die Positionen der Druckentlastungsflächen, der pyrotechnischen Zünder und der Druck- und Flammenmelder entnommen werden können. Bild 3 zeigt beispielhaft einen Explosionsversuch im eingerüsteten Elevator, bei dem die Druckentlastung im Elevatorfuß, -kopf und in den Schächten erfolgte. Es ist ferner eine Explosionsübertragung durch die Entstaubungsleitung DN 100 (Länge l = 15 m) hin zum druckentlasteten Zyklon (rechts neben dem Elevator) zu erkennen.

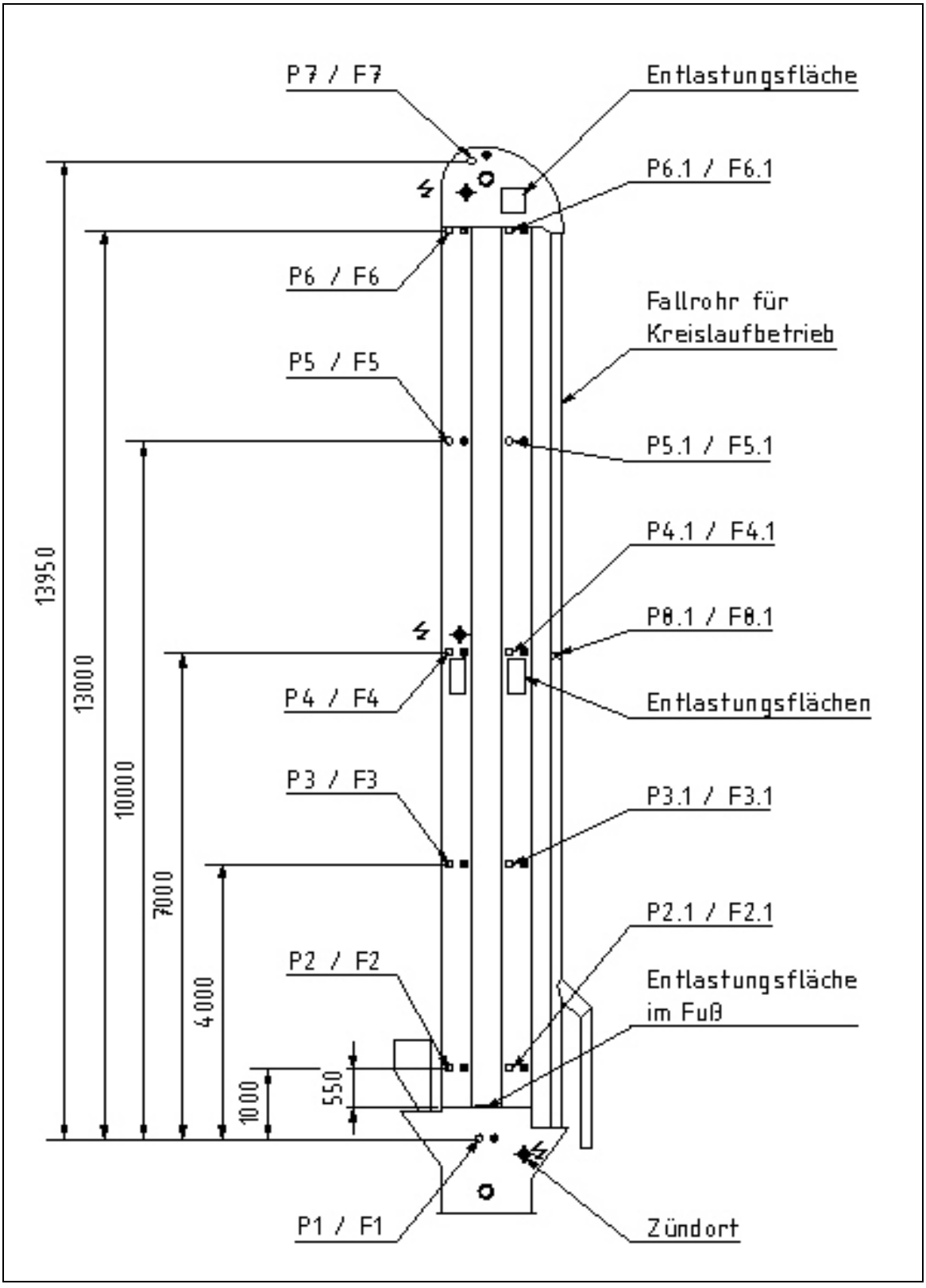


Bild 2: Prinzipbild des Versuchs-Elevators mit Angabe der Messstellen (P – Druckaufnehmer; F – Flammenmelder) und der möglichen Anordnung der Druckentlastungsflächen sowie Zündorte

4 Explosionstechnische Untersuchungen

4.1 Charakteristische Kenngrößen der verwendeten Stäube

Die explosionstechnischen Kenngrößen der verwendeten Stäube können Tabelle 2 entnommen werden. Die angegebenen Werte wurden an genormten Prüfmustern entsprechend der einschlägigen Normen [8-11] ermittelt.
Zusätzlich ist die dimensionslose mittlere Staubungszahl S_N [12] angegeben, die als Maß für die Staubungsfähigkeit des Schüttgutes dient.
Angaben zur Korngrößenverteilung und weitere Ergebnisse der Kennzahlenermittlung aus der 20 l - Kugel und 1 m³ - Behälter befinden sich im Anhang 7.4.

Tabelle 2: Explosionskenngrößen der verwendeten Schüttgüter (genormte Prüfmuster)

Schüttgut	**P_{max} [bar]**	**K_{St} [bar·m·s^{-1}]**	**UEG [g/m³]**	**MZE [mJ]**	**MZT [℃]**	**S_N**
Weizenmehl Typ 550	6.8	109	60	>10 / ≤ 50	380	0.6
Malzstaub 1	7.9	143	60	> 5 / ≤ 10	370	29
Malzstaub 2	8.4	159	60	> 5 / ≤ 10	370	13,2
Maisstärke	8,7	204	60	> 4 / ≤ 5	380	10.2

P_{max} - maximaler Explosionsüberdruck
K_{St} - staubspezifische Kenngröße
UEG - untere Explosionsgrenze
MZE - Mindestzündenergie (bestimmt mit Induktivität im Entladekreis)
MZT - Mindestzündtemperatur
S_N - mittlere Staubungszahl

4.2 Versuchsdurchführung

Für die Durchführung der Explosionsversuche wurden zwei unterschiedliche Vorgehensweisen für die Erzeugung der Staub-/Luft-Gemische im Innern des Elevators gewählt. Neben einer praxisnahen Methode wurde auch mit Einblasen definierter Staubmengen aus Druckbehältern (20 bar) gearbeitet, um einen Vergleich zu bisherigen Forschungsprojekten zu ermöglichen.
Als Zündquelle dienten zwei pyrotechnische Zünder mit einer Zündenergie von je 1 kJ. Einige Versuche wurden mit einer Zündenergie von 5 kJ durchgeführt. Die Zündortlage wurde variiert und befand sich wahlweise im Elevatorkopf, in der Schachtmitte (Förderschacht) oder im Elevatorfuß.
Die Anzahl der Druckentlastungsöffnungen wurde systematisch variiert. Die Explosionsversuche wurden mit insgesamt vier Druckentlastungsöffnungen (Kopf, 2 x Schacht, Fuß) begonnen. Es erfolgte dann eine Reduzierung auf drei (Kopf, 2 x Schacht) und schließlich auf eine Druckentlastungsöffnung nur im Elevatorkopf. Im Falle tendenziell schwacher Explosionsabläufe (Weizenmehl K_{St} ~ 100 bar·m·s^{-1}) konnte bei der gegebenen

Druckstoßfestigkeit des Versuchs-Elevators auf eine zusätzliche Druckentlastung auch verzichtet werden.
Um einen möglichen Einfluss der angeschlossenen Entstaubungsanlage auf den Explosionsablauf zu erkennen, wurden einige Versuche mit ein- und ausgeschalteter Entstaubung unter sonst gleichen Bedingungen durchgeführt. Die Entstaubungsanlage bestand aus einer 15 m langen Rohrleitung DN 100, die über einen druckentlasteten Zyklon mit einem Radialsauggebläse verbunden war. Die Strömungsgeschwindigkeit in der Entstaubungsleitung betrug ca. 20 m/s.

Methode A: Explosionsversuche unter praxisnahen Betriebsbedingungen

Bei dieser Vorgehensweise wurden zunächst die Versuchsbedingungen für die Erzielung einer maximal möglichen Explosionsheftigkeit unter praxisnahen Betriebsbedingungen ermittelt. Hierfür wurde der Elevator mit 100 bis 200 kg des gewünschten Staubes beschickt und über eine definierte Zeitspanne mit Hilfe eines Fallrohres im Kreislaufbetrieb gefahren. Danach wurde der Elevator entleert, so dass sich im Innern nur noch die verbleibenden Staubablagerungen befanden. Das Fallrohr wurde anschließend mit Hilfe eines Schiebers verschlossen. Nach Einbau der pyrotechnischen Zünder wurde der Elevator erneut angefahren und im Leerlauf betrieben. Nach einer Zeitspanne von ca. 20 Sekunden erfolgte schließlich die Entzündung des durch den Becherwerk aufgewirbelten Staubes. Die optimale Zeitspanne bis zur Aktivierung der Zünder wurde systematisch durch Vorversuche ermittelt.

Bild 3: Staubexplosion im druckentlasteten Elevator auf dem Versuchsfeld der BGN/FSA in Kappelrodeck mit Explosionsübertragung durch die Entstaubungsleitung DN 100 (Länge l = 15 m) in den druckentlasteten Zyklon

Methode B: Explosionsversuche mit definierter Staubeinblasung

Nach dieser Methode wurden definierte Staubmengen über spezielle Staubvorratsbehälter eingebracht, die unter 20 bar Druckluft verschlossen waren. Mit Hilfe von Schnellöffnungsventilen konnten die Behälter entspannt und der Staub in den Elevator eingeblasen werden. Je ein Behälter war am Elevatorfuß und –kopf und jeweils zwei Behälter waren entlang des Förder- und Rücklaufschachtes angebracht. Die Staubeinbringung erfolgte stets bei laufendem Becherwerk. Nach einer definierten Zündverzögerungszeit wurden die pyrotechnischen Zünder aktiviert.

Die eingebrachten Staubmengen wurden variiert und auf diese Weise die optimale Staubkonzentration für die Erzielung der maximalen Explosionsdrücke ermittelt.

4.3 Versuchsergebnisse

Die Untersuchungen wurden zunächst nach der oben beschriebenen Methode A durchgeführt. Dabei ergaben sich unabhängig vom verwendeten Staub die maximalen Explosionsdrücke stets bei Zündortlage im Elevatorkopf oder -fuß. Wurde auf die Explosionsduckentlastung am Elevatorfuß verzichtet, so ergaben sich die maximalen Explosionsdrücke bei Zündortlage „Elevatorfuß“.

Einfluss der pneumatischen Entstaubungsanlage

Zusätzlich wurden Versuche mit und ohne Entstaubung durchgeführt. Mit den gewählten Schüttgütern war jedoch kein Einfluss der Entstaubung auf den Explosionsablauf zu erkennen, deshalb wurde in allen weiteren Versuchen mit eingeschalteter Entstaubung gearbeitet. Sehr wohl fand jedoch bei einem Teil der Versuche eine Flammenfortpflanzung durch die Entstaubungsleitung statt, die eine sekundäre Explosion im druckentlasteten Zyklon verursachte (siehe Bild 3). Dies sei als wichtiger Hinweis für die Notwendigkeit explosionstechnischer Entkopplungsmaßnahmen gegenüber angeschlossenen Anlagenteilen angemerkt.

4.3.1 Ergebnisse mit Weizenmehl Typ 550

Weizenmehl vom Typ 550 wurde stellvertretend für Stäube bis zu einem staubspezifischen Kennwert $K_{St} \leq 100$ bar·m·s^{-1} ausgewählt. Für die Versuche wurde das Weizenmehl im Anlieferungszustand verwendet mit einer Produktfeuchte F = 11,7 %. (Korngrößenverteilung siehe Anhang 7.4).

Auf Grund des niedrigen K_{St}-Wertes und der Erfahrungen aus Vorversuchen konnte auf die Druckentlastung im Elevatorfuß verzichtet werden. So wurden die Explosionsversuche mit je einer Druckentlastung im Förder- und Rücklaufschacht und im Elevatorkopf begonnen. In diesen wie auch in allen weiteren Versuchen mit Weizenmehl zeigte sich, dass die maximalen Explosionsdrücke im Bereich des Zündortes oder in den Elevatorschächten zwischen dem Zündort und der Druckentlastung im Elevatorschacht auftraten. Im weiteren Verlauf nahmen die Explosionsdrücke stets ab.

In Bild 4 sind die Explosionsüberdrücke des jeweils heftigsten Versuches als Funktion des Messortes und in Abhängigkeit der Druckentlastungsanordnung dargestellt. Der Abstand L des Messortes bezieht sich dabei auf die Messstelle P1 am Elevatorfuß (siehe Bild 2).

Die punktierte Kurve mit rechteckigen Symbolen zeigt die Explosionsüberdrücke mit Druckentlastung (DE) in Kopf und Schacht, wobei die „offenen“ Rechtecksymbole die

Drücke im Förderschacht und die „vollen“ Symbole die Drücke im Rücklaufschacht repräsentieren. Als maximaler Explosionsüberdruck wurde unter diesen Bedingungen p_{max} = 0.3 bar im Rücklaufschacht gemessen.
Man erkennt ferner, dass sich die Explosionsabläufe im Förder- und Rücklaufschacht mehr oder weniger stark unterscheiden. Unter den gewählten Versuchsbedingungen wurden die höheren Drücke zumeist im Förderschacht gemessen, teilweise jedoch auch im Rücklaufschacht.

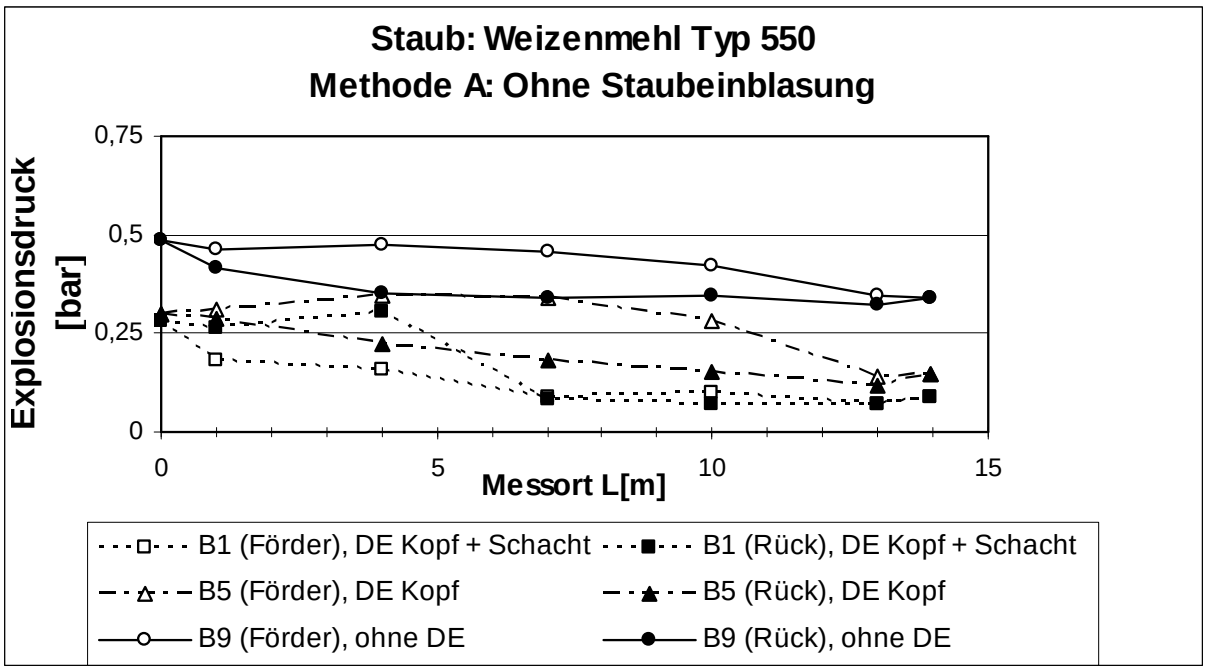


Bild 4: Explosionsüberdruck in Abhängigkeit des Messortes für verschiedene Druckentlastungsanordnungen (DE in Kopf und Schacht, nur Kopf und ohne Druckentlastung); Versuchsstaub: Weizenmehl Typ 550 mit K_{St} = 109 bar·m·s^{-1}.

Weitere Versuche wurden mit nur einer Druckentlastung im Elevatorkopf durchgeführt (dreieckige Symbole). An mehreren Messstellen in den Elevatorschächten erreichten die lokalen Drücke um bis zu 0.25 bar höhere Werte als zuvor. Der maximale Explosionsüberdruck war mit 0.35 bar jedoch nur geringfügig höher als mit zusätzlichen Druckentlastungen in den Elevatorschächten.
Auf Grund der relativ niedrigen Explosionsdrücke wurden schließlich Versuche ohne zusätzliche Druckentlastung durchgeführt. Bild 4 zeigt wiederum die Explosionsüberdrücke des heftigsten von drei unter sonst gleichen Bedingungen durchgeführten Versuchen. Der maximale Explosionsüberdruck stieg jetzt auf nahezu 0.5 bar an.

In Bild 5 sind die Ergebnisse aller Versuche (Methode A) mit Weizenmehl dargestellt. Aus Gründen der Übersichtlichkeit sind nur die Messergebnisse des Elevatorschachtes angegeben, indem die höheren Drücke gemessen wurden.

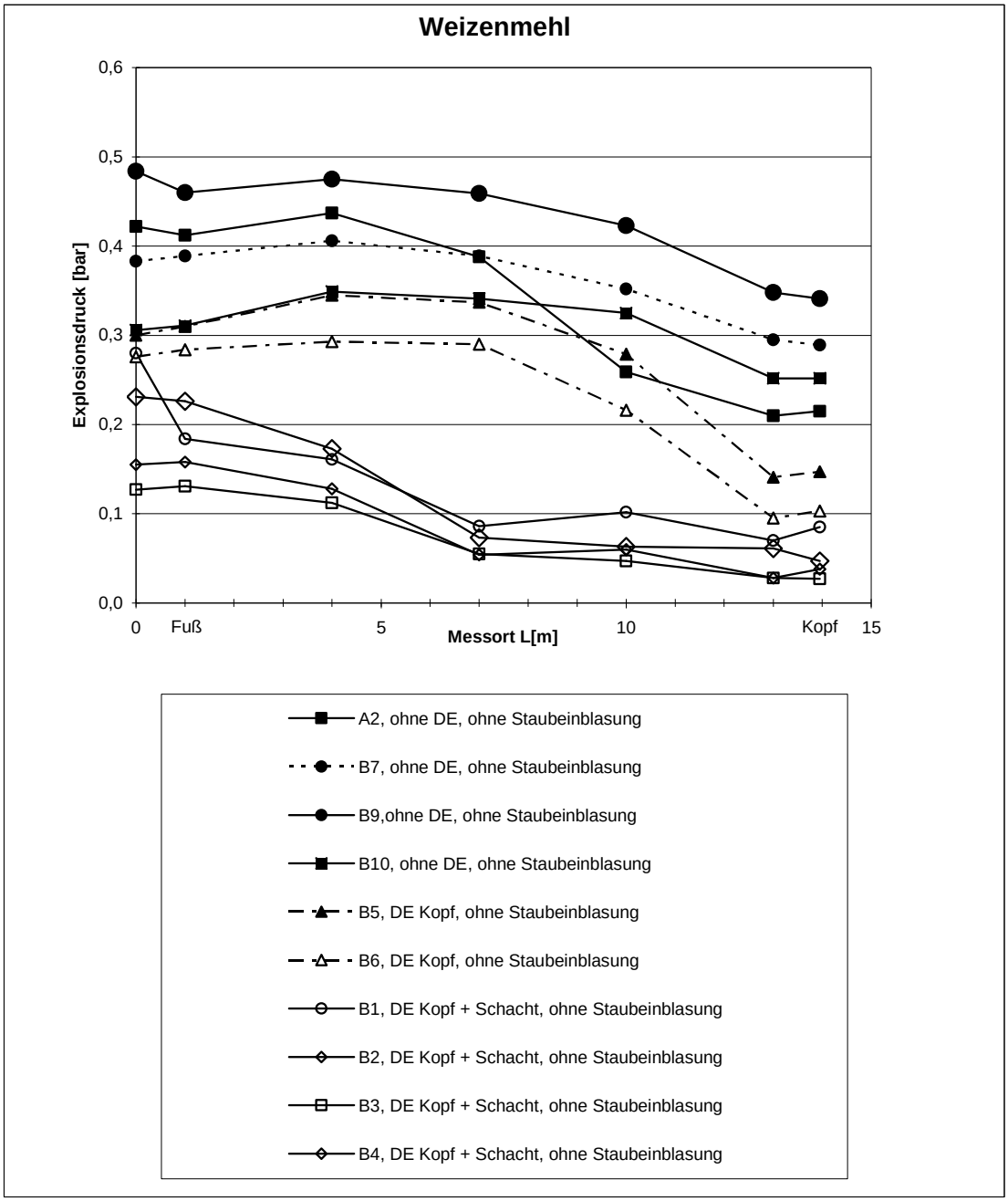


Bild 5: Explosionsüberdruck im Elevator in Abhängigkeit der verwendeten Druckentlastung nach Methode A (ohne Staubeinblasung) mit Weizenmehl

Es war nun von großem Interesse, vergleichende Versuche mit definiertem Einblasen von Staub durchzuführen (Methode B), um eine optimale Staubverteilung innerhalb des Elevators sicher zu stellen. Die entsprechenden Ergebnisse werden in Bild 6 gezeigt.
Im Falle der Druckentlastung im Elevatorkopf und in den Schächten wurde bei drei Versuchen ein maximaler Explosionsüberdruck von nur ca. 0.1 bar erreicht.
Mit Druckentlastung nur im Elevatorkopf (dreieckige Symbole) wurde mit p_{max} = 0.51 bar ein etwas höherer Druck erreicht als zuvor und ohne zusätzliche Druckentlastung stieg der maximale Druck auf p_{max} = 0.6 bar an.
Nach beiden Vorgehensweisen wurden somit ähnliche Versuchsergebnisse erzielt.

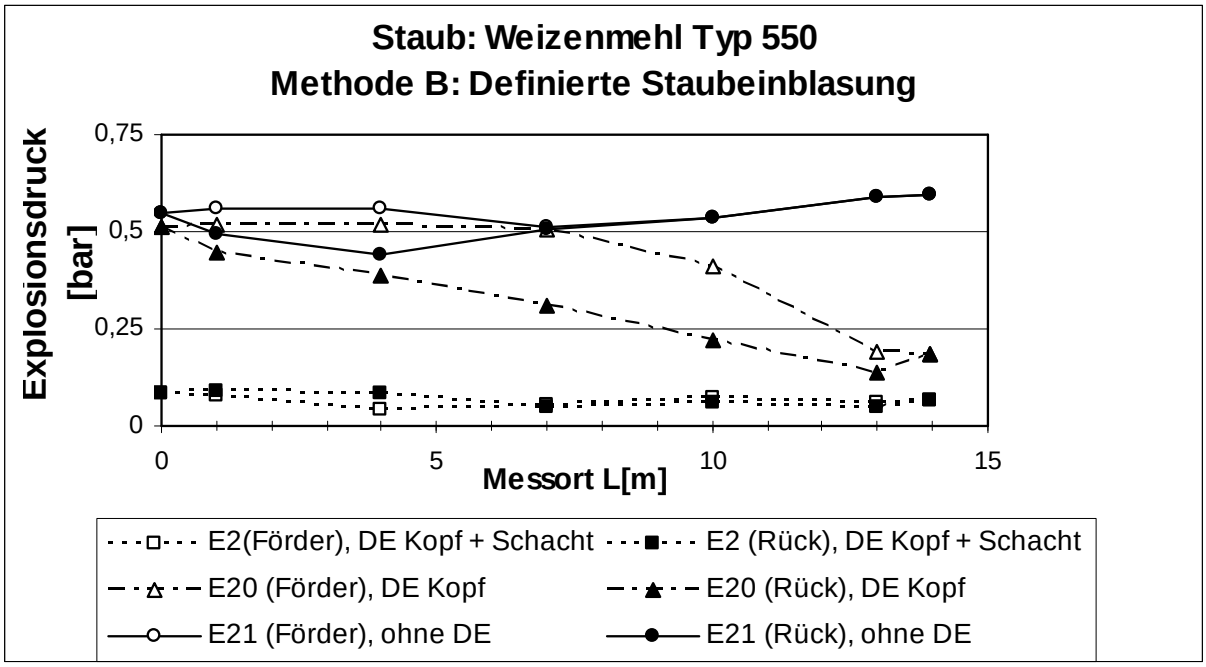


Bild 6: Explosionsüberdruck in Abhängigkeit des Messortes für verschiedene Druckentlastungsanordnungen (DE in Kopf und Schacht, nur Kopf und ohne Druckentlastung); Versuchsstaub: Weizenmehl Typ 550 mit K_{St} = 109 bar·m·s^{-1}

4.3.2 Ergebnisse mit Malzstaub 1

Unter Beibehaltung der Vorgehensweise wurden weitere Versuche mit Malzstaub durchgeführt. Der hier verwendete Malzstaub aus einem Entstaubungsfilter kann als besonders kritischer Vertreter brennbarer Stäube im Bereich bis K_{St} = 150 bar·m·s^{-1} angesehen werden, weil er durch eine besonders hohe Staubungsneigung gekennzeichnet ist. Dies kommt sehr deutlich in der charakteristischen Staubungszahl S_N zum Ausdruck, die in Tabelle 2 angegeben ist. Sie ist mehr als doppelt so hoch wie die der Maisstärke und mehr als 40-mal so hoch wie die Staubungszahl von Weizenmehl Typ 550. Für die Versuche wurde der Malzstaub im Anlieferungszustand in den Elevator eingebracht mit einer Produktfeuchte F = 5,9 %.
Die Versuchsreihe wurde mit Druckentlastung im Elevatorfuß, -kopf und in den Elevatorschächten begonnen. Die Ergebnisse können Bild 7 entnommen werden. Aus Gründen der Übersichtlichkeit sind hier nur die Ergebnisse des Elevatorschachts angegeben, in dem die höheren Drücke gemessen wurden.

Im Leerlaufbetrieb ohne Staubeinblasung (Methode A) trat der maximale Explosionsüberdruck in einem Versuch mit Zündortlage „Elevatorkopf“ auf und erreichte p_{max} = 0.61 bar im Elevatorschacht zwischen Elevatorkopf und Druckentlastung „Schacht“ (Versuch A1). Ab Druckentlastung „Schacht“ bis hinunter zum Fuß fallen die Drücke deutlich auf Werte von ca. 0.2 bar ab. Der Versuch wurde viermal wiederholt, konnte in seiner Heftigkeit jedoch nicht reproduziert werden. In den weiteren Versuchen lagen die Drücke bei maximal 0.37 bar.
In einem vergleichenden Versuch mit zusätzlicher Staubeinblasung (Methode B) wurden nur wenig mehr als 0.1 bar erreicht!

Der Verzicht auf die Druckentlastung im Elevatorfuß führte mit Malzstaub und Zündortlage im Elevatorfuß zu einem starken Anstieg der Explosionsdrücke sowohl im Bereich des Zündortes als auch in den Elevatorschächten bis zur Druckentlastung „Schacht“. So wurde jetzt ein maximaler Explosionsüberdruck von p_{max} = 1.23 bar gemessen (Versuch A19). Nach der Druckentlastung „Schacht“ fällt der Druck in Richtung Elevatorkopf auf Werte unter 0.5 bar ab.

In insgesamt fünf vergleichenden Versuchen nach Methode B mit definierter Staubeinblasung wurden ähnliche Tendenzen festgestellt, jedoch waren die Explosionsüberdrücke mit maximal p_{max} = 0.81 bar deutlich geringer als zuvor nach Methode A unter praxisnahen Betriebsbedingungen.
Ein weiterer Anstieg der Explosionsdrücke trat auf, als nur der Elevatorkopf druckentlastet wurde. Wie Bild 7 entnommen werden kann, ergaben sich in diesem Falle nach beiden Methoden nahezu identische Explosionsabläufe. Der maximale Explosionsüberdruck im Bereich des Elevatorfußes erreichte dabei p_{max} = 1.37 bar nach Methode A und p_{max} = 1.42 bar nach Methode B.

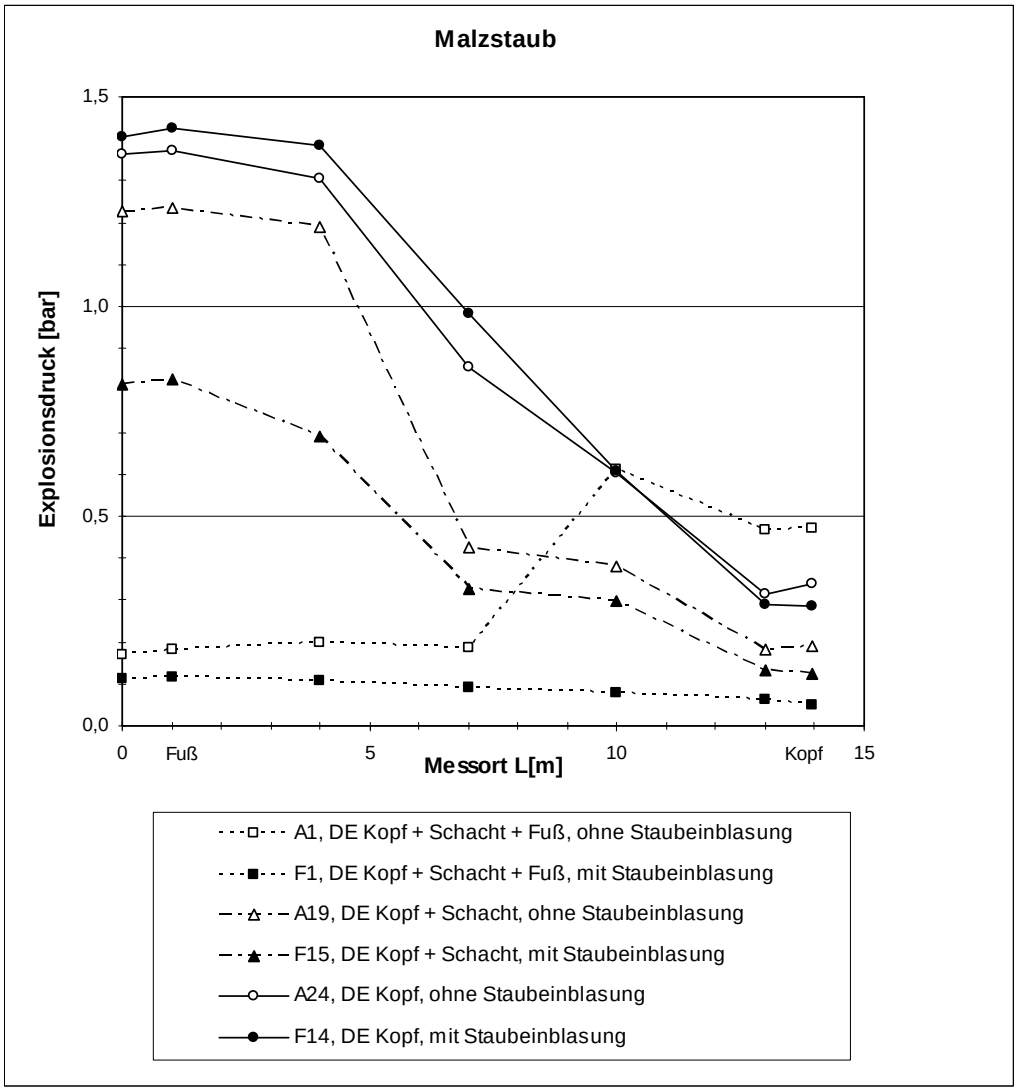


Bild 7: Vergleich der Ergebnisse nach Methode A (ohne Staubeinblasung: „offene“ Symbole) mit Methode B (mit Staubeinblasung: „volle“ Symbole) für Malzstaub 1; Zündortlagen: Versuch A1 „Elevatorkopf“, sonst alle „Elevatorfuß“

4.3.3 Ergebnisse mit Malzstaub 2

Eine neue Charge Malzstaub („Malzstaub 2“) besaß deutlich höhere Explosionskenngrößen als der bisher verwendete „Malzstaub 1“ (siehe Seite 10, Tabelle 2). Wie zu erwarten war, wurden in Vergleichsversuchen entsprechend höhere Explosionsdrücke mit Malzstaub 2 gemessen. Bild 8 zeigt den Ergebnisvergleich der unterschiedlichen Malzstaubchargen bei Zündortlage „Elevatorkopf“. Bei diesen Versuchen wurde nach Methode A gearbeitet, d.h. im praxisnahen Leerlaufbetrieb ohne Staubeinblasung. Eine Druckentlastung war nur im Elevatorkopf angebracht. In Versuch B7 (Malzstaub 2) wurden mit 1,75 bar ein um 64 % höherer maximaler Explosionsüberdruck gemessen als mit Malzstaub 1 (1,06 bar) in Versuch A26.

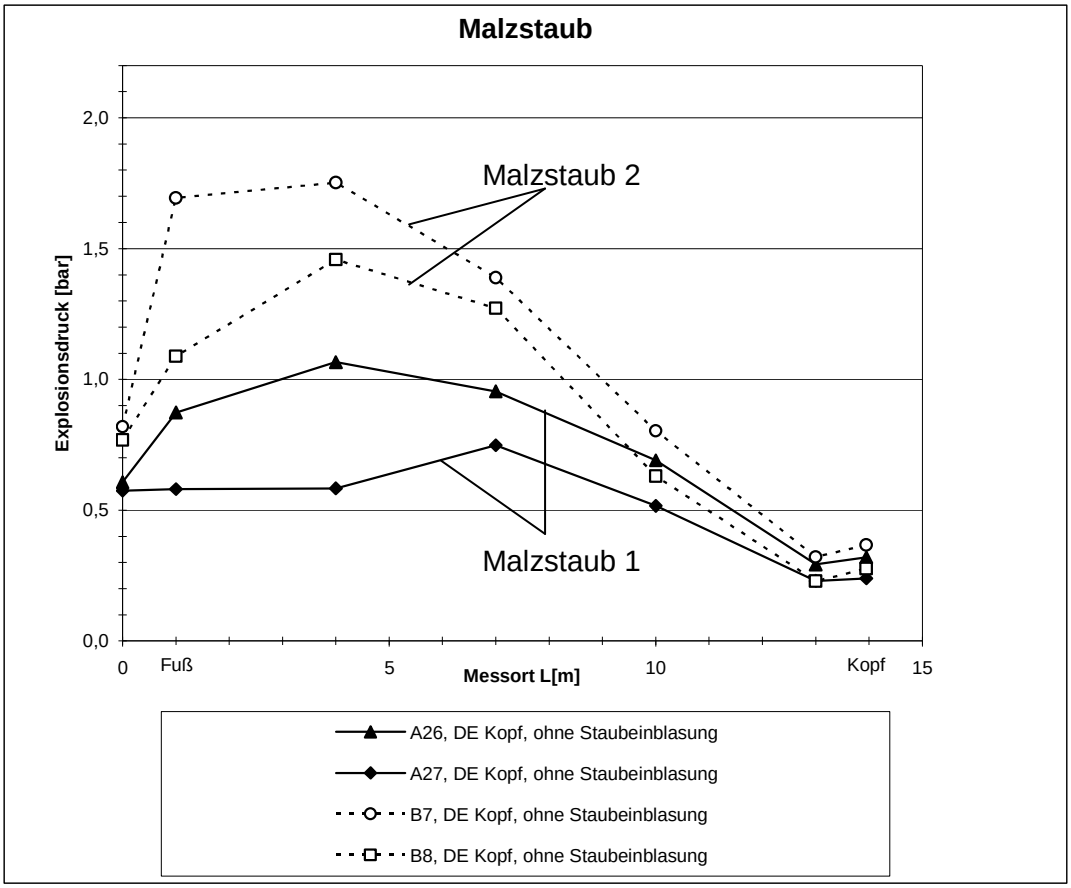


Bild 8: Vergleich der Ergebnisse nach Methode A (ohne Staubeinblasung) mit Malzstaub 1 und Malzstaub 2. Zündort Kopf, Druckentlastung nur im Kopf. Malzstaub 1: A26 + A27, Malzstaub 2: B7 + B8

Bei Zündortlage „Elevatorfuß“ und Druckentlastung nur im Elevatorkopf wurden bei gleicher Vorgehensweise und in Verbindung mit „Malzstaub 2“ Explosionsüberdrücke bis knapp über 2 bar gemessen. Die Versuchsergebnisse von „Malzstaub 1“ und „Malzstaub 2“ sind zum Vergleich in Bild 9 dargestellt. In Versuch B3 mit „Malzstaub 2“ wurde mit 2,08 bar ein um 51 % höherer Explosionsüberdruck gemessen als mit „Malzstaub 1“ in Versuch A25 (1,37 bar).

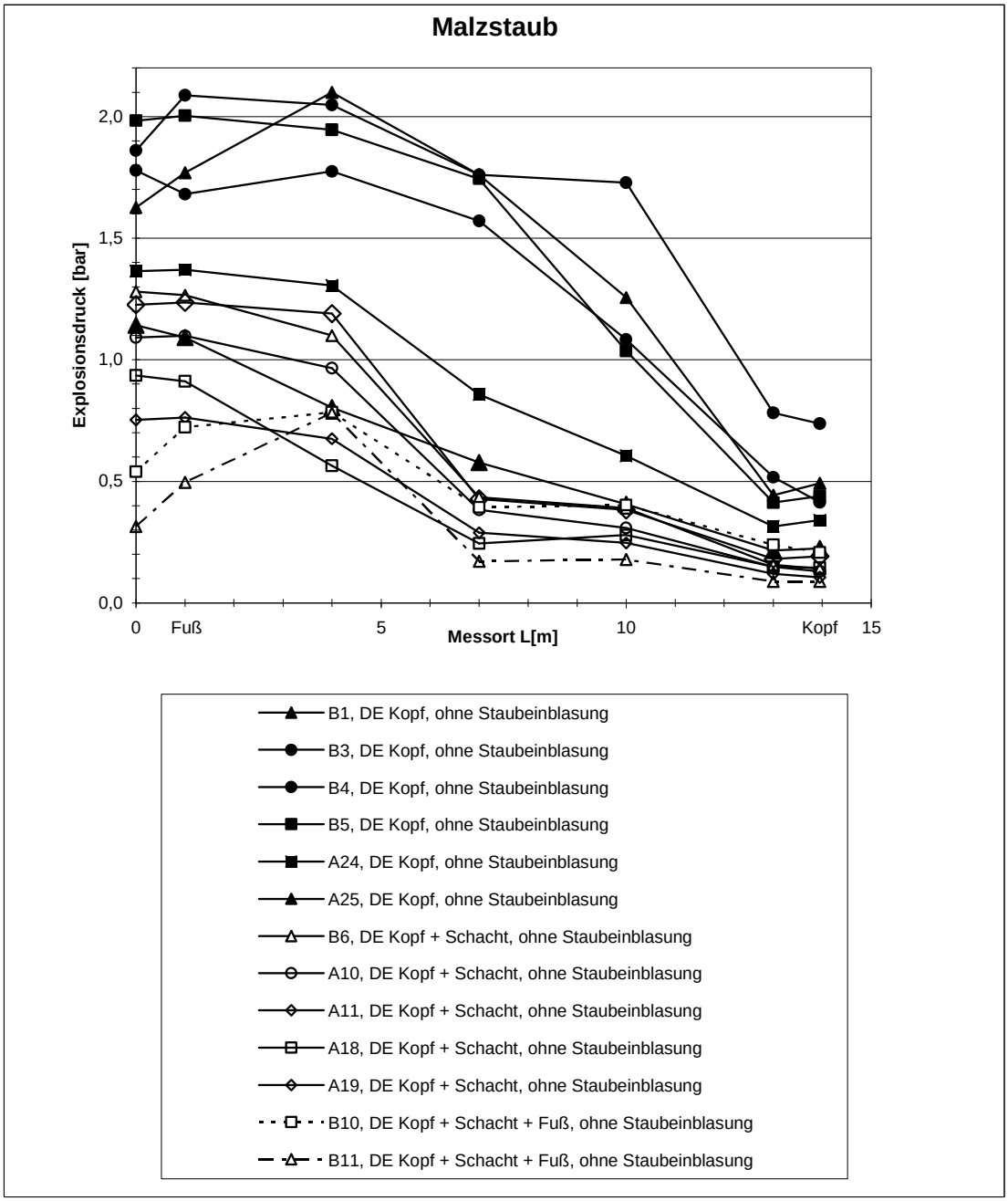


Bild 9: Vergleich der Ergebnisse nach Methode A mit Malzstaub 1 und Malzstaub 2. Zündort „Fuß“, Malzstaub 1: Versuchs-Nr. A10, A11, A18, A19, A24, A25;
Malzstaub 2: Versuchs-Nr. B1, B3, B4, B5, B6, B10, B11;

4.3.4 Ergebnisse mit Maisstärke

Nach den Untersuchungen mit Weizenmehl und Malzstaub wurden weitere Versuchsreihen mit Maistärke gefahren (p_{max} = 8,7 bar; K_{St} = 204 bar·m·s^{-1}).
Die Versuche wurden mit Methode A ohne Staubeinblasung begonnen. Mit Druckentlastung von Elevatorfuß, -kopf und beiden Schächten und Zündortlage „Elevatorfuß“ wurde nach 3 Versuchen im Elevatorschacht, ca. 1 m oberhalb des Elevatorfußes, ein maximaler Explosionsüberdruck von p_{max} = 0.47 bar erreicht (Versuch C1).

Bei Verzicht auf die Druckentlastung des Elevatorfußes stieg der maximale Explosionsüberdruck im Bereich des Elevatorfußes und Beginn des Elevatorschachtes auf p_{max} = 1.1 bar an. Mit Druckentlastung nur des Elevatorkopfes war ein weiterer Anstieg auf p_{max} = 1.64 bar zu verzeichnen.
Diese Ergebnisse lagen somit niedriger als die Explosionsdrücke, die mit Malzstaub 2 (p_{max} = 8.4 bar; K_{St} = 159 bar·m·s^{-1}) erzielt wurden. Es wird vermutet, dass es mit Maisstärke nicht gelang, eine ebenso optimale Staubverteilung zu erreichen.
Im Rahmen späterer Untersuchungen zur Explosionsunterdrückung von Elevatoren wurden die Vorversuche deshalb genutzt, um ausgewählte Druckentlastungsversuche mit eben dieser Maisstärke zu wiederholen.

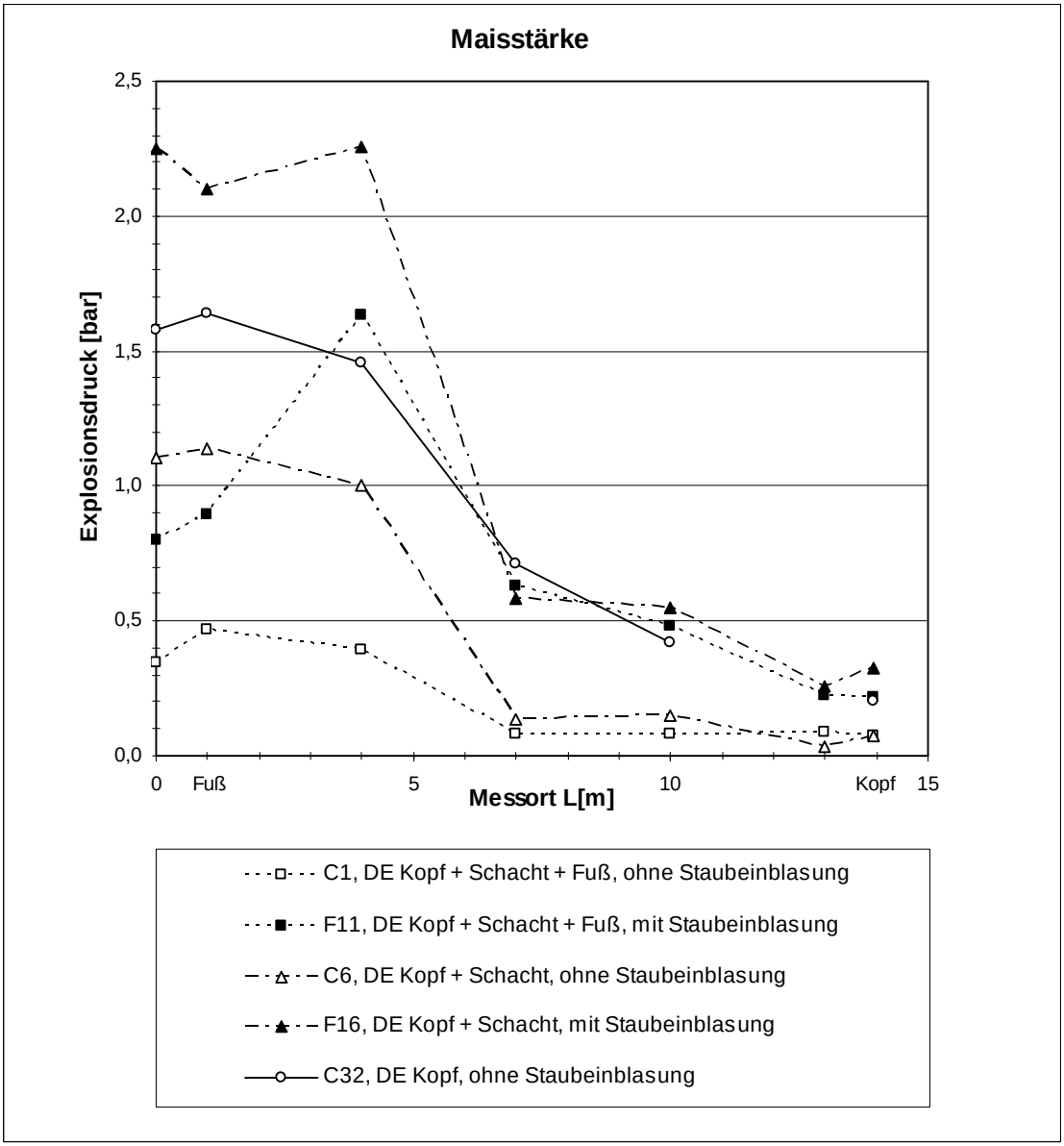


Bild 10: Vergleich der Ergebnisse nach Methode A (ohne Staubeinblasung: „offene“ Symbole) mit Methode B (mit Staubeinblasung: „volle“ Symbole) für Maisstärke (K_{St} = 204 bar·m·s^{-1})

Mit Druckentlastung von Elevatorfuß, -schächten und -kopf konnte nun ein maximaler Explosionsüberdruck von 0.71 bar erreicht werden. Mit Druckentlastung nur der Schächte und des Elevatorkopfes wurden schließlich 1.71 bar erreicht.

Weitere Versuche mit Maisstärke wurden nach Methode B durchgeführt, d.h. mit Staubeintrag aus unter Überdruck stehenden Staubvorratsbehältern. Im Gegensatz zu den Versuchen mit Weizenmehl und Malzstaub stellten sich mit dieser Methode wesentlich höhere Explosionsdrücke ein als im Falle der Dispergierung von abgelagertem Staub durch das laufende Becherwerk (Methode A).
Mit Zündortlage im druckentlasteten Elevatorfuß konnte erstmals eine starke Flammenbeschleunigung in Richtung der Druckentlastung im Elevatorschacht beobachtet werden (Bild 10, rechteckige „volle“ Symbole). Unmittelbar vor dieser Druckentlastungsöffnung wurde ein maximaler Explosionsüberdruck von p_{max} = 1.63 bar gemessen, der unmittelbar nach der Druckentlastung in Richtung Elevatorkopf auf ca. 0.6 bar abfällt.
In weiteren Versuchen wurde die Druckentlastung im Elevatorfuß verschlossen und nur noch mit Druckentlastungen in den Schächten und im Elevatorkopf gearbeitet. Dies führte zu einem weiteren Anstieg des Explosionsüberdrucks auf p_{max} = 2.26 bar!

Bei Anordnung der Druckentlastung nur im Elevatorkopf und Zündung ebenfalls im Elevatorkopf konnte eine außergewöhnlich starke Flammenbeschleunigungen und Drucksteigerung in Richtung des Elevatorfußes beobachtet werden.
Dieser Versuch führte zur vollständigen Zerstörung des Elevators. Die Elevatorschächte wurden aufgerissen und der Elevatorfuß wurde vollständig zerrissen und weggeschleudert (siehe Anhang 1, Bild A3 – A5). Abschätzungen ergaben einen Explosionsüberdruck im Elevatorfuß von ca. 5 bar.
Bei diesem Versuch war die handelsübliche Ausführung des Elevators im Einsatz. Danach wurde der Versuchs-Elevator in versteifter Ausführung wieder hergestellt.

Exemplarisch sind von einigen ausgewählten Versuchen der zeitliche Druck- und Flammenverlauf im Anhang 7.3 dargestellt.

5 Zusammenfassung und Diskussion der Ergebnisse

Die explosionstechnischen Untersuchungen in einem Becherelevator wurden nach zwei unterschiedlichen Methoden durchgeführt. Nach Methode A wurde sehr praxisnah verfahren, indem der im Elevator abgelagerte Staub durch das laufende Becherwerk aufgewirbelt und dann entzündet wurde. Ähnliche Verhältnisse liegen in der Praxis im Leerlaufbetrieb vor und bei voller Beladung des Elevators im Rücklaufschacht.
Mit dieser Vorgehensweise konnte jedoch nicht hinreichend sichergestellt werden, dass tatsächlich die optimalen Verhältnisse bezüglich Staubverteilung und Staubkonzentration erzielt wurden. Daher wurden vergleichende Versuche nach Methode B mit Einblasen definierter Staubmengen durchgeführt. Die Staubkonzentration wurde variiert bis die maximalen Explosionsdrücke auftraten.
Der Nachteil von Methode B besteht darin, dass durch Einblasen von Staub aus Druckbehältern die betriebsmäßig vorhandenen Strömungsverhältnisse gestört werden und zusätzlich Turbulenz induziert wird. Hierdurch kann sich die Verbrennungs-

geschwindigkeit der Stäube erheblich steigern, was zu einer Überschätzung des in der Praxis möglichen Explosionsablaufes führen kann.
Es war umso überraschender, dass mit Weizenmehl (K_{St} = 109 bar·m·s^{-1}) nach beiden Methoden ähnliche Explosionsüberdrücke erzielt wurden. Es bestätigten sich Erkenntnisse von Holbrow und Lunn [5], nach denen sich im Falle von Stäuben mit niedrigen K_{St}-Werten und somit geringen Verbrennungsgeschwindigkeiten die Versperrung des Elevatorschachtes dämpfend auf den Explosionsablauf auswirkt und die Wirkung der Turbulenzsteigerung dagegen nicht zum Tragen kommt. Als Ursache können die Anhebung des Strömungswiderstandes und Wärmeverluste durch das Becherwerk angesehen werden. Es konnte zwar eine Flammenfortpflanzung durch den gesamten Elevator beobachtet werden, jedoch waren die abschnittsweise gemittelten Flammengeschwindigkeiten mit bis zu 35 m/s relativ niedrig. Mit Methode B (Staubeinblasung) konnten partiell Flammengeschwindigkeiten im Bereich von 60 bis 120 m/s gemessen werden. Es war jedoch keine Korrelation zwischen Flammengeschwindigkeit und Explosionsdruck festzustellen.
Die maximalen Explosionsdrücke traten im Bereich des Zündortes und auf den ersten Metern des Elevatorschachtes auf und nahmen mit weiterem Flammenfortschritt ab. Die Ergebnisse lagen jedoch höher als die von Holbrow und Lunn gemessenen Werte.
Ohne zusätzliche Druckentlastung des Elevators wurde nach Methode A (Leerlaufbetrieb) ein maximaler Explosionsüberdruck von p_{max} = 0.49 bar gemessen und nach Methode B ein maximaler Explosionsüberdruck von p_{max} = 0.59.
Werden also Schüttgüter mit $K_{St} \leq 100$ bar·m·s^{-1} in einem Elevator gefördert und beträgt die Druckstoßfestigkeit [13] des Elevators $p \geq 1$ bar, so scheint es unter Berücksichtigung der Forschungsergebnisse möglich, ohne Längenbegrenzung des Elevators auf Maßnahmen der Explosionsdruckentlastung zu verzichten. Voraussetzung ist jedoch ein maximaler Becherabstand von 280 mm und allseitige maximale Wandabstände der Becher zum Schacht von 70 mm.
In Tabelle 3 werden Empfehlungen für die Auslegung der Explosionsdruckentlastung gegeben. Der Sicherheitsabstand zwischen der empfohlenen Druckstoßfestigkeit des Elevators und den tatsächlich gemessenen maximalen Explosionsdrücken berücksichtigt die Versuchsgenauigkeit, geringe Abweichungen der geometrischen Verhältnisse und mögliche Ungenauigkeiten in der Kennzahlermittlung.

Stellvertretend für brennbare Stäube mit 100 bar·m·s^{-1} < $K_{St} \leq$ 150 bar·m·s^{-1} wurde für die explosionstechnischen Untersuchungen ein Malzstaub verwendet, der eine außerordentlich hohe Staubungsneigung (mittlere Staubungszahl S_N = 29) besitzt [12] und nachfolgend als Malzstaub 1 bezeichnet wird.
Mit diesem Staub traten höhere Explosionsdrücke auf, als es auf Grund der Ergebnisse von Holbrow und Lunn zu erwarten war. Erstaunlich ist es, dass die höheren Explosionsdrücke mit nur einer Ausnahme dann auftraten, wenn nach Methode A gearbeitet wurde, d.h. Entzündung des Staub/Luft-Gemisches im Leerlaufbetrieb des Becherwerks mit Aufwirbelung des im Elevator abgelagerten Staubes. Dies bestätigt einerseits die Bedeutung des Staubungsverhaltens, zum anderen wurde bereits bei der Kennzahlermittlung sowohl im 1 m³-Behälter als auch in der 20 l - Kugel bemerkt, dass sich Malzstaub nur schwierig mit Überdruck aus Staubvorratsbehältern austragen lässt (Methode B). Der Grund ist vermutlich in der Morphologie des Staubes zu suchen. Es kann somit nicht ausgeschlossen werden, dass die genormten Verfahren für die

Kennzahlermittlung [7, 8] im 1 m³ - Behälter und in der 20 l - Kugel im Falle von Malzstaub zu geringe K_{St} – Werte ergeben.
Die gröberen Malzstaubpartikel, die im Rahmen der Kennzahlermittlung abgesiebt werden und bei den Explosionsversuchen im Elevator jedoch vorhanden sind, besitzen für die Staubwolkenentstehung im Leerlaufbetrieb des Elevators offenbar keine Relevanz, weil durch das laufende Becherwerk bevorzugt der Feinstaubanteil dispergiert wird.

Die abschnittsweise gemittelten Flammengeschwindigkeiten mit „Malzstaub 1“ erreichten mit und ohne Staubeinblasung maximal ca. 70 m/s. Es konnte keine Korrelation zwischen Flammengeschwindigkeit und Explosionsdruck festgestellt werden.
Nach den vorliegenden Erkenntnissen sollten für Schüttgüter mit $K_{St} \leq 150$ bar·m·s^{-1} bei einer Druckstoßfestigkeit des Elevators von 1 bar sowohl der Elevatorfuß und –kopf als auch die Elevatorschächte in Abständen von maximal 6 m druckentlastet werden.
Mit einer Druckstoßfestigkeit von 1.5 bar kann hingegen auf die Druckentlastung des Elevatorfußes verzichtet werden, wenn in einem Abstand von maximal 6 m über dem Fuß die Druckentlastung der Schächte erfolgt.
Wird der Elevator mit einer Druckstoßfestigkeit von 2 bar gebaut, so scheint es zunächst ausreichend, lediglich den Elevatorkopf mit einer Druckentlastung auszurüsten. Unter Berücksichtigung der Ergebnisse mit „Malzstaub 2“, deren K_{St}-Wert nur wenig oberhalb 150 bar·m·s^{-1} liegt, wird jedoch empfohlen, in Abständen von maximal 12 m zusätzliche Druckentlastungen in den Elevatorschächten zu installieren.
Diese Aussagen gelten wie schon zuvor nur unter der Voraussetzung, dass die maximalen Becherabstände 280 mm und die maximalen Wandabstände der Becher 70 mm betragen. In Tabelle 4 werden Empfehlungen für die Auslegung der Explosionsdruckentlastung gegeben.

Malzstaub 2 besitzt um ca. 10 – 15 % höhere Explosionskenngrößen (p_{max}, K_{St}) als Malzstaub 1. Die Explosionsüberdrücke im Elevator stiegen bei Verwendung von Malzstaub 2 jedoch sprunghaft um ca. 50 % an. Es ist zu vermuten, dass die turbulente Verbrennungsgeschwindigkeit von Malzstaub 2 gerade einen gewissen Schwellenwert übersteigt, so dass die Wirkung der vom Becherwerk im Elevator induzierte Turbulenz gegenüber der Versperrung durch die Becher dominiert und dadurch die Flammengeschwindigkeit und in der Folge den Explosionsdruck deutlich anhebt.
Ähnliche Effekte fanden Holbrow und Lunn [5], als sie unterschiedliche Maisstärken mit ebenfalls nur geringfügig unterschiedlichen Explosionskenngrößen verwendet haben.

Ein anderes Verhalten wurde beobachtet, als Maisstärke mit einer staubspezifischen Kenngröße von K_{St} = 204 bar·m·s^{-1} verwendet wurde. In diesem Falle wurden nach Methode B, also mit Staubeinblasung, wesentlich höhere Explosionsdrücke erzielt als im praxisnahen Betrieb ohne Staubeinblasung. Bei Stäuben mit relativ hohem K_{St}-Wert wirkt sich die zusätzliche Turbulenzinduktion durch das Einblasen aus Druckbehältern (20 bar Überdruck) offenbar in starkem Maße steigernd aus auf die turbulente Verbrennungsgeschwindigkeit und somit auf den zeitlichen Explosionsüberdruck.
Während ohne Staubeinblasung (Methode A) abschnittsweise gemittelte Flammengeschwindigkeiten von maximal v_F = 75 m/s gemessen wurden, erreichten die Flammengeschwindigkeiten mit Staubeinblasung bis zu v_F = 180 m/s.

Die Verhältnisse, wie sie im praktischen Elevatorbetrieb auftreten können, werden auf Grund der zusätzlichen Turbulenzinduktion vermutlich überschätzt.

Bei Schüttgütern mit staubspezifischen Kenngröße von $K_{St} \leq 210$ bar·m·s^{-1} wird auf Grund dieser Ergebnisse empfohlen, bei einer Druckstoßfestigkeit von 1.5 bar sowohl den Elevatorfuß und -kopf als auch die Elevatorschächte in maximalen Abständen von 6 m zu entlasten.
Mit einer Druckstoßfestigkeit von 2 bar kann hingegen auf die Druckentlastung des Elevatorfußes verzichtet werden, wenn in einem Abstand von maximal 6 m eine Druckentlastung der Schächte erfolgt (Tabelle 5).

Auslegung der Explosionsdruckentlastung

In den Tabellen 3 bis 5 werden auf der Grundlage der Explosionsversuche Empfehlungen abgeleitet für die Auslegung der Explosionsdruckentlastung von Becherelevatoren mit rechteckigem Förder- und Rücklaufschacht. In Abhängigkeit der Druckstoßfestigkeit des Becherelevators und des K_{St}-Wertes der Schüttgüter werden Angaben gemacht, ob eine Druckentlastung im Elevatorkopf und -fuß erfolgen muss, und in welchen maximalen Abständen zusätzliche Druckentlastungen in den Elevatorschächten realisiert werden müssen.
Der „Sicherheitsabstand“ zwischen den hier empfohlenen Druckstoßfestigkeiten und den tatsächlich gemessenen Explosionsüberdrücken berücksichtigt Versuchsungenauigkeiten, Ungenauigkeiten der Explosionskenngrößen der Schüttgüter und sonstige Einflüsse (z.B. Staubungsneigung), die im Rahmen der experimentellen Untersuchungen nicht umfassend berücksichtigt werden konnten.
Bei Schüttgütern, deren Feinstaubanteil einen K_{St}-Wert ≤ 100 bar·m·s^{-1} besitzt, kann auf die Explosionsdruckentlastung verzichtet werden, wenn eine ausreichende Druckstoßfestigkeit von $p \geq 1$ bar gegeben ist (s. Tabelle 3).

Die Angaben der Tabellen 3 bis 5 gelten unter folgenden Voraussetzungen:

- Zündortlage im Elevator (kein Eintrag von Explosionen aus angeschlossenen Anlagenteilen)
- Organische Stäube
- maximaler Explosionsüberdruck der Stäube $p_{max} \leq 10$ bar
- rechteckiger Schachtquerschnitt
- freie Fläche bezogen auf den Schachtquerschnitt < 60 %
- Becherabstand ≤ 280 mm mit $K_{St} \leq 150$ bar·m·s^{-1}
- Becherabstand ≤ 140 mm mit $K_{St} \leq 210$ bar·m·s^{-1}
- jede Druckentlastungsfläche ≥ Schachtquerschnittsfläche
- statischer Ansprechüberdruck der Druckentlastungseinrichtung $p_{stat} \leq 0{,}1$ bar
- freie Explosionsdruckentlastung ohne Abblasrohre
- Druckentlastungsfähigkeit der Entlastungseinrichtung $E_F = 1$

Tabelle 3: Auslegung der Explosionsdruckentlastung für einen Becherelevator mit zwei Rechteckschächten für Schüttgüter mit $K_{St} \leq 100$ bar·m·s^{-1}

Druckstoß-festigkeit [1] p [bar]	$K_{St} \leq 100$ bar•m•s^{-1}			gemessene Maximaldrücke im Gesamtsystem	
	Elevator-fuß	Elevator-kopf	Abstände Schacht [2] L [m]	nach Methode A p [bar]	nach Methode B p [bar]
0,25	E	E	3		
0,35	NE	E	3		
0,50	NE	E	6	0,31	0,11
1,00	NE	NE	NE	0,49	0,59*

[1] Überdruck

[2] maximale Einbauabstände der Druckentlastungsöffnungen gemessen ab Elevatorfuß

* mit getrocknetem Weizenmehl wurde ein maximaler Explosionsüberdruck von 0,71 bar gemessen (Versuch E 16)

Tabelle 4: Auslegung der Explosionsdruckentlastung für einen Becherelevator mit zwei Rechteckschächten für Schüttgüter mit 100 bar·m·s^{-1} < $K_{St} \leq 150$ bar·m·s^{-1}

Druckstoß-festigkeit [1] p [bar]	100 bar•m•s-1 < $K_{St} \leq 150$ bar•m•s^{-1}			gemessene Maximaldrücke im Gesamtsystem	
	Elevator-fuß	Elevator-kopf	Abstände Schacht [2] L [m]	nach Methode A p [bar]	nach Methode B p [bar]
0,25	Explosionsfestigkeit unzureichend				
0,35					
0,50	E	E	3		
1,00	E	E	6	0,61	0,15
1,50	NE	E	6	1,24	0,82
2,00	NE	E	12	1,37	1,43

[1] Überdruck

[2] maximale Einbauabstände der Druckentlastungsöffnungen gemessen ab Elevatorfuß

Tabelle 5: Auslegung der Explosionsdruckentlastung für einen Becherelevator mit zwei Rechteckschächten für Schüttgüter mit $K_{St} \leq 210$ bar·m·s^{-1}

Druckstoß-festigkeit [1] p [bar]	150 bar•m•s-1 < K_{St} ≤ 210 bar•m•s^{-1}			gemessene Maximaldrücke im Gesamtsystem	
	Elevator-fuß	Elevator-kopf	Abstände Schacht [2] L [m]	nach Methode A p [bar]	nach Methode B p [bar]
0,25	Explosionsfestigkeit unzureichend				
0,35					
0,50					
1,00	E	E	3		
1,50	E	E	6	0,71	1,63
2,00	NE	E	6	1,71	2,26

[1] Überdruck

[2] maximale Einbauabstände der Druckentlastungsöffnungen gemessen ab Elevatorfuß

Anmerkung:
Mit Druckentlastung nur im Elevatorkopf ergab sich nach Methode A ein maximaler Explosionsüberdruck von 2.1 bar mit Malzstaub 2 (Versuch B1) und nach Methode B bei Verwendung von Maisstärke ein maximaler Explosionsüberdruck im Elevatorfuß von bis zu 5 bar. Siehe hierzu die Bilder A3 bis A5 im Anhang.

6 Literaturhinweise

[1] VDI 2263 Blatt 8: 2008-12 Staubbrände und Staubexplosionen; Gefahren, Beurteilung, Schutzmaßnahmen; Brand- und Explosionsschutz an Elevatoren. Berlin: Beuth Verlag

[2] DIN EN 14491 : 2006-07 Schutzsysteme zur Druckentlastung von Staubexplosionen. Berlin: Beuth Verlag

[3] VDI 3673 Blatt 1: 2002-11 Druckentlastung von Staubexplosionen. Berlin: Beuth Verlag

[4] W. BARTKNECHT: Explosionsschutz: Grundlagen und Anwendung, S.: 709-715, Springer-Verlag, 1993.

[5] Holbrow, P., Lunn, G. A.: Explosion Venting of Bucket Elevators, Stage 2: Final Report (EC/01/50), Health and Safety Laboratory, Buxton, 2001

[6] Roser, M., Vogl, A., Radandt, S.: Brand- und Explosionsschutz an Elevatoren, Forschungsprojekt F-05-0001 (unveröffentlicht), Forschungsgesellschaft für angewandte Systemsicherheit und Arbeitsmedizin (FSA) Mannheim, 2002

[7] DIN EN 14034-1: 2004-12 Bestimmung der Explosionskenngrößen von Staub/Luft-Gemischen – Teil 1: Bestimmung des maximalen Explosionsdruckes p_{max} von Staub/Luft-Gemischen. Berlin: Beuth Verlag

[8] DIN EN 14034-2: 2006-08 Bestimmung der Explosionskenngrößen von Staub/Luft-Gemischen – Teil 2: Bestimmung des maximalen zeitlichen Druckanstiegs $(dp/dt)_{max}$ von Staub/Luft-Gemischen. Berlin: Beuth Verlag

[9] DIN EN 14034-3: 2006-08 Bestimmung der Explosionskenngrößen von Staub/Luft-Gemischen – Teil 3: Bestimmung der unteren Explosionsgrenze UEG von Staub/Luft-Gemischen. Berlin: Beuth Verlag

[10] DIN EN 13821: 2003-03 Explosionsfähige Atmosphären – Explosionsschutz – Bestimmung der Mindestzündenergie von Staub/Luft-Gemischen, Beuth Verlag, Berlin

[11] VDI 2263 Blatt 1: 1990-05 Staubbrände und Staubexplosionen; Gefahren, Beurteilung, Schutzmaßnahmen; Untersuchungsmethoden zur Ermittlung von sicherheitstechnischen Kenngrößen von Stäuben. Berlin: Beuth Verlag

[12] VDI 2263 Blatt 9: 2008-05 Staubbrände und Staubexplosionen; Gefahren, Beurteilungen, Schutzmaßnahmen; Bestimmung des Staubungsverhaltens von Schüttgütern. Berlin: Beuth Verlag

[13] DIN EN 14460: 2006-07 Explosionsfeste Geräte. Berlin: Beuth Verlag

7. Anhang

7.1 Bilddokumentation

7.2 Messergebnisse

7.3 Duck- und Flammenverläufe von ausgewählten Versuchen

7.4 Weitere Informationen zu den Kennzahlen der verwendeten Stäuben

7. Anhang

7.1 Bilddokumentation

Bild A1: Eingerüsteter Elevator im Aufbau, Vorderansicht

Bild A2: Eingerüsteter Elevator, Rückansicht

Bild A3: Zerstörter Elevatorfuß (Versuch D1), Produkt: Maisstärke mit Staubeinblasung, Zündort „Kopf“, Druckentlastung nur im Kopf, P1 ~ 5 bar, P3 ~ 2,4 bar, P7 ~ 0,5 bar

Bild A4: Aufgerissener Elevatorschacht (Versuch D1)

Bild A5: Abgesprengte Seitenteile des Elevatorfußes (Versuch D1)

Bild A6: Staubexplosion im druckentlasteten Becherelevator mit Explosionsübertragung in die druckentlastete Entstaubungsanlage über eine Rohrleitung DN 100 (Versuch A3) Schüttgut: Malzstaub 1; Zündortlage: Elevatorkopf; Druckentlastung im Elevatorkopf-, -fuß und in den Schächten

7.2 Messergebnisse

ohne Flascheneintrag, Malzstaub

Konstruktiver Explosionsschutz für Elevatoren

Projekt Nr.: F-05-0701

Vers. Nr.	Datum	Förder-menge	Zünd-energie	tv	Fuß	Explosionsdruck Schacht aufwärts					Kopf	Explosionsdruck Schacht abwärts					Auslauf	Fuß	Flammenlaufzeit Schacht aufwärts					Kopf	Flammenlaufzeit Schacht abwärts					Auslauf
					P1	P2 1m	P3 4m	P4 7m	P5 10m	P6 13m	P7 13,95m	P2_1 1m	P3_1 4m	P4_1 7m	P5_1 10m	P6_1 13m	P8	F1	F2 1m	F3 4m	F4 7m	F5 10m	F6 13m	F7 13,95m	F2_1 1m	F3_1 4m	F4_1 7m	F5_1 10m	F6_1 13m	F8
		[kg]	[J]	[s]	[bar]	[bar]	[bar]	[bar]	[bar]	[bar]	[bar]	[bar]	[bar]	[bar]	[bar]	[bar]	[bar]	[ms]	[ms]	[ms]	[ms]	[ms]	[ms]	[ms]	[ms]	[ms]	[ms]	[ms]	[ms]	[ms]
Malzstaub; Zündort Kopf; Aspiration = Ein; Druckentlastung im Kopf, beiden Schächten und Fuß; Elevatorleerlauf ohne Flascheneintrag																														
A 1	18.05.2007	100	1000	22	0,170	0,182	0,198	0,188	0,610	0,467	0,472	0,212	0,305	0,150	0,483	0,428	0,327		1139	1306		709			848	795	735	670	339	744
A 2	21.05.2007	100	1000	22	0,153	0,149	0,140	0,061	0,254	0,230	0,209	0,174	0,209	0,106	0,301	0,196	0,172	1514	1725	1849	1091	522			1542	1700	541	498	336	740
A 3	22.05.2007	100	1000	22	0,141	0,144	0,120	0,066	0,294	0,262	0,230	0,150	0,165	0,106	0,259	0,212	0,267	2547	2266	1929	1212	648			2775	3373	653	612	419	
A 16	05.07.2007	100	1000	22	0,152	0,124	0,137	0,055	0,350	0,167	0,131	0,153	0,118	0,055	0,202	0,144	0,072	1626	1850	2040	1300	231	103		1521	1132	505	241	189	609
A 17	06.07.2007	100	1000	22	0,159	0,163	0,151	0,085	0,370	0,341	0,309	0,145	0,148	0,116	0,339	0,261	0,321		3868	3443	3004	755	771	128			753		438	794
Malzstaub; Zündort Fuß; Aspiration = Ein; Druckentlastung im Kopf, beiden Schächten und Fuß; Elevatorleerlauf ohne Flascheneintrag																														
B 10 *	05.09.2008	100	2000	35	0,539	0,723	0,784	0,393	0,403	0,239	0,208	0,488	0,702	0,227	0,234	0,175	0,116													
B 11 *	05.09.2008	100	2000	35	0,314	0,306	0,294	0,149	0,145	0,092	0,088	0,495	0,781	0,171	0,179	0,088	0,051			383	477	540	697	834	325	503		1767	1075	1311
Malzstaub; Zündort Kopf; Aspiration = Ein; Druckentlastung im Kopf und beiden Schächten; Elevatorleerlauf ohne Flascheneintrag																														
A 5	24.05.2007	100	1000	22	0,179	0,194	0,142	0,067	0,285	0,246	0,219	0,167	0,188	0,099	0,316	0,204	0,173	2269	2582		2041	560	54	55	2226	2327	564	527	378	601
A 6	24.05.2007	100	1000	22	0,131	0,129	0,103	0,085	0,372	0,298	0,255	0,117	0,123	0,125	0,257	0,232	0,253	1725	2008	2192	1330	728	698		1606	1177	707		437	754
Malzstaub; Zündort Kopf; Aspiration = Ein; Druckentlastung nur im Kopf; Elevatorleerlauf ohne Flascheneintrag																														
A 26	13.07.2007	100	1000	22	0,607	0,571	0,441	0,286	0,447	0,363	0,320	0,874	1,066	0,954	0,691	0,292	0,284		2564	2009	1256	552			645	612		573	254	616
A 27	17.07.2007	100	1000	22	0,575	0,509	0,330	0,398	0,494	0,269	0,239	0,580	0,583	0,748	0,516	0,230	0,170	891	1174	1411	1616	315			809	383	344	301	215	469
B 7 *	04.09.2008	100	2000	35	0,819	0,773	0,425	0,736	0,806	0,483	0,367	1,694	1,753	1,389	0,804	0,321	0,277		2753	2053	1295	679			747	732		626	337	
B 8 *	04.09.2008	100	2000	35	0,768	0,914	0,662	1,168	1,120	0,433	0,276	1,088	1,458	1,272	0,630	0,229	0,100		1937	1216	1142				1221	1195	1142	1021	363	926
Malzstaub; Zündort Kopf; ohne Aspiration; Druckentlastung im Kopf und beiden Schächten; Elevatorleerlauf ohne Flascheneintrag																														
A 7	24.05.2007	100	1000	22	0,063	0,065	0,072	0,043	0,154	0,139	0,150	0,060	0,076	0,055	0,134	0,116	0,101	1412	1615	1566	1728	914			1330	1102		732	378	
A 8	25.05.2007	100	1000	22	0,185	0,174	0,227	0,115	0,580	0,383	0,339	0,180	0,129	0,088	0,316	0,276	0,346					841					861	750		876

ohne Flascheneintrag, Malzstaub

Konstruktiver Explosionsschutz für Elevatoren

Projekt Nr.: F-05-0701

Vers. Nr.	Datum	Förder-menge	Zünd-energie	tv	Fuß	Explosionsdruck Schacht aufwärts					Kopf	Explosionsdruck Schacht abwärts					Auslauf	Fuß	Flammenlaufzeit Schacht aufwärts					Kopf	Flammenlaufzeit Schacht abwärts					Auslauf
					P1	P2 1m	P3 4m	P4 7m	P5 10m	P6 13m	P7 13,95m	P2_1 1m	P3_1 4m	P4_1 7m	P5_1 10m	P6_1 13m	P8	F1	F2 1m	F3 4m	F4 7m	F5 10m	F6 13m	F7 13,95m	F2_1 1m	F3_1 4m	F4_1 7m	F5_1 10m	F6_1 13m	F8
		[kg]	[J]	[s]	[bar]	[bar]	[bar]	[bar]	[bar]	[bar]	[bar]	[bar]	[bar]	[bar]	[bar]	[bar]	[bar]	[ms]	[ms]	[ms]	[ms]	[ms]	[ms]	[ms]	[ms]	[ms]	[ms]	[ms]	[ms]	[ms]
Malzstaub; Zündort Fuß; Aspiration = Ein; Druckentlastung im Kopf und beiden Schächten; Elevatorleerlauf ohne Flascheneintrag																														
A 10	31.05.2007	100	1000	22	1,092	1,098	0,966	0,382	0,308	0,149	0,129	1,08	1,044	0,14	0,220	0,131	0,118	332	516	525	563	588			391	451			492	
A 11	31.05.2007	100	1000	22	0,753	0,762	0,675	0,289	0,247	0,119	0,106	0,697	0,618	0,08	0,169	0,077	0,051	640	654	602	665				583	664	627		690	
	die folgenden Versuche (A 18 - A 19) wurden mit unterschiedlichen tv gefahren																													
A 18	09.07.2007	100	1000	10	0,936	0,911	0,564	0,244	0,279	0,149	0,145	0,907	0,654	0,146	0,168	0,140	0,079		221							260				
A 19	10.07.2007	100	1000	60	1,226	1,236	1,190	0,427	0,382	0,181	0,192	1,038	0,675	0,109	0,191	0,140	0,107		442		592				517	585				
B 6 *	03.09.2008	100	2000	35	1,280	1,265	1,100	0,435	0,390	0,157	0,140	1,173	0,976	0,161	0,250	0,123	0,062		53	241	284					284	195			
Malzstaub; Zündort Fuß; Aspiration = Ein; Druckentlastung nur im Kopf; Elevatorleerlauf ohne Flascheneintrag																														
A 24	12.07.2007	100	1000	22	1,364	1,370	1,305	0,857	0,605	0,314	0,340	1,312	1,202	0,632	0,424	0,259	0,158		255	304	485					308				
A 25	12.07.2007	100	1000	22	1,142	1,092	0,803	0,577	0,406	0,215	0,224	1,142	1,019	0,496	0,307	0,170	0,115		240	308						283				
B 1 *	02.09.2008	100	1000	35	1,626	1,769	2,100	1,761	1,256	0,443	0,492	1,526	1,414	1,251	0,689	0,376	0,241		79	393	530	582	624		587	551	603			
B 3 *	03.09.2008	100	2000	35	1,861	2,088	2,048	1,761	1,728	0,782	0,738	1,734	1,544	1,415	0,722	0,463	0,366		84	441	519	566	587		414	514	556			
B 4 *	03.09.2008	100	2000	35	1,779	1,681	1,775	1,571	1,083	0,517	0,413	1,833	1,788	1,874	0,909	0,437	0,237		136	524	703	755	787		498	729	524			
B 5 *	03.09.2008	100	2000	35	1,984	2,004	1,946	1,745	1,036	0,412	0,439	1,797	1,474	0,997	0,626	0,357	0,217		84	288	346				231	351	383			
Malzstaub; Zündort Mitte aufsteigender Schacht; Aspiration = Ein; Druckentlastung im Kopf und Fuß; Elevatorleerlauf ohne Flascheneintrag																														
A 15	04.06.2007	125	1000	22	0,162	0,215	0,222	0,273	0,415	0,291	0,255	0,397	0,780	0,833	0,537	0,228	0,225					860	1990			3892	3852		3644	
Malzstaub; Zündort Fuß; Aspiration = Ein; Druckentlastung im Kopf und Fuß; Elevatorleerlauf ohne Flascheneintrag																														
E 3 *	09.10.2008	100	5000	35	0,266	0,335	0,576	0,566	0,358	0,245	0,194	0,291	0,235	0,223	0,208	0,187			41	144	212		3119	3226	131	912	1414		2735	

* Malzstaub Typ 2

Staubeintrag über Flaschen, Malzstaub

Konstruktiver Explosionsschutz für Elevatoren

Projekt Nr.: F-05-0701

Vers. Nr.	Datum	Staub-konzen-tration	Zünd-energie	tv	Fuß	Explosionsdruck Schacht aufwärts					Kopf	Explosionsdruck Schacht abwärts					Auslauf	Fuß	Flammenlaufzeit Schacht aufwärts					Kopf	Flammenlaufzeit Schacht abwärts					Auslauf
					P1	P2 1m	P3 4m	P4 7m	P5 10m	P6 13m	P7 13,95m	P2_1 1m	P3_1 4m	P4_1 7m	P5_1 10m	P6_1 13m	P8	F1	F2 1m	F3 4m	F4 7m	F5 10m	F6 13m	F7 13,95m	F2_1 1m	F3_1 4m	F4_1 7m	F5_1 10m	F6_1 13m	F8
		[g/m³]	[J]	[s]	[bar]	[bar]	[bar]	[bar]	[bar]	[bar]	[bar]	[bar]	[bar]	[bar]	[bar]	[bar]	[bar]	[ms]	[ms]	[ms]	[ms]	[ms]	[ms]	[ms]	[ms]	[ms]	[ms]	[ms]	[ms]	[ms]
Malzstaub; Zündort Fuß; Aspiration = Ein; Druckentlastung im Kopf, beiden Schächten und Fuß; Elevatorleerlauf mit Flascheneintrag																														
F 1	08.11.2007	750	2000	0.6	0,110	0,115	0,108	0,092	0,080	0,060	0,048	0,112	0,098	0,082	0,070	0,045	0,024	810	952	1077	1231	1253	1293	1315	1013	1536	1889	2059	1395	2215
Malzstaub; Zündort Fuß; Aspiration = Ein; Druckentlastung im Kopf und beiden Schächten; Elevatorleerlauf mit Flascheneintrag																														
F 2	08.11.2007	750	2000	0.6	0,351	0,311	0,233	0,120	0,132	0,080	0,084	0,361	0,324	0,107	0,098	0,077	0,047	802	883	974	1015	1070	1103	1121	946	998	1395	1273	1165	1525
F 3	09.11.2007	1000	2000	0.6	0,262	0,257	0,177	0,109	0,111	0,055	0,052	0,268	0,218	0,060	0,068	0,053	0,028	831	942	1031	1114	1142	1182	1203	1010	1150	1726	1518	1282	1737
F 4	12.11.2007	500	2000	0.6	0,198	0,197	0,178	0,113	0,110	0,046	0,056	0,191	0,110	0,075	0,065	0,044	0,036	953	1128	1332		1457	1500	1526	1303	2578	2066	1769	1683	1962
F 15	20.11.2007	750	2000	0.6	0,815	0,825	0,689	0,327	0,299	0,132	0,122	0,810	0,678	0,158	0,166	0,104	0,064	695	788	888					824	927				
Malzstaub; Zündort Kopf; Aspiration = Ein; Druckentlastung im Kopf und beiden Schächten; Elevatorleerlauf mit Flascheneintrag																														
F 6	12.11.2007	750	2000	0.6	0,091	0,1	0,077	0,053	0,06	0,059	0,054	0,086	0,059	0,061	0,06	0,058	0,043	3094	3180	3234	3312	1346	1135	924	2378	1683	1235	1110	960	
F 7	13.11.2007	750	2000	0.6	0,062	0,064	0,066	0,06	0,066	0,062	0,066	0,062	0,06	0,056	0,061	0,061	0,047	1758	1869	2063	2224	2292	1246		1662	1504	1282	1117	956	1232
Malzstaub; Zündort Fuß; Aspiration = Ein; Druckentlastung nur im Kopf, Elevatorleerlauf mit Flascheneintrag																														
F 13	19.11.2007	750	2000	0.6	0,904	1,041	1,153	1,111	0,814	0,326	0,281	0,743	0,616	0,485	0,395	0,230	0,15		885	999	1081	1110			988	1074				
F 14	20.11.2007	750	2000	0.6	1,406	1,400	1,279	0,916	0,582	0,301	0,287	1,427	1,385	0,982	0,607	0,291	0,114	877	1017	1081					1046	1128				

ohne Flascheneintrag, Weizenmehl

Konstruktiver Explosionsschutz für Elevatoren

Projekt Nr.: F-05-0701

Vers. Nr.	Datum	Förder-menge	Zünd-energie	tv	Fuß	Explosionsdruck Schacht aufwärts					Kopf	Explosionsdruck Schacht abwärts					Auslauf	Fuß	Flammenlaufzeit Schacht aufwärts					Kopf	Flammenlaufzeit Schacht abwärts					Auslauf
					P1	P2 1m	P3 4m	P4 7m	P5 10m	P6 13m	P7 13,95m	P2_1 1m	P3_1 4m	P4_1 7m	P5_1 10m	P6_1 13m	P8	F1	F2 1m	F3 4m	F4 7m	F5 10m	F6 13m	F7 13,95m	F2_1 1m	F3_1 4m	F4_1 7m	F5_1 10m	F6_1 13m	F8
		[kg]	[J]	[s]	[bar]	[bar]	[bar]	[bar]	[bar]	[bar]	[bar]	[bar]	[bar]	[bar]	[bar]	[bar]	[bar]	[ms]	[ms]	[ms]	[ms]	[ms]	[ms]	[ms]	[ms]	[ms]	[ms]	[ms]	[ms]	[ms]
Ungetrocknetes Weizenmehl; Zündort Fuß; Aspiration = Ein; Druckentlastung im Kopf und beiden Schächten; Elevatorleerlauf ohne Flascheneintrag																														
B 1	05.06.2007	125	2000	22	0,280	0,184	0,161	0,086	0,102	0,070	0,085	0,266	0,302	0,084	0,073	0,073	0,078		1335	1500	1660	1745				1560	2120	1980	1850	2045
B 2	06.06.2007	100	2000	22	0,155	0,158	0,128	0,054	0,060	0,028	0,038	0,148	0,104	0,069	0,051	0,032	0,024	800	945	1125					1083	3625				
Ungetrocknetes Weizenmehl; Zündort Fuß; Aspiration = Aus; Druckentlastung im Kopf und beiden Schächten; Elevatorleerlauf ohne Flascheneintrag																														
B 3	06.06.2007	100	2000	22	0,127	0,131	0,112	0,055	0,047	0,028	0,027	0,121	0,084	0,032	0,035	0,029	0,025	250	400	545					490					
B 4	06.06.2007	125	2000	22	0,231	0,226	0,173	0,073	0,063	0,061	0,047	0,236	0,193	0,073	0,059	0,052	0,045	630	795						780	932				
Ungetrocknetes Weizenmehl; Zündort Fuß; Aspiration = Ein; Druckentlastung nur im Kopf; Elevatorleerlauf ohne Flascheneintrag																														
B 5	12.06.2007	100	2000	22	0,300	0,310	0,345	0,337	0,279	0,141	0,147	0,290	0,223	0,181	0,151	0,117	0,087	400	609	847	946	1023								
B 6	13.06.2007	100	2000	22	0,276	0,284	0,293	0,290	0,216	0,095	0,103	0,268	0,219	0,186	0,137	0,091	0,072		671	911	1018	1121							1067	
Ungetrocknetes Weizenmehl; Zündort Fuß; Aspiration = Ein; Ohne Druckentlastungen; Elevatorleerlauf ohne Flascheneintrag																														
B 7	13.06.2007	100	2000	22	0,383	0,389	0,406	0,389	0,352	0,295	0,289	0,371	0,348	0,332	0,308	0,280	0,254		433	602	713	806	906	1157		770				
B 9	15.06.2007	100	2000	22	0,484	0,460	0,475	0,459	0,423	0,348	0,341	0,414	0,350	0,339	0,344	0,323	0,279	426	555	967	1092	1192			1053					
B 10	18.06.2007	100	2000	22	0,306	0,311	0,349	0,341	0,325	0,252	0,252	0,251	0,247	0,267	0,247	0,235	0,216		526	824	935	1021			777	902				
A 2	21.08.2008	100	2000	35	0,422	0,412	0,437	0,388	0,259	0,210	0,215	0,409	0,355	0,293	0,256	0,214	0,120		167	370	510	614			587	610				800

Staubeintrag über Flaschen, Weizenmehl

Konstruktiver Explosionsschutz für Elevatoren

Projekt Nr.: F-05-0701

Vers. Nr.	Datum	Staub-konzen-tration	Zünd-energie	tv	Fuß	Explosionsdruck Schacht aufwärts					Kopf	Explosionsdruck Schacht abwärts					Auslauf	Fuß	Flammenlaufzeit Schacht aufwärts					Kopf	Flammenlaufzeit Schacht abwärts					Auslauf
					P1	P2 1m	P3 4m	P4 7m	P5 10m	P6 13m	P7 13,95m	P2_1 1m	P3_1 4m	P4_1 7m	P5_1 10m	P6_1 13m	P8	F1	F2 1m	F3 4m	F4 7m	F5 10m	F6 13m	F7 13,95m	F2_1 1m	F3_1 4m	F4_1 7m	F5_1 10m	F6_1 13m	F8
		[g/m³]	[J]	[s]	[bar]	[bar]	[bar]	[bar]	[bar]	[bar]	[bar]	[bar]	[bar]	[bar]	[bar]	[bar]	[bar]	[ms]	[ms]	[ms]	[ms]	[ms]	[ms]	[ms]	[ms]	[ms]	[ms]	[ms]	[ms]	[ms]
Ungetrocknetes Weizenmehl; Zündort Fuß; Aspiration = Ein; Druckentlastung im Kopf und beiden Schächten; Elevatorleerlauf mit Flascheneintrag																														
E 1	29.10.2007	750	2000	0,6	0,069	0,047	0,045	0,022	0,038	0,040	0,050	0,096	0,109	0,077	0,073	0,039		1021	1189	1465	1676	1787	1880	1912		1737	1937	2023	2066	2346
E 2	30.10.2007	1000	2000	0,6	0,081	0,079	0,042	0,055	0,070	0,057	0,067	0,092	0,082	0,047	0,057	0,050		827	1028	1239	1350	1522	1615	1647	1336	1601	1851	2030	1751	2331
E 3	30.10.2007	1250	2000	0,6	0,066	0,066	0,052	0,034	0,042	0,057	0,053	0,075	0,064	0,044	0,051	0,045		820	963	1089	1160	1225	1325	1357	1114	1318	2489	1955	1372	1952
Ungetrocknetes Weizenmehl; Zündort Fuß; Aspiration = Ein; Druckentlastung nur im Kopf; Elevatorleerlauf mit Flascheneintrag																														
E 4	31.10.2007	750	2000	0,6	0,274	0,293	0,258	0,280	0,200	0,186	0,126	0,291	0,287	0,264	0,208	0,106		831	1028	1250	1379	1400	1436	1450	1282	1389	1679	3624	3835	2038
E 5	31.10.2007	1000	2000	0,6	0,100	0,110	0,097	0,092	0,082	0,030	0,070	0,168	0,174	0,154	0,096	0,062		927	1146	1411	1565	1633	1690	1708	1662	1737	2084	2424	2002	2131
E 6	31.10.2007	1250	2000	0,6	0,299	0,307	0,301	0,296	0,245	0,054	0,133	0,305	0,291	0,247	0,181	0,119		824	974	1103	1210	1235	1293	1314	1121	1422	1873	2195	2389	
E 7	02.11.2007	500	2000	0,6	0,274	0,273	0,258	0,251	0,218	0,107	0,121	0,315	0,279	0,254	0,190	0,116	0,070	902	1128	1343	1429	1465	1497	1515	1400	1425				
E 8	02.11.2007	1500	2000	0,6	0,349	0,350	0,355	0,361	0,281	0,135	0,162	0,359	0,341	0,271	0,236	0,163	0,094	810	923	996	1055	1084	1110	1121	1017	1043	2074	1822	1135	3759
E 9	05.11.2007	2000	2000	0,6	0,267	0,273	0,307	0,305	0,262	0,111	0,104	0,260	0,207	0,164	0,147	0,093	0,044	755	821	908	971	1022	1055	1106	816	2315	2063	1744	1562	2675
E 20	23.11.2007	1500	2000	0,6	0,510	0,515	0,515	0,508	0,409	0,193	0,183	0,446	0,388	0,308	0,220	0,138		874	1046	1203	1325	1361	1407		1301					
Ungetrocknetes Weizenmehl; Zündort Kopf; Aspiration = Ein; Druckentlastung im Kopf und beiden Schächten; Elevatorleerlauf mit Flascheneintrag																														
E 10	05.11.2007	1500	2000	0,6	0,188	0,187	0,182	0,117	0,083	0,069	0,092	0,082	0,082	0,086	0,087	0,083	0,054	2027	2081	2131	2188	2202	1117		1912	1765	1586	1332	927	1246
Ungetrocknetes Weizenmehl; Zündort Kopf; Aspiration = Ein; Druckentlastung nur im Kopf; Elevatorleerlauf mit Flascheneintrag																														
E 11	06.11.2007	1500	2000	0,6	0,056	0,058	0,053	0,048	0,050	0,045	0,051	0,054	0,051	0,046	0,048	0,044	0,032										2084	1407	935	1261
E 12	06.11.2007	1500	2000	0,6	0,226	0,243	0,280	0,278	0,221	0,121	0,137	0,189	0,128	0,113	0,139	0,106	0,064	2553	2611	2697	2761	2797	2825	2840	2363	2084	1722	1318	938	1228
E 13	06.11.2007	1000	2000	0,6	0,052	0,051	0,051	0,041	0,046	0,045	0,046	0,052	0,051	0,049	0,049	0,044	0,039										2260	1415	935	1196
Getrocknetes Weizenmehl; Zündort Fuß; Aspiration = Ein; Druckentlastung nur im Kopf; Elevatorleerlauf mit Flascheneintrag																														
E 14	07.11.2007	1500	2000	0,6	0,328	0,335	0,339	0,316	0,241	0,121	0,103	0,324	0,279	0,212	0,168	0,097	0,041	748	838	924	981	1013	1046	1182	788	1984	1801	1615	1404	
E 15	07.11.2007	1500	2000	0,6	0,447	0,471	0,495	0,486	0,386	0,210	0,174	0,401	0,352	0,302	0,254	0,163	0,075	809	885	953	1006	1031	1060	2406	2439	2363	2249	2009	2141	2958
Getrocknetes Weizenmehl; Zündort Fuß; Aspiration = Ein; ohne Druckentlastung: Elevatorleerlauf mit Flascheneintrag																														
E 16	19.11.2007	1500	2000	0,6	0,646	0,705	0,705	0,583	0,468	0,401	0,395	0,547	0,507	0,455	0,433	0,378	0,363	698	788	813	867	981	1056	1103	795					

Staubeintrag über Flaschen, Weizenmehl

Konstruktiver Explosionsschutz für Elevatoren

Projekt Nr.: F-05-0701

Vers. Nr.	Datum	Staub-konzen-tration	Zünd-energie	tv	Fuß	Explosionsdruck Schacht aufwärts					Kopf	Explosionsdruck Schacht abwärts					Auslauf	Fuß	Flammenlaufzeit Schacht aufwärts					Kopf	Flammenlaufzeit Schacht abwärts					Auslauf
					P1	P2 1m	P3 4m	P4 7m	P5 10m	P6 13m	P7 13,95m	P2_1 1m	P3_1 4m	P4_1 7m	P5_1 10m	P6_1 13m	P8	F1	F2 1m	F3 4m	F4 7m	F5 10m	F6 13m	F7 13,95m	F2_1 1m	F3_1 4m	F4_1 7m	F5_1 10m	F6_1 13m	F8
		[g/m³]	[J]	[s]	[bar]	[bar]	[bar]	[bar]	[bar]	[bar]	[bar]	[bar]	[bar]	[bar]	[bar]	[bar]	[bar]	[ms]	[ms]	[ms]	[ms]	[ms]	[ms]	[ms]	[ms]	[ms]	[ms]	[ms]	[ms]	[ms]
Ungetrocknetes Weizenmehl; Zündort Fuß; Aspiration = Ein; ohne Druckentlastung: Elevatorleerlauf mit Flascheneintrag																														
E 17	19.11.2007	1500	2000	0,6	0,572	0,584	0,582	0,556	0,509	0,436	0,434	0,560	0,532	0,446	0,428	0,424	0,356	827	917	1060	1164	1261	1368	1483	1035	1207				
E 21	26.11.2007	1500	2000	0,6	0,548	0,557	0,562	0,514	0,536	0,592	0,597	0,493	0,442	0,506	0,534	0,589		845	1056	1150	1232	1257	1300	1329	1074	1203	1626	1504	1440	

ohne Flascheneintrag, Maisstärke

Konstruktiver Explosionsschutz für Elevatoren

Projekt Nr.: F-05-0701

Vers. Nr.	Datum	Förder-menge	Zünd-energie	Fuß	Explosionsdruck Schacht aufwärts					Kopf	Explosionsdruck Schacht abwärts					Auslauf	Fuß	Flammenlaufzeit Schacht aufwärts					Kopf	Flammenlaufzeit Schacht abwärts					Auslauf
				P1	P2 1m	P3 4m	P4 7m	P5 10m	P6 13m	P7 13,95m	P2_1 1m	P3_1 4m	P4_1 7m	P5_1 10m	P6_1 13m	P8	F1	F2 1m	F3 4m	F4 7m	F5 10m	F6 13m	F7 13,95m	F2_1 1m	F3_1 4m	F4_1 7m	F5_1 10m	F6_1 13m	F8
		[kg]	[J]	[bar]	[bar]	[bar]	[bar]	[bar]	[bar]	[bar]	[bar]	[bar]	[bar]	[bar]	[bar]	[bar]	[ms]	[ms]	[ms]	[ms]	[ms]	[ms]	[ms]	[ms]	[ms]	[ms]	[ms]	[ms]	[ms]
Getrocknete Maisstärke; Zündort Fuß; Aspiration = Ein; Druckentlastung im Kopf, beiden Schächten und Fuß; Elevatorleerlauf ohne Flascheneintrag																													
C 1	20.06.2007	100	1000	0,348	0,332	0,351	0,145	0,137	0,088	0,073	0,470	0,395	0,084	0,082	0,091	0,047			443	722	846	967	1048		445	753	1354	1154	1733
C 2	20.06.2007	100	2000	0,339	0,367	0,251	0,067	0,060	0,050	0,042	0,395	0,177	0,025	0,036	0,062	0,043			502	1051	1245	1414	1484		1403	1161	1577	1633	2253
C 3	25.06.2007	225	2000	0,279	0,339	0,267	0,118	0,104	0,081	0,082	0,306	0,106	0,046	0,064	0,096	0,067		301	383	910	1124	1339	1432		2084	1758	1586	1490	1995
G 1	18.06.2009	100	5000	0,530	0,550	0,420	0,150	0,180	0,110	0,110	0,660	-	0,290	0,260	0,120	0,060		50	143	269	648	941	1019	80	126	216	-	-	-
G 2	19.06.2009	100	5000	-	0,490	0,470	0,190	0,210	0,150	0,140	0,540	-	0,210	0,180	0,110	0,060		100	114	236	395	571	634	90	114	255	1075	809	1910
G 3	23.06.2009	100	2000	0,470	0,460	0,330	0,110	-	0,070	0,060	0,580	-	0,140	0,110	0,060	0,030		100	148	291	702	1065	1156	119	148	315	1566		1670
G 4	23.06.2009	100	2000	0,640	0,650	0,600	0,170	0,170	0,120	0,100	0,710	-	0,240	0,200	0,100	0,045		119	157	271	-	1067	1152	119	157	295	2205		-
Getrocknete Maisstärke; Zündort Fuß; Aspiration = Ein; Druckentlastung im Kopf und beiden Schächten; Elevatorleerlauf ohne Flascheneintrag																													
C 6	28.06.2007	225	2000	1,104	0,682	0,329	0,135		0,084	0,077	1,135	1,000	0,135	0,146	0,035	0,044									189				
C 7	29.06.2007	100	2000	1,172	0,780	0,387	0,165		0,083	0,082	1,096	0,530	0,091	0,075		0,052		172											
G 5	24.06.2009	100	2000	1,210	1,040	0,550	0,170	0,060	0,120	0,100	0,110	0,210	0,290	1,430	1,170	0,060		81	107						106	81			
G 6	24.06.2009	100	2000	1,710	1,410	1,180	0,250	0,270	0,180	0,150	0,210	0,420	0,510	2,190	1,670			81	141						155	125			
Getrocknete Maisstärke; Zündort Kopf, Aspiration = Ein; Druckentlastung nur im Kopf; Elevatorleerlauf ohne Flascheneintrag																													
C 28	18.07.2007	225	2000	0,573	0,406	0,418	0,494	0,975	0,723	0,659	0,625	1,134	1,202	0,923	0,607	0,486					2207				2213	2073	1253	2174	
C 29	18.07.2007	100	2000	0,320	0,282	0,230	0,378	0,707	0,510	0,429	0,314	0,277	0,311	0,422	0,480	0,398	2154	2546	2794	1507	294			1998	1389	731	297		881
C 30	19.07.2007	100	2000	0,359	0,323	0,225	0,331	0,779	0,466	0,399	0,352	0,355	0,470	0,712	0,522	0,306	1676	2009	2363	2564	180			1454	970	519	183		523
Getrocknete Maisstärke; Zündort Fuß; Aspiration = Ein; Druckentlastung nur im Kopf; Elevatorleerlauf ohne Flascheneintrag																													
C 32	19.07.2007	0	2000	1,581	1,418	0,791	0,629	0,505	0,212	0,200	1,641	1,454	0,714	0,420		0,088									263				
C 33	20.07.2007	100	2000	0,946	0,791	0,394	0,331	0,249	0,123	0,126	0,861	0,404	0,236	0,144		0,083			571	1088	1278	1429	1604		2330	2074	1800	1692	2590
C 34	20.07.2007	0	2000	1,324	1,222	1,324	0,930	0,568	0,301	0,325	1,322	1,250	0,623	0,355		0,148			560	601					583				

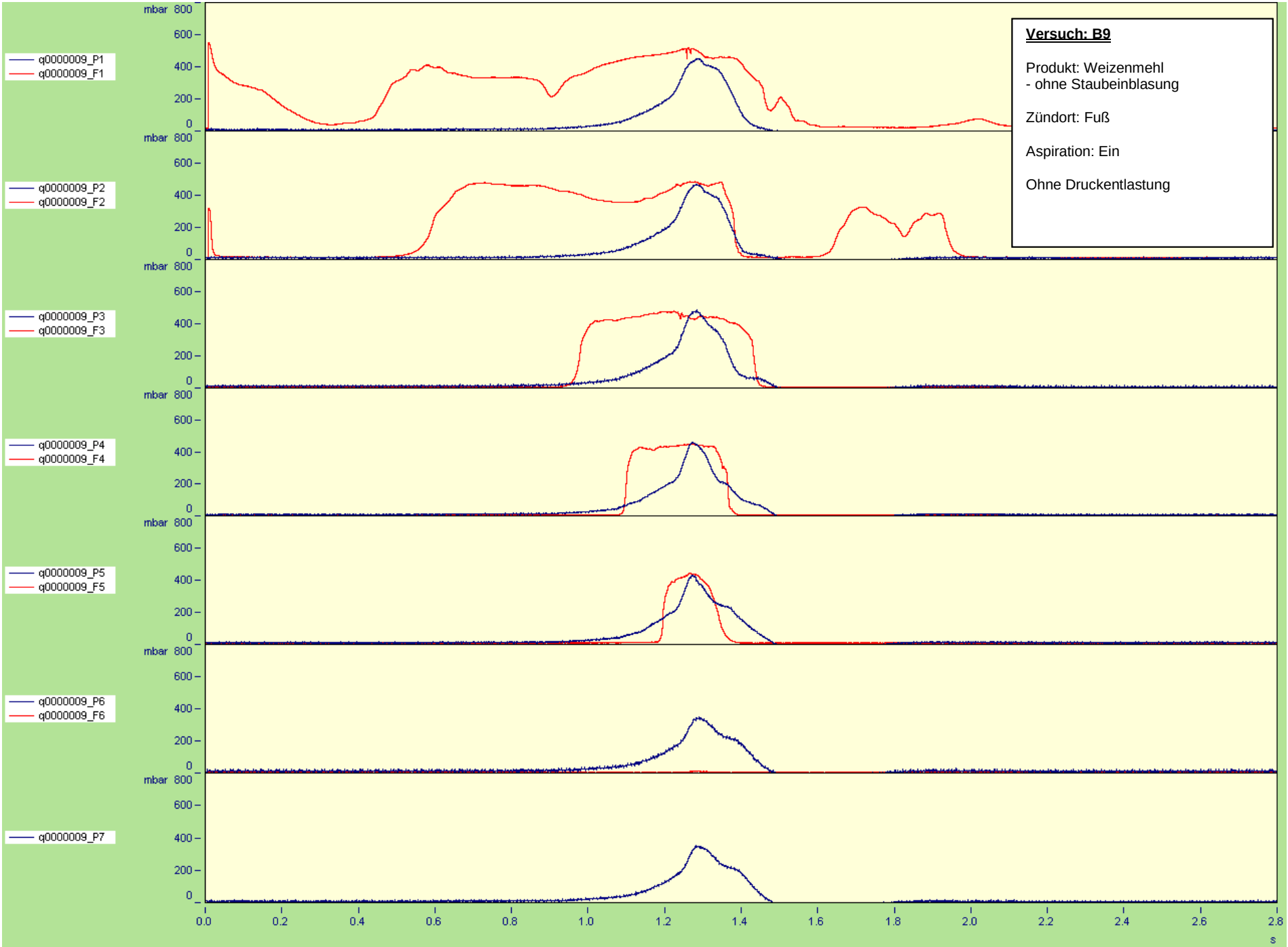
Staubeintrag über Flaschen, Maisstärke

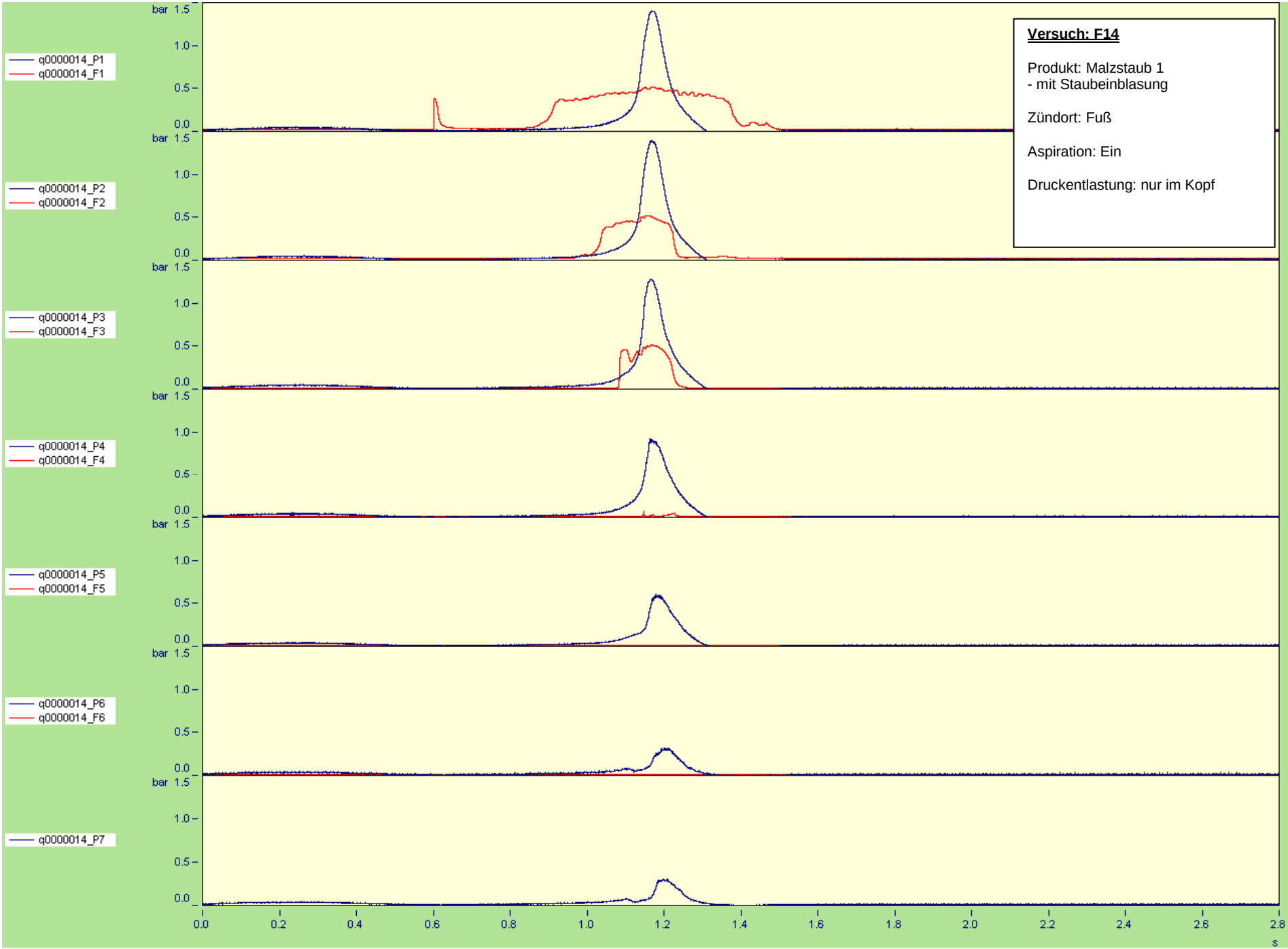
Konstruktiver Explosionsschutz für Elevatoren

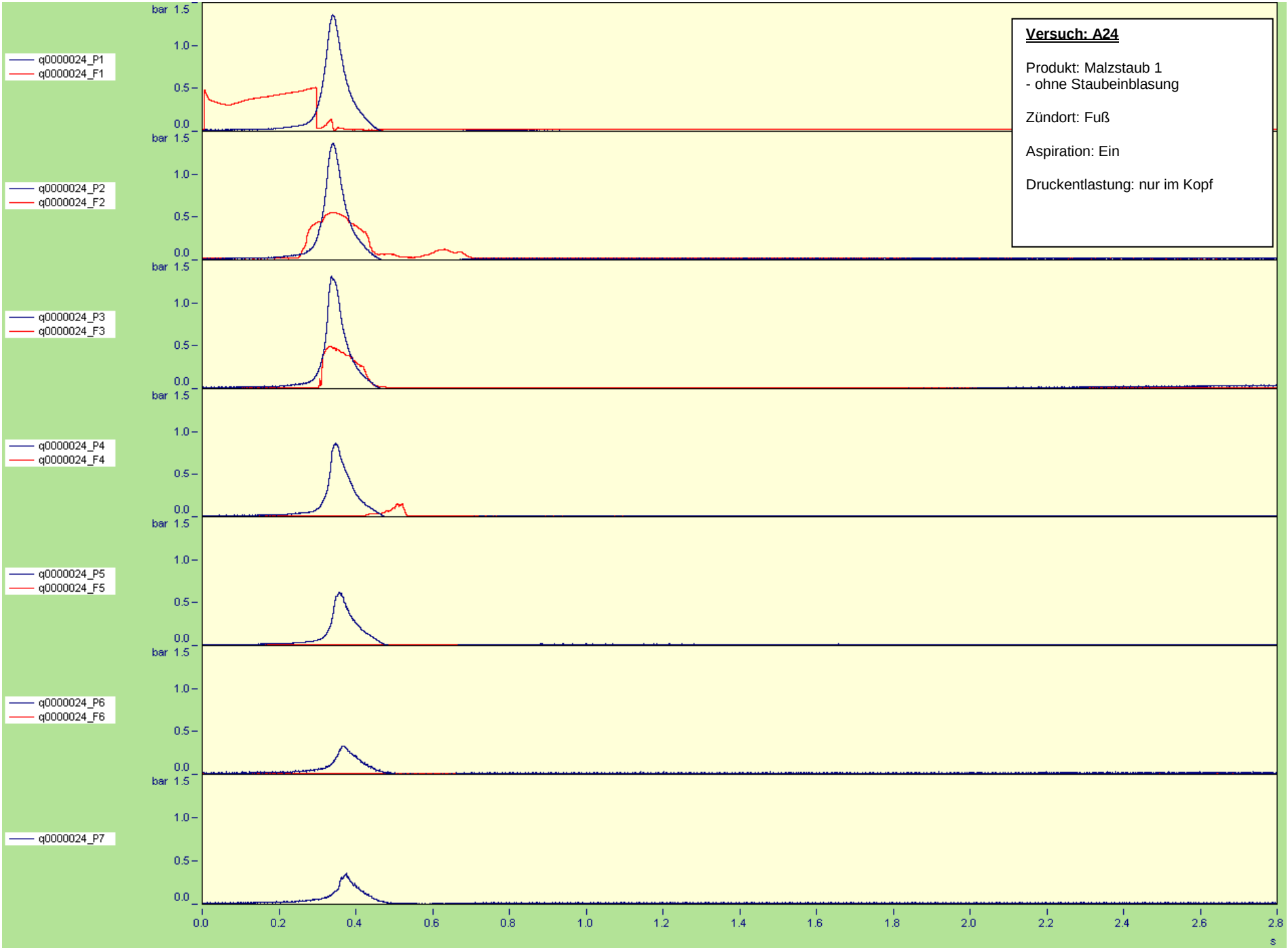
Projekt Nr.: F-05-0701

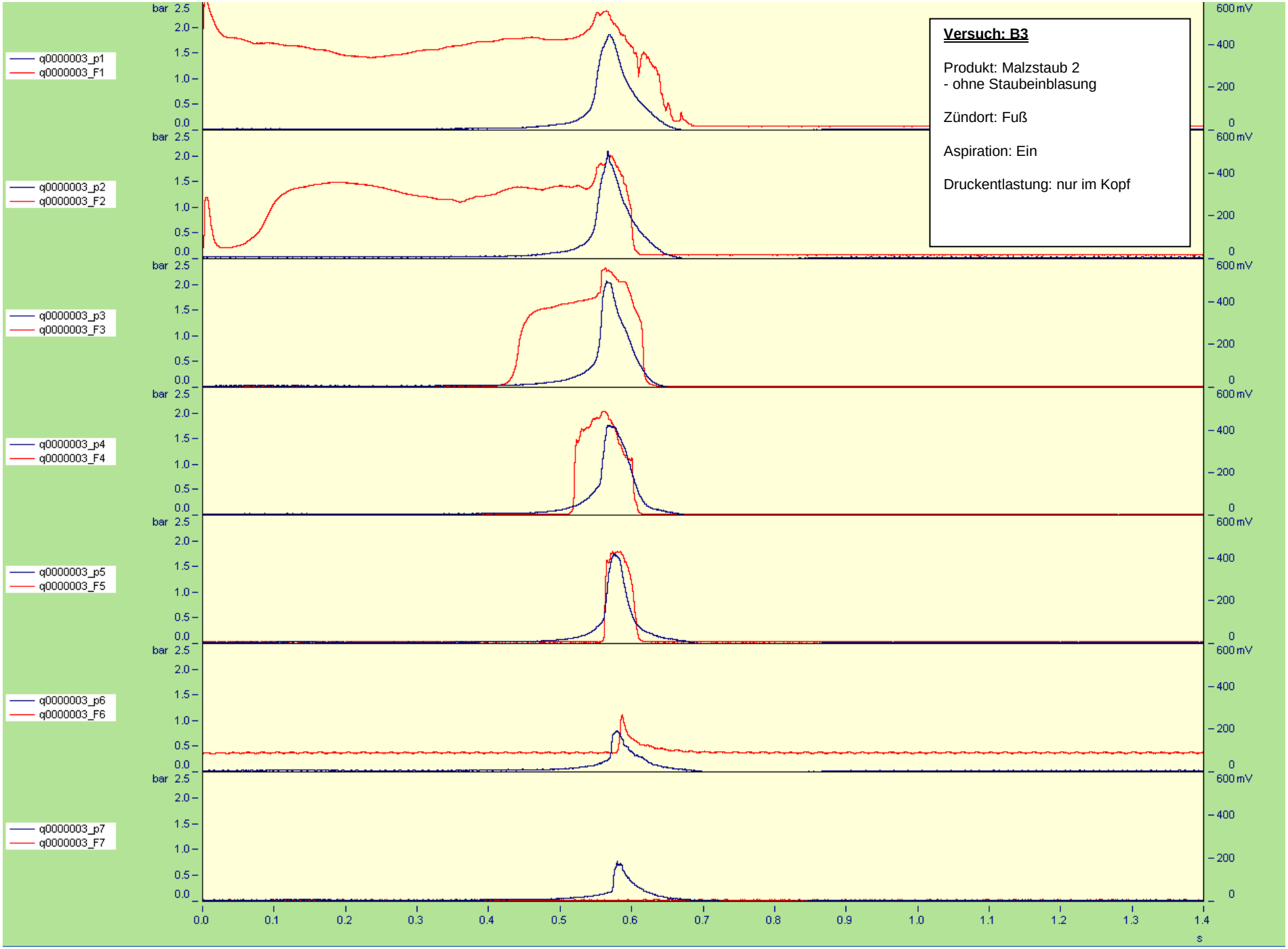
Vers. Nr.	Datum	Staub-konzen-tration [g/m³]	Zünd-energie [J]	Fuß P1 [bar]	Explosionsdruck Schacht aufwärts P2 1m [bar]	P3 4m [bar]	P4 7m [bar]	P5 10m [bar]	P6 13m [bar]	Kopf P7 13,95m [bar]	Explosionsdruck Schacht abwärts P2_1 1m [bar]	P3_1 4m [bar]	P4_1 7m [bar]	P5_1 10m [bar]	P6_1 13m [bar]	Auslauf P8 [bar]	Fuß F1 [ms]	Flammenlaufzeit Schacht aufwärts F2 1m [ms]	F3 4m [ms]	F4 7m [ms]	F5 10m [ms]	F6 13m [ms]	Kopf F7 13,95m [ms]	Flammenlaufzeit Schacht abwärts F2_1 1m [ms]	F3_1 4m [ms]	F4_1 7m [ms]	F5_1 10m [ms]	F6_1 13m [ms]	Auslauf F8 [ms]
Getrocknete Maisstärke; Zündort Kopf; Aspiration = Ein; Druckentlastung nur im Kopf; Elevatorleerlauf mit Flascheneintrag; Bei einem angenommenen Elevatorvolumen von VEL = 3 m³ wurde mit 1000 g/m³ gearbeitet																													
D 1	25.07.2007	1000	2000	~ 5	~ 3,5	~2,4	1,920	1,110	0,504	0,498	~3,5	~2,4	1,640	1,140	0,523	0,566	169	178	174	148	140			169	154	141	125	83	174
Getrocknete Maisstärke; Zündort Fuß; Aspiration = Ein; Druckentlastung im Kopf, beiden Schächten und Fuß; Elevatorleerlauf mit Flascheneintrag																													
F 8	13.11.2007	1000	2000	0,910	0,950	1,000	0,496	0,424	0,180	0,185	0,878	1,479	0,340	0,317	0,140	0,074		709	759	795				723	784				
F 9	14.11.2007	750	2000	0,616	0,650	0,679	0,279	0,277	0,215	0,201	0,619	0,786	0,232	0,272	0,212	0,164	759	796	873	916	1083	1184	1244	839	948	1253	1294	1271	1486
F 10	14.11.2007	1250	2000	0,888	0,943	0,981	0,549	0,426	0,432	0,422	0,976	1,553	0,340	0,554	0,446	0,293	673	727	770	791	920	978	1006	727	791	1092	1035	1017	1343
F 11	15.11.2007	1500	2000	0,801	0,852	0,833	0,516	0,386	0,197	0,215	0,891	1,630	0,633	0,478	0,222	0,119		734	774	809	852	902	931	741	791	1114	1049	974	1239
F 12	15.11.2007	1750	2000	0,585	0,608	0,673	0,332	0,489	0,504	0,470	0,602	0,490	0,355	0,952	0,506	0,382	713	728	777	813	953	1074	1109	738	795	1157	1128	1110	1389
Getrocknete Maisstärke; Zündort Fuß; Aspiration = Ein; Druckentlastung im Kopf und beiden Schächten; Elevatorleerlauf mit Flascheneintrag																													
F 16	21.11.2007	1500	2000	2,251	2,216	1,859	0,833	0,600	0,424	0,327	2,099	2,254	0,580	0,549	0,257	0,127	662	695	723	752				695	734				
Getrocknete Maisstärke; Zündort Kopf; Aspiration = Ein; Druckentlastung im Kopf und beiden Schächten; Elevatorleerlauf mit Flascheneintrag																													
F 17	21.11.2007	1500	2000	1,039	1,055	1,034	0,478	0,264	0,301	0,205	0,748	0,402	0,259	0,610	0,263	0,145	1067	1074	1107	1124	813	709		1017	806	763	731	709	

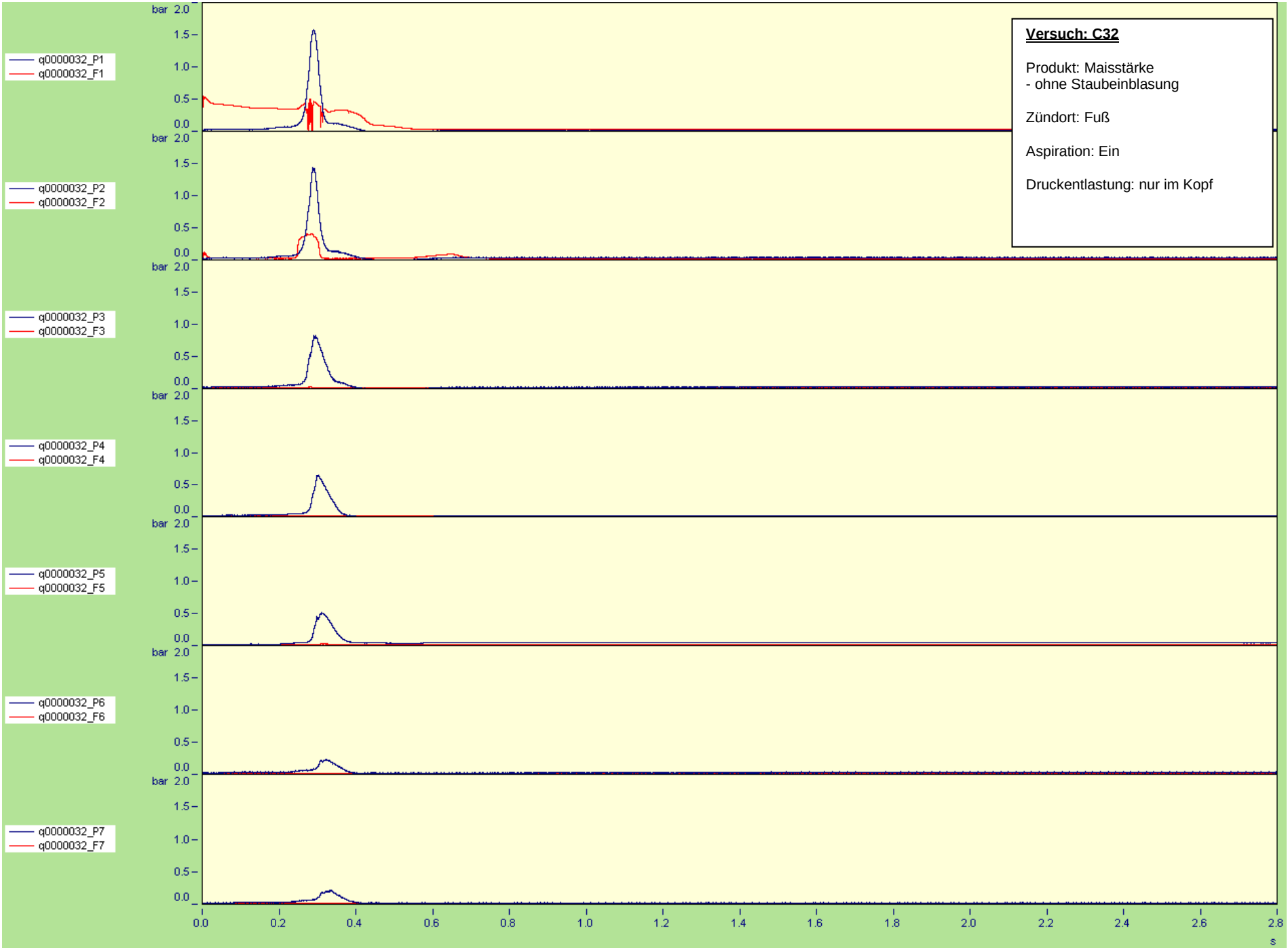
7.3 Zeitliche Druck- und Flammenverläufe von ausgewählten Versuchen

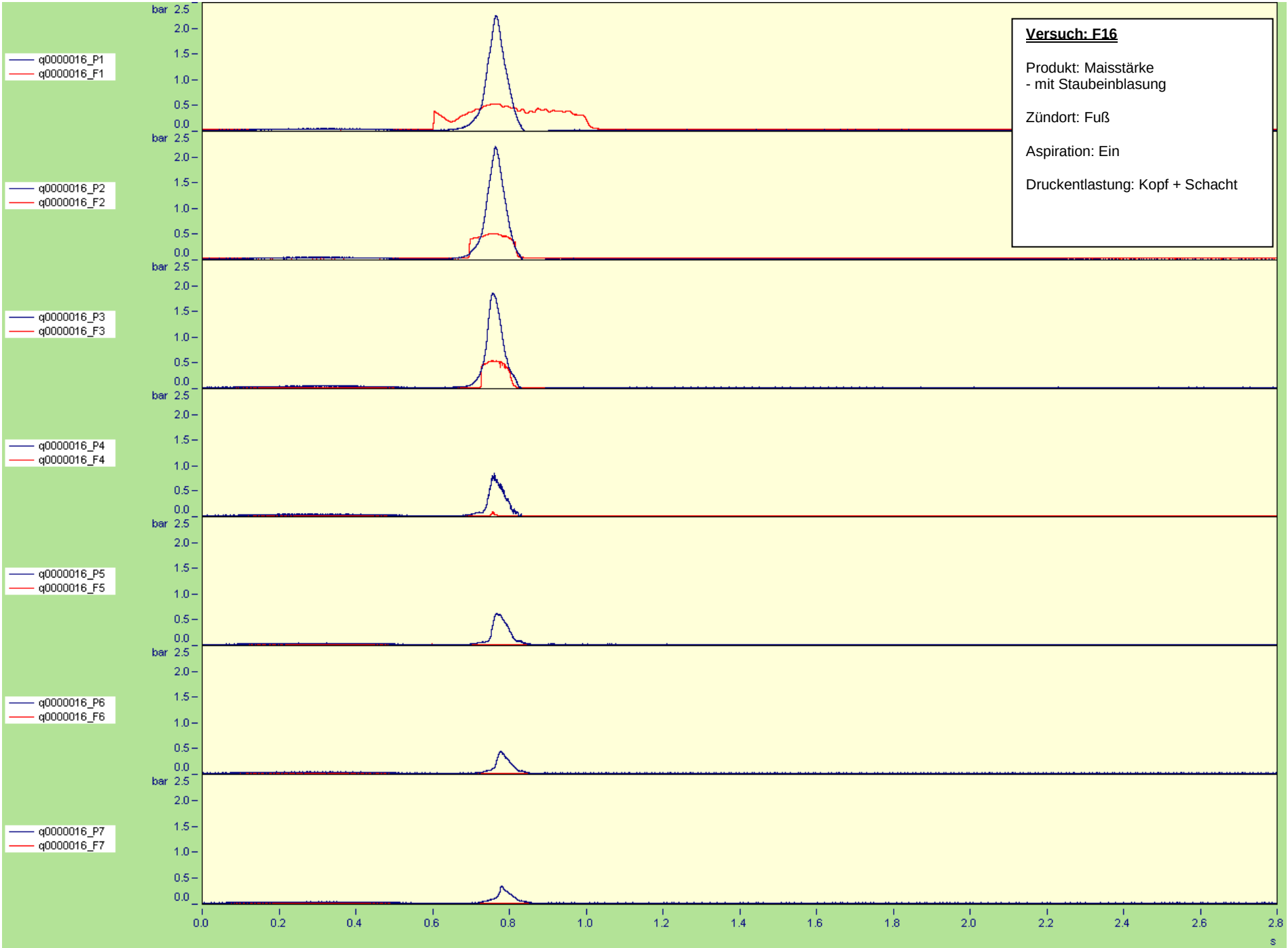

Versuch: B9
Produkt: Weizenmehl
- ohne Staubeinblasung
Zündort: Fuß
Aspiration: Ein
Ohne Druckentlastung
q0000009_P1
q0000009_F1
q0000009_P2
q0000009_F2
q0000009_P3
q0000009_F3
q0000009_P4
q0000009_F4
q0000009_P5
q0000009_F5
q0000009_P6
q0000009_F6
q0000009_P7
mbar
800
600
400
200
0
0.0
0.2
0.4
0.6
0.8
1.0
1.2
1.4
1.6
1.8
2.0
2.2
2.4
2.6
2.8
s


q0000014_P1
q0000014_F1
q0000014_P2
q0000014_F2
q0000014_P3
q0000014_F3
q0000014_P4
q0000014_F4
q0000014_P5
q0000014_F5
q0000014_P6
q0000014_F6
q0000014_P7
bar
1.5
1.0
0.5
0.0
0.0
0.2
0.4
0.6
0.8
1.0
1.2
1.4
1.6
1.8
2.0
2.2
2.4
2.6
2.8
s
Versuch: F14
Produkt: Malzstaub 1
- mit Staubeinblasung
Zündort: Fuß
Aspiration: Ein
Druckentlastung: nur im Kopf


q0000024_P1
q0000024_F1
q0000024_P2
q0000024_F2
q0000024_P3
q0000024_F3
q0000024_P4
q0000024_F4
q0000024_P5
q0000024_F5
q0000024_P6
q0000024_F6
q0000024_P7
bar
1.5
1.0
0.5
0.0
0.0
0.2
0.4
0.6
0.8
1.0
1.2
1.4
1.6
1.8
2.0
2.2
2.4
2.6
2.8
s
Versuch: A24
Produkt: Malzstaub 1
- ohne Staubeinblasung
Zündort: Fuß
Aspiration: Ein
Druckentlastung: nur im Kopf


q0000003_p1
q0000003_F1
q0000003_p2
q0000003_F2
q0000003_p3
q0000003_F3
q0000003_p4
q0000003_F4
q0000003_p5
q0000003_F5
q0000003_p6
q0000003_F6
q0000003_p7
q0000003_F7
bar
600 mV
0.0
0.5
1.0
1.5
2.0
2.5
0
200
400
0.1
0.2
0.3
0.4
0.5
0.6
0.7
0.8
0.9
1.0
1.1
1.2
1.3
1.4
s
Versuch: B3
Produkt: Malzstaub 2
- ohne Staubeinblasung
Zündort: Fuß
Aspiration: Ein
Druckentlastung: nur im Kopf


Versuch: C32
Produkt: Maisstärke
- ohne Staubeinblasung
Zündort: Fuß
Aspiration: Ein
Druckentlastung: nur im Kopf
q0000032_P1
q0000032_F1
q0000032_P2
q0000032_F2
q0000032_P3
q0000032_F3
q0000032_P4
q0000032_F4
q0000032_P5
q0000032_F5
q0000032_P6
q0000032_F6
q0000032_P7
q0000032_F7
bar
2.0
1.5
1.0
0.5
0.0
0.0
0.2
0.4
0.6
0.8
1.0
1.2
1.4
1.6
1.8
2.0
2.2
2.4
2.6
2.8
s


q0000016_P1
q0000016_F1
q0000016_P2
q0000016_F2
q0000016_P3
q0000016_F3
q0000016_P4
q0000016_F4
q0000016_P5
q0000016_F5
q0000016_P6
q0000016_F6
q0000016_P7
q0000016_F7
bar
2.5
2.0
1.5
1.0
0.5
0.0
0.0
0.2
0.4
0.6
0.8
1.0
1.2
1.4
1.6
1.8
2.0
2.2
2.4
2.6
2.8
s
Versuch: F16
Produkt: Maisstärke
- mit Staubeinblasung
Zündort: Fuß
Aspiration: Ein
Druckentlastung: Kopf + Schacht

Versuch: D1
Produkt: Maisstärke
- mit Staubeinblasung
Zündort: Kopf
Aspiration: Ein
Druckentlastung: nur im Kopf
Elevator wurde zerstört
P1 ~ 5 bar; P3 ~ 2,4 bar;
P7 = 0.5 bar
q0000001_P1
q0000001_F1
q0000001_P2
q0000001_F2
q0000001_P3
q0000001_F3
q0000001_P4
q0000001_F4
q0000001_P5
q0000001_F5
q0000001_P6
q0000001_F6
q0000001_P7
q0000001_F7
bar
600 mV
s

7.4 Weitere Informationen zu den Kennzahlen der verwendeten Stäuben

Tabelle: Explosionskennzahlen der verwendeten Stäube

UM - Urmuster

GM - genormtes Muster (<63 µm; getrocknet)

Produkt		Kornanalyse [%] (Luftstrahl.)					F [%]	MZE mit Ind. [mJ]	MZE o. Ind. [mJ]	ZT [°C]	GT [°C]	BZ
		<500	<250	<125	<63	<32						
Maisstärke getr. (03411)	UM				100	99,7	2,1	4 < MZE ≤ 5	100 < MZE ≤ 500	380	520	5
	GM				100			4 < MZE ≤ 5	50 < MZE ≤ 100	380	520	5
Weizenmehl Typ 550	UM		100	94,2	52,5	28,4	11,7	100 < MZE ≤ 500		380	410	2
	GM				100			10 < MZE ≤ 50		380	350	2
Malzstaub I (grob vorgesiebt)	UM	85,3	74,2	59,7	46,9	38,6	5,9	5 < MZE ≤ 10	100 < MZE ≤ 500	380	290	2
	GM				100			5 < MZE ≤ 10	100 < MZE ≤ 500	370	290	2
Malzstaub II (grob vorgesiebt)	UM	86,4	78	62,9	48,6	39,1	6,4	< MZE ≤	< MZE ≤			
	GM				100			5 < MZE ≤ 10	100 < MZE ≤ 500	370		

Produkt		Staubungsneigung	
		Staubungszahl	Gruppe
Maisstärke getr. (03411)	UM	10,2	4
	GM		
Weizenmehl Typ 550	UM	0,6	1
	GM		
Malzstaub I (grob vorgesiebt)	UM	29	5
	GM		
Malzstaub II (grob vorgesiebt)	UM	13,2	4
	GM		

Produkt		Prüfapparatur	P_{max} [bar]	K_{St} [bar·m·s^{-1}]	Bemerkungen
Maisstärke getrocknet	UM	1 m³	8,7	204	Maisstärke: Urmuster und genormtes Muster sind nahezu identisch
	GM	1 m³	8,7	204	
Weizenmehl Typ 550	UM	1 m³	7,5	88	
	GM	1 m³ (20 l-Kugel)	8,2 (6,8)	133 (109)	
Malzstaub I (grob vorgesiebt)	UM	20 l-Kugel (1 m³)	6,4 (8,2)	133 (119)	1 m³: stets Verstopfungen im Schnellöffnungsventil!
	GM	20 l-Kugel	7,9	143	
Malzstaub II (grob vorgesiebt)	UM				
	GM	20 l-Kugel	8,4	159	

Berufsgenossenschaft
Nahrungsmittel und Gaststätten
Dynamostr. 7 - 11; 68165 Mannheim

Zentrallabor

BGN
Berufsgenossenschaft
Nahrungsmittel
und Gaststätten

Analysenbericht Nr.

zu Messbericht Nr.
Auftraggeber
Betrieb
Datum der Analyse 20.02.08
Analyse durchgeführt von Nic

Korngrößenanalyse

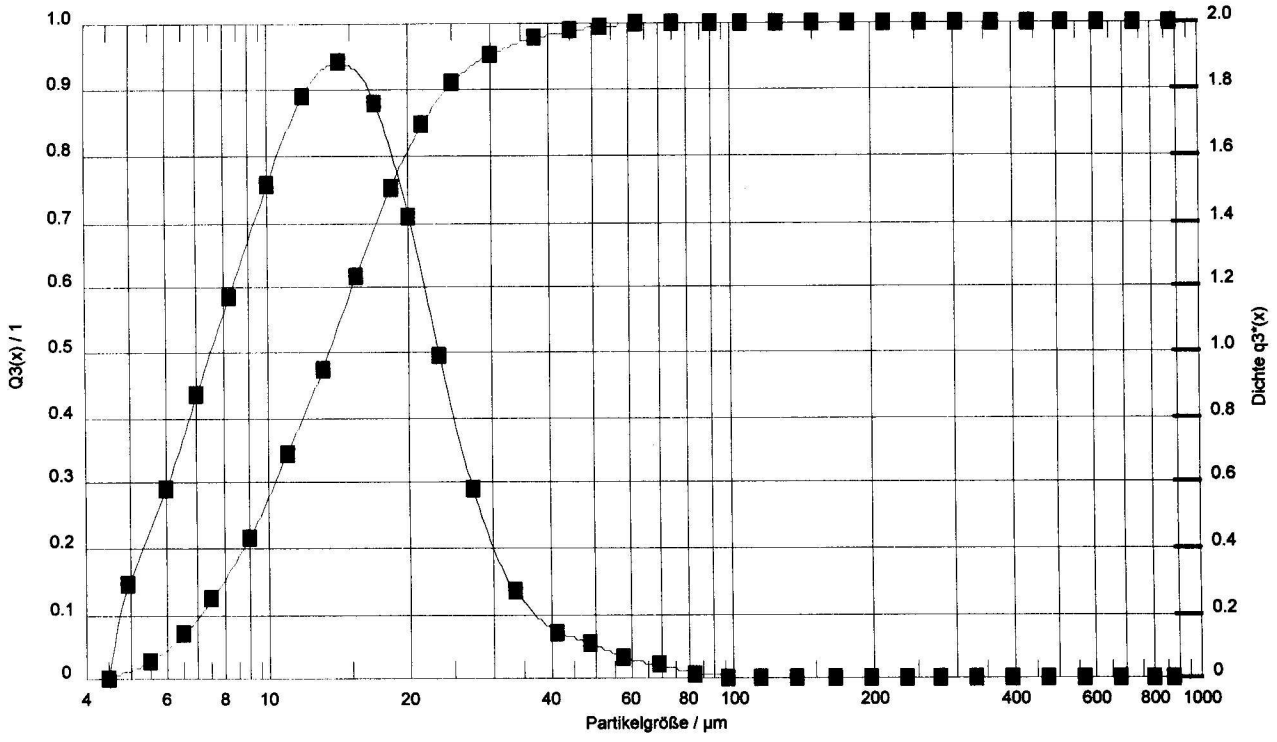
Kennzeichnung der Probe

Bezeichnung Maisstärke, getrocknet
Probenahmedatum HELOS/DOS Dateiname

Analysenparameter

System	Sympatec HELOS (H0872)				
Dipergierer	RODOS		Messbedingung	Nicklisch	
Dosierer	VIBRI		Messbereich	R5: 0.5/4.5...875µm	
Druck	2,00	bar	Messzeit	09:12:21	
Unterdruck	0,00	mbar	Messdauer	30,32	s
Förderrate	80,00	%	Zykluszeit	500	ms
Betthöhe	1,50	mm	Start bei	1,00% auf	C.Opt
Drehzahl	0,00	%	Referenzmessung	00:00:23, 0,00	%
c_opt =	4,95	%	Auswertung	LD (V 3.4 Rel.1)	

Diagramm



Volumenverteilung

x0/µm	Q3/	x0/µm	Q3/	x0/µm	Q3/	x0/µm	Q3/
4,50	0,00	18,50	74,80	75,00	99,93	305,00	100,00
5,50	2,45	21,50	84,01	90,00	100,00	365,00	100,00
6,50	6,59	25,00	90,44	105,00	100,00	435,00	100,00
7,50	11,91	30,00	94,96	125,00	100,00	515,00	100,00
9,00	21,10	37,50	97,47	150,00	100,00	615,00	100,00
11,00	34,18	45,00	98,56	180,00	100,00	735,00	100,00
13,00	47,01	52,50	99,22	215,00	100,00	875,00	100,00
15,50	61,33	62,50	99,67	255,00	100,00		

Umrechnung in eine Siebanalyse

< 4µm:	0,00	< 10µm:	27,64				
< 20µm:	79,41	< 32µm:	95,63	< 63µm:	99,68	< 71µm:	99,85
<125µm:	100,00	<250µm:	100,00	<500µm:	100,00		

Partikelgröße / µm, interpoliert bei Q3 = nn %

x10 =	7,14 µm	x50 =	13,52 µm	x90 =	24,76 µm
x16 =	8,17 µm	x84 =	21,50 µm	x99 =	50,04 µm

Moment der Verteilung

M1,3 = 15,4 µm

Kommentar:

Mannheim, 20.02.08

Malzstaub im Anlieferungszustand

Auf der rechten Bildseite ist der grob vorgesiebte Malzstaub zu sehen. Die Siebrückstände (Spelzen) sind auf der linken Bildhälfte zu sehen