

**Forschungsgesellschaft  
für angewandte  
Systemsicherheit und  
Arbeitsmedizin**



**Abschlussbericht G-05-0801**

**Optimierung des konstruktiven  
Explosionsschutzes für spezielle  
industrielle Anwendungen**

**Teil 1:**

**Konstruktiver Explosionsschutz von Becher-  
elevatoren mit Explosionsunterdrückung und  
Löschmittelsperren**

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

Projekt: Optimierung des konstruktiven Explosionsschutzes für spezielle industrielle Anwendungen

Teil 1: Konstruktiver Explosionsschutz von Becherelevatoren mit Explosionsunterdrückung und Löschmittelsperren

Projekt-Nr.: G-05-0801

Experimentelle

Untersuchungen: Versuchsanlage der BGN / FSA, D-77876 Kappelrodeck

Versuchs-

durchführung: W. Fischer, M. Roth, H. Wolf, Dr. Roser

Projektleitung: Professor Dr. Siegfried Radandt  
Dr. Albrecht Vogl  
Richard Siwek

Abschlussbericht: Dr. Markus Roser, BGN / FSA, Kappelrodeck  
Dr. Albrecht Vogl, BGN / FSA, Mannheim  
Professor Dr. Siegfried Radandt, FSA, Brühl

Datum: 09.05.2011

# Gliederung

|  | <b>Seite</b> |
|--|--------------|
| <b>Kurzfassung / Abstract</b>  | <b>3</b>     |
| <b>1. Einführung</b>   | <b>3</b>     |
| <b>2. Kenntnisstand und Zielsetzung</b>                                    | <b>4</b>     |
| <b>3. Versuchsaufbau</b>   | <b>5</b>     |
| <b>4. Explosionstechnische Untersuchungen</b>                              | <b>8</b>     |
| <b>4.1 Charakteristische Kenngrößen der verwendeten Stäube</b>             | <b>8</b>     |
| <b>4.2 Versuchsdurchführung</b>  | <b>8</b>     |
| <b>4.3 Versuchsergebnisse</b>  | <b>9</b>     |
| <b>5. Zusammenfassung und Diskussion der Ergebnisse</b>                    | <b>14</b>    |
| <b>6. Literaturhinweise</b>  | <b>19</b>    |
| <b>7. Anhang</b>   | <b>20</b>    |
| <b>7.1 Bilddokumentation</b>   |              |
| <b>7.2 Messergebnisse</b>  |              |
| <b>7.3 Zeitliche Druck- und Flammenverläufe von ausgewählten Versuchen</b> |              |

## **Druckstoßfeste Bauweise von Becherelevatoren in Verbindung mit Explosionsunterdrückung und Löschmittelsperren**

### **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 Explosionsunterdrückung vorhanden ist, wurden auf dem Versuchsgelände der BGN und FSA in Kappelrodeck Explosionsversuche im Großmaßstab durchgeführt. Der Versuchsaufbau und die Versuchsdurchführung werden nachfolgend beschrieben und die Ergebnisse diskutiert.

### **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 inside the bucket elevator 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 suppression, 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**

Becherelevatoren sind Stetigförderer für die vertikale Förderung von Schüttgütern. Sie werden in großer Zahl in verschiedenen Industriebranchen insbesondere zum Befüllen von Silos eingesetzt. In Abhängigkeit der Betriebsbedingungen und der Schüttguteigenschaften besteht in Becherelevatoren das Risiko einer Staubexplosion und der Explosionsübertragung in verbundene Anlagenbereiche. Wenn sich wirksame Zündquellen nicht sicher ausschließen lassen, müssen zusätzliche konstruktive Schutzmaßnahmen ergriffen werden um die Auswirkungen einer solchen Staubexplosion auf ein ungefährliches Maß zu reduzieren [1,2].

Die vorhandenen Regelwerke, z.B. DIN EN 14373 „Explosionsunterdrückungs-Systeme“, können im Zusammenhang mit Becherelevatoren auf Grund der besonderen geometrischen Verhältnisse und der Einbauten nicht angewandt werden. Die Auswirkungen sowohl der lang gestreckten Elevatorschächte als auch des Becherwerks auf den zeitlichen Explosionsdruck und auf die Flammengeschwindigkeit sind nicht bekannt.

Für die funktionssichere Auslegung von Schutzsystemen sind diese Kenntnisse jedoch unverzichtbar, weshalb die offenen Fragen durch experimentelle Untersuchungen im Großmaßstab geklärt werden müssen.

## 2 Kenntnisstand und Zielsetzung

Aus frühen explosionstechnischen Untersuchungen von Becherelevatoren ist bekannt [3-6], 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 relativ gering und liegen im Allgemeinen deutlich unterhalb 0.3 bar Überdruck.

Sehr kritisch einzuschätzen ist dagegen der so genannte „Leerlaufbetrieb“, in dem die vorhandenen Staubablagerungen durch das laufende Becherwerk (typisch  $v_F = 3.5$  m/s) aufgewirbelt werden. Unter diesen Betriebsbedingungen muss in Abhängigkeit der Schüttguteigenschaften ( $K_{St}$  – Wert,  $p_{max}$ ) mit hohen Flammengeschwindigkeiten und Explosionsdrücken gerechnet werden.

Aus Untersuchungen von Bartknecht [3] 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<sup>-1</sup>) gefördert werden. Übersteigt die Förderhöhe 30 m, so sind alle 30 m zusätzliche Löschmittelsperren vorzusehen.

Die Gründe für diese hohe Anforderung an die Explosionsfestigkeit sind darin zu vermuten, dass ein Becherelevator mit runden Elevatorschächten und somit relativ großer freier Querschnittsfläche verwendet wurde, ein Großteil der Versuche mit Stäuben mit einem  $K_{St}$  – Wert von  $200$  bar·m·s<sup>-1</sup> durchgeführt und mit Staubwolkenerstellung durch Dispergierung aus Druckbehältern gearbeitet wurde. Der Eintrag und die Dispergierung des Staubes aus unter Überdruck stehenden Vorratsbehältern (20 bar) steigert die turbulenten Strömungsverhältnisse im Innern des Elevators. Dies führt zu einer Steigerung der turbulenten Verbrennungsgeschwindigkeit der Staub/Luft-Gemische und somit zu höheren Explosionsdrücken.

Die Festigkeitsanforderung an Becherelevatoren von 3 bar Überdruck sind in der Praxis jedoch kaum zu erfüllen. Berücksichtigt man, dass die in Elevatoren geförderten Schüttgüter mit wenigen Ausnahmen maximale  $K_{St}$ -Werte von  $150$  bar·m·s<sup>-1</sup> besitzen, so stellen die vorhandenen Untersuchungsergebnisse eine unbefriedigende Basis für die Auslegung der explosionsfesten Bauweise in Verbindung mit Explosionsunterdrückung dar.

Das vorliegende Projekt verfolgt daher folgende Ziele:

- Optimierung der Auslegung der druckstoßfesten Bauweise von Becherelevatoren mit rechteckigen Elevatorschächten in Kombination mit Explosionsunterdrückung und Löschmittelsperren.
- Erzeugung der explosionsfähigen Staub/Luft-Gemische durch praxisnahen Betrieb des Becherelevators.
- Verwendung von Stäuben mit  $K_{St}$ -Werten von:  $100 \leq K_{St} \leq 200$  [bar·m·s<sup>-1</sup>].
- Explosionstechnische Entkopplung angeschlossener Anlagenelemente.

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

### 3 Versuchsaufbau

Für die explosionstechnischen Untersuchungen wurde ein Becherelevator mit einem rechteckigen Förder- und Rücklaufschacht verwendet, weil diese Bauart die weiteste Verbreitung in der Praxis gefunden hat. Die Explosionsfestigkeit des Versuchselevators wurde durch zusätzliche Maßnahmen, z.B. Zuganker im Elevatorfuß und Verwendung von Stahl-Blechen der Stärke 10 mm für die rechteckigen Elevatorschächte, schließlich auf ca. 3.5 bar erhöht. Die Länge der Elevatorschächte betrug ca. 13 m bei einer Gesamthöhe des Becherelevators von ca. 15 m (siehe Tabelle 1).

Für die Versuchszwecke wurde der Schüttgutabwurf des Elevatorkopfes über ein Fallrohr (Durchmesser  $d = 240$  mm) mit dem Elevatorfuß verbunden, so dass ein Kreislaufbetrieb ermöglicht wurde. Die Eintrittsöffnung in den Elevatorfuß konnte abgeschiebert werden. Eine Rohrweiche im Fallrohr vor dem Elevatorfuß ermöglichte das Leerfahren des Becherelevators.

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 Elevator typ 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 wurden. Die geometrischen Abmessungen und technische Daten können Tabelle 1 entnommen werden.

Tabelle 1: Technische Daten des Versuchs-Elevators

|                          |  |
|--------------------------|--|
| Gesamtlänge              | 15125 mm   |
| Schachtabmessungen       | 270 mm x 390 mm  |
| Querschnittsfläche       | 0.105 m <sup>2</sup>                                       |
| 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/m <sup>3</sup> ) |
| Fördergeschwindigkeit    | 3.5 m/s  |

Der Becherelevator konnte am Elevatorfuß und -kopf mit Löschmittelbehältern von Explosionsunterdrückungssystemen und in den Elevatorschächten zusätzlich mit Löschmittelsperren ausgerüstet werden. Die Löschmittelbehälter der Explosionsunterdrückungssysteme und der Löschmittelsperren unterscheiden sich im Allgemeinen lediglich durch

die verwendete Dispergierdüse. So sollen Löschmittelsperren im Allgemeinen über eine längere Zeitspanne das Löschmittel eintragen als Explosionsunterdrückungssysteme, die möglichst rasch die gesamte Löschmittelmenge dispergieren sollen. Durch diese Maßnahme sollen zeitliche Differenzen zwischen dem Beginn des Löschmitteleintrags und der tatsächlichen Ankunft der Flammenfront an der Löschmittelsperre ausgeglichen werden.

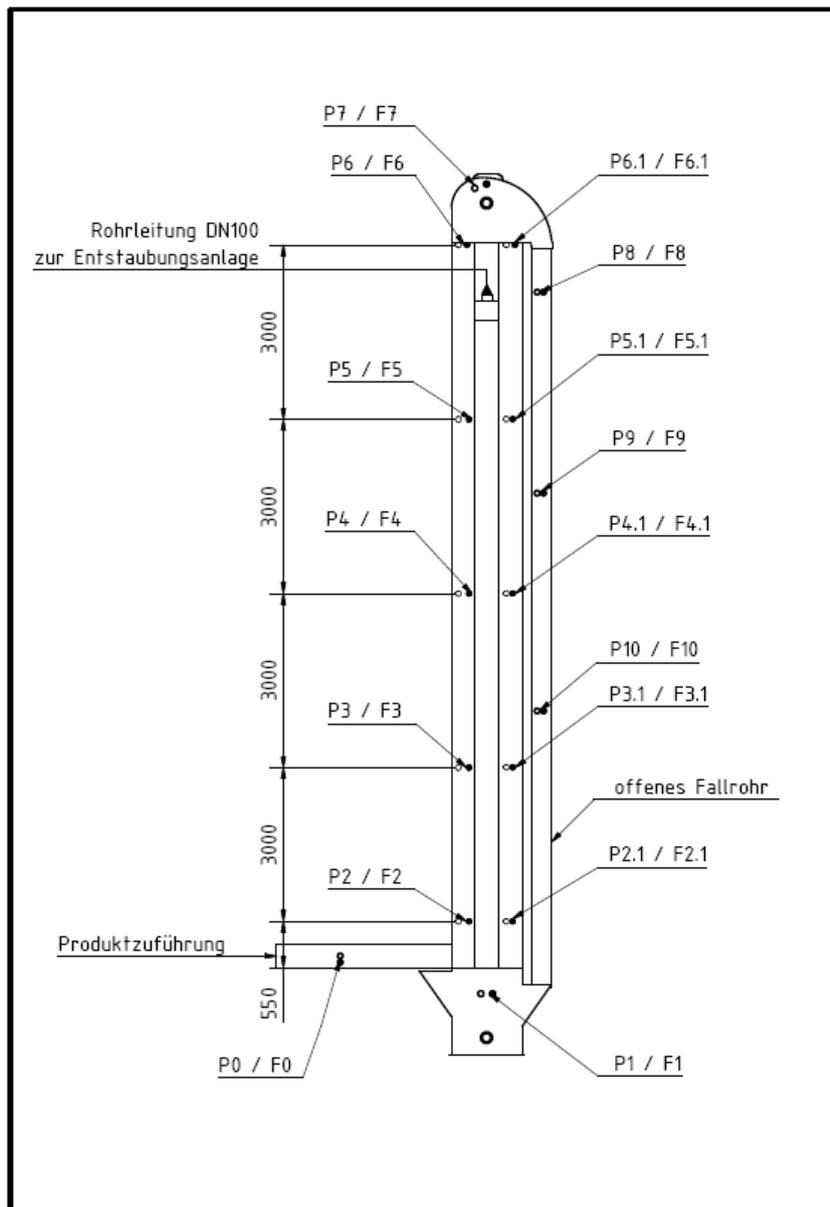


Bild 1: Prinzipbild des Becherelevators mit Angabe der Messstellen (P – Druckaufnehmer; F – Flammenmelder), möglicher Anordnung der Löschmittelbehälter und der Zündorte.

Die nachfolgend beschriebenen Versuche wurden mit Explosionsunterdrückungssystemen und Löschmittelsperren verschiedener Hersteller durchgeführt.

Die Aktivierung der Schutzsysteme erfolgte mit Hilfe von Druckdetektoren oder infrarotempfindlicher Sensoren (Flammenmelder). Die Druckdetektoren waren stets direkt

am Elevatorfuß und –kopf und die Flammenmelder am Elevatorschacht in einem Abstand von ca. 0.5 m über dem Fuß bzw. unterhalb des Kopfes installiert.

Im Falle der Druckdetektion wird zwischen einer statischen und einer dynamischen Druckdetektion unterschieden. Bei der statischen Druckdetektion wird eine definierte Druckschwelle eingestellt, deren Überschreitung zur Auslösung des Schutzsystems führt.

Bei der dynamischen Druckdetektion dient hingegen der zeitliche Druckanstieg als Auslösekriterium. In diesem Falle erfolgt die Aktivierung des Schutzsystems nach Überschreitung einer vorgegebenen Druckdifferenz, die innerhalb eines definierten Zeitintervalls gemessen wird ( $\Delta p/\Delta t$ ).

Wird ein definiertes Auslösekriterium erreicht, so werden über eine Steuerzentrale die Löschmittelbehälter aktiviert. Diese sind entweder mit hohem Druck vorgespannt (Stickstoff) und mit Schnellöffnungsventilen ausgerüstet oder das Austreiben des Löschmittels erfolgt mit Hilfe von Gasgeneratoren (Airbag-Prinzip). Als Löschmittelpulver wurde in den vorliegenden Untersuchungen Sodumbicarbonat eingesetzt.

Sowohl am Elevatorfuß und -kopf als auch entlang der Elevatorschächte wurden in definierten Abständen piezoelektrische Druckaufnehmer und Flammenmelder installiert.

In Bild 1 ist das Prinzipbild des Becherelevators zu sehen, aus dem die Positionen der pyrotechnischen Zündquelle und der Druck- und Flammenmelder entnommen werden können. Bild 2 zeigt beispielhaft die am Becherelevator installierten Löschmittelbehälter verschiedener Hersteller, die die Durchführung des Projektes ermöglichten.



Bild 2: Becherelevator mit Löschmittelbehältern verschiedener Hersteller

## 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 [7-10] ermittelt.

Zusätzlich ist die dimensionslose Staubungszahl S [11] angegeben, die als Maß für die Staubungsfähigkeit des Schüttgutes dient.

Tabelle 2: Explosionskenngrößen der verwendeten Schüttgüter (genormte Prüfmuster)

| Schüttgut          | $p_{\max}$<br>[bar] | $K_{St}$<br>[bar·m·s <sup>-1</sup> ] | UEG<br>[g/m <sup>3</sup> ] | MZE<br>[mJ] | MZT<br>[°C] | S    |
|--------------------|---------------------|--------------------------------------|----------------------------|-------------|-------------|------|
| Weizenmehl Typ 550 | 6.8                 | 109                                  | 60                         | >10 / ≤ 50  | 380         | 0.6  |
| Malzstaub          | 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 - Staubungszahl

### 4.2 Versuchsdurchführung

Für die Durchführung der Explosionsversuche konnte auf die Erkenntnisse eines zuvor abgeschlossenen Forschungsprojekts zurückgegriffen werden [5,6], in dem die Explosionsdruckentlastung von Becherelevatoren untersucht wurde. Bild 3 zeigt beispielhaft einen Explosionsversuch im eingerüsteten Becherelevator mit Explosionsdruckentlastung. Die Druckentlastung erfolgte in diesem Beispiel im Elevatorfuß, -kopf und in den Schächten. Es ist ferner eine Explosionsübertragung durch die Entstaubungsleitung DN 100 (Länge  $l = 15$  m) bis hin zum druckentlasteten Zyklon (rechts neben dem Elevator) zu erkennen, die die Notwendigkeit einer explosionstechnischen Entkopplung deutlich macht.

Zur Erzielung einer maximal möglichen Explosionsheftigkeit unter praxisnahen Betriebsbedingungen wurde der Becherelevator mit 100 bis 200 kg des gewünschten Staubes beschickt und über eine definierte Zeitspanne mit Hilfe eines Fallrohres im Kreislauf gefahren. Danach wurde der Elevator entleert, so dass sich im Innern nur noch die Staubablagerungen befanden. Das Fallrohr wurde anschließend mit Hilfe eines Schiebers am Elevatorfuß verschlossen.

Nach Einbau der Zündquelle wurde der Elevator erneut angefahren und im Leerlauf betrieben. Nach einer Zeitspanne von ca. 20 Sekunden erfolgte schließlich die Entzündung des vom laufenden Becherwerks aufgewirbelten Staubes. Diese Zündverzögerungszeit wurde durch Vorversuche optimiert, wobei in einem Zeitbereich von 10 s

bis 60 s, gemessen ab dem Anfahren des Elevators, keine relevanten Unterschiede zwischen den Explosionsabläufen zu erkennen waren.

Als Zündquelle dienten zwei pyrotechnische Zünder mit einer Zündenergie von je 1 kJ oder 5 kJ. Die Mehrzahl der Versuche wurde mit Zündortlage „Elevatorfuß“ durchgeführt, bei der im Allgemeinen die höchsten Explosionsdrücke auftraten [6] und mit Malzstaub als Schüttgut, der mit seinen stoffspezifischen Explosionskenngrößen (siehe Tabelle 2) einen Großteil der in der Praxis mit Becherelevatoren geförderten Schüttgüter abdeckt.



Bild 3: Staubexplosion im druckentlasteten Becherelevator auf dem Versuchsfeld der BGN / FSA in Kappelrodeck mit Explosionsübertragung durch die Entstaubungsleitung DN 100 (Länge  $l = 15$  m) in den druckentlasteten Zyklon [6].

### 4.3 Versuchsergebnisse

Die Löschmittelmenge der verschiedenen eingesetzten Explosionsunterdrückungssysteme und Löschmittelsperren variierte zwischen 2.5 kg bis 4 kg je Löschmittelbehälter. Innerhalb dieses Bereichs konnten keine relevanten Unterschiede in Bezug auf die Wirksamkeit und somit auf die reduzierten Explosionsüberdrücke festgestellt werden. Als Löschmittelpulver wurde in allen Versuchen Natriumbicarbonat verwendet.

Für die Aktivierung der Explosionsunterdrückungssysteme wurden Druckdetektoren oder Flammenmelder eingesetzt.

Die Aktivierung mit Hilfe von Druckdetektoren erfolgte entweder bei Überschreitung einer definierten Druckschwelle oder bei Überschreitung eines definierten zeitlichen Druckanstiegs ( $\Delta p / \Delta t$ ).

Beim Einsatz von Flammenmeldern wurde die Steuerzentrale so eingestellt bzw. manipuliert, dass eine Auslösung des Schutzsystems nicht bereits durch den Flammenstrahl der pyrotechnischen Zünder erfolgen konnte.

Die Explosionsversuche wurden mit Zündortlage Elevatorfuß und mit Malzstaub begonnen (Tabelle 3, Versuch C3). Zunächst wurden Löschmittelbehälter nur am Elevatorfuß und –kopf angebracht. Die Aktivierung des Explosionsunterdrückungssystems erfolgte durch Druckdetektion, die auf einen Überdruck von 100 mbar eingestellt wurde. Der zum Zeitpunkt der Auslösung der Löschmittelbehälter gemessene Explosionsüberdruck betrug in diesem Versuch (C3)  $p_a = 104$  mbar.

Bis zu diesem Zeitpunkt konnte sich die Explosionsflamme bereits ca. 3 m in den Elevatorschacht hinein fortpflanzen und erreichte schließlich einen maximalen Flammenlaufweg von ca.  $L_{F,max} = 10$  m. Dabei wurde ein maximaler reduzierter Explosionsüberdruck von  $p_{red,max} = 1.39$  bar in den Elevatorschächten gemessen.

Die Versuchsergebnisse können Tabelle 3 entnommen werden. Im Falle der Elevatorschächte ist der maximale Explosionsüberdruck angegeben, der entweder im Förder- oder Rücklaufschacht gemessen wurde. Die Ergebnisse aller installierten Messstellen können den Ergebnistabellen im Anhang entnommen werden.

Für die weiteren Versuche wurde zusätzlich je eine Löschmittelsperre im Förder- und Rücklaufschacht in einem Einbauabstand von 6 m über dem Elevatorfuß installiert.

In Versuch C7 wurden die Explosionsflammen mit diesem Einbauabstand erfolgreich gelöscht. Der maximale Explosionsüberdruck wurde mit 0.87 bar im Rücklaufschacht gemessen.

Bei der Wiederholung des Versuchs (Versuch C10) wurde der Löschmittelbehälter im Elevatorfuß nahe zum Produkteinlauf versetzt. In diesem Versuch betrug der Flammenlaufweg zum Zeitpunkt der Aktivierung jedoch bereits  $L_F = 5.5$  m, weshalb die Explosionsflamme die Löschmittelsperre überlief. Es wurde daher ein maximaler Flammenlaufweg von ca. 13 m ermittelt. Der maximale reduzierte Explosionsüberdruck stieg sowohl im Elevatorfuß als auch in den Elevatorschächten auf 1.5 bar an.

Der gemessene Explosionsüberdruck zum Zeitpunkt der Aktivierung lag bei allen drei Versuchen (C3, C7 und C10) im Bereich von  $p_{akt} = 101$  mbar bis 104 mbar.

Nach den zuvor beschriebenen Versuchen mit statischer Druckdetektion wurde mit dynamischer Druckdetektion weiter gearbeitet. In Versuch D7 wurde mit Explosionsunterdrückung im Elevatorkopf und –fuß gearbeitet, jedoch ohne Löschmittelsperre in den Elevatorschächten. Das Auslösekriterium wurde auf einen zeitlichen Druckanstieg von 40 mbar/30 ms eingestellt. Die Aktivierung des Schutzsystems erfolgte schließlich bei einem gemessenen Explosionsüberdruck von  $p_{akt} = 90$  mbar. Jedoch gelang es nicht, die Explosionsflamme rechtzeitig im Elevatorkopf und -fuß zu unterdrücken, so dass eine Flammenfortpflanzung von ca. 13 m in die Elevatorschächte hinein ermittelt wurde.

Der maximale reduzierte Explosionsüberdruck erreichte dabei  $p_{red,max} = 2.39$  bar im Elevatorschacht. Im Elevatorfuß wurde ein reduzierter Explosionsüberdruck von  $p_{red} = 1.41$  bar gemessen.

Tabelle 3: Ergebnisse der Explosionsunterdrückung im Becherelevator mit Malzstaub, Druckdetektion

$L_F$  Flammenlaufweg zum Zeitpunkt der Systemaktivierung  
 $L_{F,max}$  maximaler Flammenlaufweg  
 $p_{akt}$  Explosionsüberdruck zum Zeitpunkt der Systemaktivierung  
 Löschmittelbehälter Elevatorkopf (K), Elevatorfuß (F), Förder- u. Rücklaufschacht (S)  
 Löschmittel: Sodumbicarbonat  
 Löschmittelmenge je Löschmittelbehälter von 2.5 kg bis 4 kg

| Test Nr. | Zündort | Messwerte   |                 |              |                  |                        |                  | Unterdrückungssystem  |                     |                   |
|----------|---------|-------------|-----------------|--------------|------------------|------------------------|------------------|-----------------------|---------------------|-------------------|
|          |         | Fuß p [bar] | Schacht p [bar] | Kopf p [bar] | Flamme $L_F$ [m] | Flamme $L_{F,max}$ [m] | $p_{akt}$ [mbar] | Einstellung Detektion | Löschmittelbehälter | Einbauabstand [m] |
| C3       | F       | 0.98        | 1.39            | 0.93         | 3                | 10                     | 104              | 100 mbar              | K<br>F              | 0                 |
| C7       | F       | 0.61        | 0.87            | 0.42         | 2.5              | 5                      | 103              | 100 mbar              | K<br>S<br>F         | 6                 |
| C10      | F       | 1.5         | 1.49            | 0.76         | 5.5              | 13                     | 101              | 100 mbar              | K<br>S<br>F**       | 6                 |
| D7       | F       | 1.41        | 2.39            | 1.34         | 7                | 13                     | 90               | 40 mbar/<br>30 ms     | K<br>-<br>F         |                   |
| D8       | F       | 0.45        | 0.64            | 0.32         | 5                | 7                      | 79               | 30 mbar/<br>100 ms    | K<br>S<br>F         | 6                 |
| D10      | F       | 0.83        | 0.93            | 0.48         | 2                | 6                      | 60               | *35 mbar/<br>100 ms   | K<br>S<br>F         | 6                 |
| D12      | K       | 0.16        | 0.18            | 0.17         | -                | 1                      | 40               | 35 mbar/<br>100 ms    | K<br>S<br>F         | 6                 |
| D13      | K       | 0.33        | 0.40            | 0.35         | 2                | 7                      | 67               | 35 mbar/<br>100 ms    | K<br>S<br>F         | 6                 |
| H3       | F       | 0.34        | 0.34            | 0.13         | 1                | 1.5                    |                  | 20 mbar               | S<br>F              | 1.4               |
| H6       | K       | 1.10        | 2.05            | 0.30         | 5                | 14                     |                  | 20 mbar               | K<br>S              | 1.4               |
| H7       | K       | 0.30        | 0.58            | 0.58         | 3                | 5                      |                  | 20 mbar               | K<br>S              | 5                 |

\* Kopf: 30 mbar/100 ms und Fuß: 35 mbar/100 ms

\*\* Montage des Löschmittelbehälters im Bereich Elevatorfuß / Produkteinlauf

Nach Einbau einer Löschmittelsperre in den Elevatorschächten im Abstand von 6 m über dem Elevatorfuß und 6 m unterhalb des Elevatorkopfes und gleichzeitiger Optimierung des Einstellkriteriums von zuvor 40mbar/30ms auf 30mbar/100ms bzw. 35 mbar/100 ms konnte eine signifikante Verbesserung der Ergebnisse erzielt werden. Die Aktivierung erfolgte jetzt bereits bei einem Explosionsüberdruck von  $p_{akt} = 79$  mbar bzw. 60 mbar (Versuche D8 und D10).

Die Explosionsflamme erreichte dabei einen maximalen Flammenlaufweg von ca. 7 m. Der maximale reduzierte Explosionsüberdruck betrug in den Elevatorschächten 0.93 bar.

Zwei weitere Versuche (D12, D13) wurden mit gleicher Einstellung des Detektionsystems, jedoch mit Zündortlage im Elevatorkopf durchgeführt. Auch in diesem Falle wurde ein maximaler Flammenlaufweg von ca. 7 m gemessen (Versuch D13). Der maximale reduzierte Explosionsüberdruck betrug lediglich  $p_{red,max} = 0.4$  bar.

In weiteren Explosionsversuchen wurde mit statischer Druckdetektion und sehr niedriger Auslöseschwelle von nur  $p_a = 20$  mbar Überdruck gearbeitet. Die Löschmittelsperren wurden dabei in einem Einbauabstand von nur 1.4 m über dem Elevatorfuß installiert (Versuche H3). Die Explosionsflamme wurde im Versuch H3 erfolgreich gelöscht. Der maximale reduzierte Explosionsüberdruck betrug  $p_{red,max} = 0.34$  bar sowohl im Elevatorfuß als auch in den Elevatorschächten. Die Wiederholung des Versuchs (H4) ergab einen Anstieg des maximalen reduzierten Explosionsüberdrucks auf  $p_{red,max} = 0.5$  bar.

Ein weiterer Versuch (H6) wurde mit Zündortlage im Elevatorkopf durchgeführt. Die Löschmittelsperren wurden in diesem Falle mit einem Einbauabstand von 1.4 m unterhalb des Elevatorkopfes jeweils im Förder- und Rücklaufschacht installiert.

In diesem Versuch zeigte sich jedoch, dass der gewählte Einbauabstand zu gering gewählt war. Die Explosionsflamme überlief die Löschmittelsperre bis hinunter zum Elevatorfuß. Der maximale reduzierte Explosionsüberdruck erreichte daher  $p_{red,max} = 1.72$  bar in den Elevatorschächten und  $p_{red} = 1.10$  bar im Elevatorfuß.

Nach Verlängerung des Einbauabstandes von 1.4 m auf 5 m konnten die Explosionsflammen sicher gelöscht werden. Der maximale reduzierte Explosionsüberdruck erreichte in diesem Falle  $p_{red,max} = 0.58$  bar im Elevatorkopf und –schacht (Versuch H7).

Zwei zusätzliche Versuche wurden mit dem weniger heftig reagierenden Weizenmehl Typ 550 und Zündortlage „Elevatorfuß“ durchgeführt (siehe Tabelle 4).

Die Löschmittelsperre wurde in diesem Falle im Einbauabstand von 6 m oberhalb des Elevatorfußes und unterhalb des Elevatorkopfes installiert, d.h. in der Mitte der Elevatorschächte. Die Auslöseschwelle wurde auf einen Überdruck von 35 mbar eingestellt. Die Explosionsunterdrückung und die Löschmittelsperre waren im Versuch C14 erfolgreich. Der Explosionsüberdruck erreichte lediglich  $p_{red,max} = 0.1$  bar.

In Versuch C16 wurde die Explosionsunterdrückung im Elevatorfuß und –kopf entfernt und nur mit Löschmittelsperre gearbeitet. In diesem Falle erfolgte die Auslösung des Schutzsystems jedoch zu spät. Die Explosionsflamme überlief die Löschmittelsperre und erreichte einen maximalen Flammenlaufweg von ca. 13 m. Der maximale reduzierte Explosionsüberdruck erreichte auf Grund des weniger heftig reagierenden Weizenmehls jedoch nur  $p_{red,max} = 0.29$  bar.

Nach den Explosionsversuchen mit Druckdetektion erfolgten weitere Versuche mit Flammenmeldern für die Auslösung des Explosionsunterdrückungssystems und der Löschmittelsperren. Als Schüttgut wurde erneut Malzstaub verwendet. Ein zusätzlicher

Versuch wurde mit Maisstärke (Versuch G9) durchgeführt. Die Ergebnisse dieser Versuchsreihe können Tabelle 5 entnommen werden.

Tabelle 4: Ergebnisse der Explosionsunterdrückung im Becherelevator mit Weizenmehl Typ 550, Druckdetektion

|                     |  |
|---------------------|--|
| $L_F$               | Flammenlaufweg zum Zeitpunkt der Systemaktivierung               |
| $L_{F,max}$         | maximaler Flammenlaufweg   |
| $p_{akt}$           | Explosionsüberdruck zum Zeitpunkt der Systemaktivierung          |
| Löschmittelbehälter | Elevatorkopf (K), Elevatorfuß (F), Förder- u. Rücklaufschaft (S) |
| Löschmittel         | Sodiumbicarbonat   |
| Löschmittelmenge    | je Löschmittelbehälter von 2.5 kg bis 4 kg                       |

| Test Nr. | Zündort | Messwerte         |                       |                    |                        |                              |                     | Unterdrückungssystem     |                               |                           |
|----------|---------|-------------------|-----------------------|--------------------|------------------------|------------------------------|---------------------|--------------------------|-------------------------------|---------------------------|
|          |         | Fuß<br>p<br>[bar] | Schacht<br>p<br>[bar] | Kopf<br>p<br>[bar] | Flamme<br>$L_F$<br>[m] | Flamme<br>$L_{F,max}$<br>[m] | $p_{akt}$<br>[mbar] | Einstellung<br>Detektion | Lösch-<br>mittel-<br>behälter | Einbau-<br>abstand<br>[m] |
| C14      | F       | 0.1               | 0.09                  | 0.1                | 3.5                    | 4                            | 33                  | 35 mbar                  | K<br>S<br>F                   | 6                         |
| C16      | F       | 0.28              | 0.29                  | 0.26               | 10                     | 13                           | 32                  | 35 mbar                  | S                             | 6                         |

Mit Zündortlage im Elevatorfuß (Versuch G3) und Elevatorkopf (Versuche G4) erfolgte die Aktivierung des Explosionsunterdrückungssystems so frühzeitig, dass sich die Explosionsflammen auf Grund der Explosionsunterdrückung von Elevatorfuß bzw. -kopf nur weniger als 1 m in den Elevatorschacht hinein fortpflanzen konnten. Die Explosionsflammen gelangten somit nicht bis zu den Löschmittelsperren, die in 6 m Einbauabstand in den Elevatorschächten installiert waren. Der maximale reduzierte Explosionsüberdruck betrug lediglich  $p_{red, max} = 0.1$  bar.

In den Versuchen G6 und G8 wurde der Zündort in einem Abstand von 0.5 m bzw. 3.5 m über der Oberkante des Elevatorfußes in den Förderschacht gelegt.

Diese Zündortlage hatte zur Folge, dass die Explosionsflamme durch den Flammenmelder zu spät erkannt wurde. Offenbar wurde die Lichtintensität auf Grund des Staubes sowie der engen Spalte zwischen Becherwerk und Elevatorschacht zu stark gedämpft. Die Explosionsflamme überlief daher die Löschmittelsperre. Der reduzierte Explosionsüberdruck stieg auf  $p_{red, max} = 1.4$  bar an.

Die rasche Erkennung einer anlaufenden Staubexplosion mit Hilfe infrarotempfindlicher Sensoren scheint nur dann zuverlässig möglich zu sein, wenn die Flammenmelder im Bereich des Elevatorfußes und -kopfes installiert sind und sich auch der Zündort im Elevatorfuß oder -kopf befindet. Aus der Praxiserfahrung wird dies als die wahrscheinlichste Zündortlage betrachtet.

Nach den erfolgreichen Untersuchungen mit Malzstaub im Falle der Zündortlage im Elevatorkopf und -fuß wurde ein zusätzlicher Versuch (G9) mit Maisstärke durchgeführt. In diesem Versuch erfolgte eine Flammenfortpflanzung bis ca. 4 m in den Elevatorschacht hinein. Der maximale reduzierte Explosionsüberdruck erreichte  $p_{red, max} = 0.87$  bar.

Tabelle 5: Ergebnisse der Explosionsunterdrückung im Becherelevator mit Malzstaub und Maisstärke, Flammendetektion

|                     |   |
|---------------------|---|
| $L_F$               | Flammenlaufweg zum Zeitpunkt der Systemaktivierung                |
| $L_{F,max}$         | maximaler Flammenlaufweg  |
| $p_{akt}$           | Explosionsüberdruck zum Zeitpunkt der Systemaktivierung           |
| Löschmittelbehälter | Elevatorkopf (K), Elevatorfuß (F), Förder- u. Rücklaufschacht (S) |
| Löschmittel         | Sodiumbicarbonat  |
| Löschmittelmenge    | je Löschmittelbehälter von 2.5 kg bis 4 kg                        |

| Test Nr. | Produkt    | Zündort                    | Messwerte         |                       |                    |                        |                              |                     | Unterdrückungssystem |                      |
|----------|------------|----------------------------|-------------------|-----------------------|--------------------|------------------------|------------------------------|---------------------|----------------------|----------------------|
|          |            |                            | Fuß<br>p<br>[bar] | Schacht<br>p<br>[bar] | Kopf<br>p<br>[bar] | Flamme<br>$L_F$<br>[m] | Flamme<br>$L_{F,max}$<br>[m] | $p_{act}$<br>[mbar] | Löschmittelbehälter  | Einbauabstand<br>[m] |
| G3       | Malzstaub  | Fuß                        | 0.08              | 0.06                  | 0.06               | < 0.5                  | <1                           | 25                  | F<br>S               | 6                    |
| G4       | Malzstaub  | Kopf                       | 0.05              | 0.07                  | 0.10               | < 0.5                  | < 0.5                        | 9                   | K<br>S               | 6                    |
| G6       | Malzstaub  | Förderschacht<br>(0.5 m)   | 0.95              | 1.42                  | 0.29               | ~1                     | 4                            | 49                  | F<br>S               | 6                    |
| G8       | Malzstaub  | Rücklaufschacht<br>(3.5 m) | 0.45              | 1.39                  | 0.65               | ~3                     | 9                            | 74                  | F<br>S               | 6                    |
| G9       | Maisstärke | Fuß                        | 0.80              | 0.87                  | 0.20               | ~1.5                   | 4                            | 92                  | F<br>S               | 6                    |

## 5 Zusammenfassung und Diskussion der Ergebnisse

Die experimentellen Untersuchungen zum konstruktiven Explosionsschutz von Becherelevatoren mit Hilfe von Explosionsunterdrückung und Löschmittelsperren haben zu neuen Erkenntnissen geführt. Wurden die Schutzsysteme mit Hilfe statischer oder dynamischer Druckdetektion aktiviert und mit Einstellungen, die sich in vielen Praxisanwendungen bewährt haben, so erfolgte die Aktivierung in Becherelevatoren in der Regel zu spät.

Bereits vor der Auslösung der Explosionsunterdrückung und der Löschmittelsperren konnten sich die Explosionsflammen zu weit aus dem Elevatorfuß oder -kopf in die Elevatorschächte hinein fortpflanzen und die Löschmittelsperren in den Elevatorschächten überlaufen.

Die ursprünglich gewählten Einbauabstände der Löschmittelsperren von 6 m oberhalb des Elevatorfußes und unterhalb des Elevatorkopfes müssen bei unveränderten

Auslösekriterien daher auf Einbauabstände von ca. 8 m vergrößert werden. Mit diesem Einbauabstand lässt sich aus den Versuchsergebnissen jedoch abschätzen, dass mit einem maximalen reduzierten Explosionsüberdruck von  $p_{\text{red, max}} = 1.5 \text{ bar}$  bei Stäuben mit Explosionskennwerten bis  $K_{\text{St}} = 150 \text{ bar}\cdot\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$  gerechnet werden muss.

Die sehr frühzeitige Flammenfortpflanzung in die Elevatorschächte hinein, die bereits vor einem messbaren Explosionsüberdruck festzustellen war, kann auf die besonderen geometrischen Verhältnisse und Einbauten des Becherelevators zurückgeführt werden.

Im Falle des Elevatorfußes und –kopfes handelt es sich um zwei kleinvolumige Explosionsräume, die durch zwei Elevatorschächte miteinander verbunden sind. Im Falle der Entzündung im Elevatorkopf oder –fuß besteht für die Verbrennungsgase somit ein Expansionsraum in die Elevatorschächte hinein. Zusätzlich existiert ein Expansionsraum in die Produktzuführung des Elevatorfußes und in das Fallrohr am Elevatorkopf.

Ein rasches Durchzünden der Staubwolke im Elevatorfuß oder –kopf wird durch das Becherwerk behindert, das einerseits eine erhebliche räumliche Versperrung darstellt und andererseits durch die abkühlenden Flächen der Umlenkrollen und insbesondere der Metallbecher der anlaufenden Explosion Verbrennungswärme entzieht.

Dies erklärt die überraschend langen zeitlichen Verzögerungen zwischen dem Zündzeitpunkt ( $t = 0 \text{ s}$ ) und dem Beginn eines Druckanstiegs im Elevatorfuß (Bild 4 oben). Am Beispiel der Versuche C10 und D7 beträgt diese zeitliche Verzögerung ca. 0.7 s.

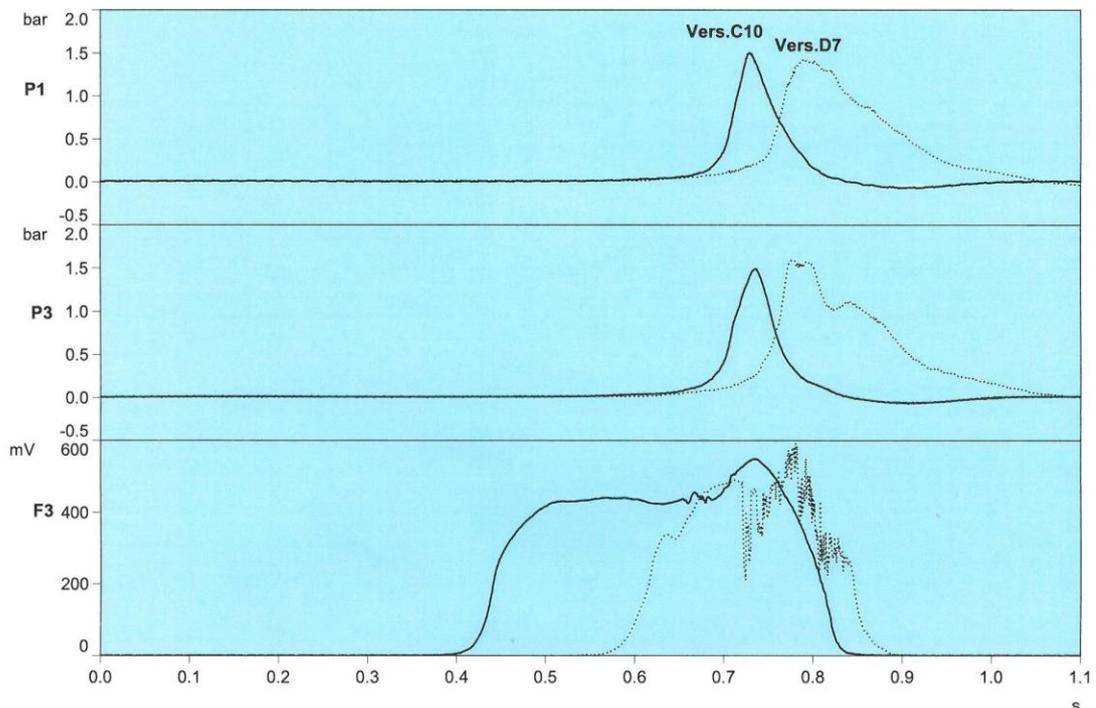


Bild 4: Zeitliche Explosionsdruckverläufe der Versuche C10 und D7 im Elevatorfuß (p1), im Förderschacht (p3) im Abstand von 3 m über dem Elevatorfuß und Signale des Flammenmelders F3 im Abstand von 3 m über dem Elevatorfuß (siehe Tabelle 3). Die Aktivierung der Zünder erfolgte zum Zeitpunkt  $t = 0 \text{ s}$ .

Ein Blick auf die Explosionsdruckverläufe und Flammensignale verdeutlicht das zuvor beschriebene Phänomen einer sehr frühzeitigen Flammenfortpflanzung. In Bild 4 oben

sind am Beispiel der Versuche C10 und D7 die Explosionsdruckverläufe im Elevatorfuß (Messstelle  $p_1$ ) zu sehen und darunter die Explosionsdruckverläufe aus dem Förder-schacht (Messstelle  $p_3$ ), die im Abstand von ca. 3 m über dem Elevatorfuß gemessen wurden. Im Bild 4 unten ist schließlich das Signal des Flammenmelders  $F_3$  dargestellt, der parallel zur Druckmessstelle  $p_3$  angeordnet war.

Man erkennt, dass in Versuch C10 das Flammensignal an der Messstelle  $F_3$  nach 0.5 s (gemessen ab Zündzeitpunkt) ein erstes Maximum erreicht. Zu diesem Zeitpunkt befindet sich also eine erste Flammenfront in Höhe der Messstelle  $F_3$ , die sich im Abstand von ca. 3 m im Elevatorschacht über dem Elevatorfuß befindet. Jedoch erst nach einer weiteren Zeitspanne von etwa 190 ms wird ein Explosionsüberdruck von 0.1 bar im Elevatorfuß (Messstelle  $p_1$ ) gemessen.

Im Versuch D7 ist diese zeitliche Differenz zwar deutlich geringer, beträgt jedoch auch in diesem Falle ca. 70 ms.

Die Beobachtung erklärt, weshalb die in vielen Anwendungen bewährten Einstellungen der Druckdetektionssysteme im Falle eines Becherelevator nur geringen Erfolg besitzen, die Explosionsflammen die Löschmittelsperren überlaufen und als Folge relativ hohe reduzierte Explosionsüberdrücke auftreten können.

Mit Hilfe der Druckdetektion konnten erst durch deutliche Reduzierungen der Auslösekriterien zufriedenstellende Ergebnisse erzielt werden. Wurde die Auslöseschwelle auf einen Wert von nur 20 mbar Überdruck herabgesetzt, so konnten die Löschmittelsperren in einem Einbauabstand von 5 m oberhalb des Elevatorfußes bzw. unterhalb des Elevatorkopfes die Explosionsflammen sicher ablöschen. Es wurde in diesem Falle ein maximaler reduzierter Explosionsüberdruck von  $p_{red, max} = 0.58$  bar im Elevatorschacht gemessen.

Es sei an dieser Stelle angemerkt, dass eine Druckdetektion im Praxisbetrieb jedoch nur dann auf so niedrige Ansprechüberdrücke eingestellt werden kann, wenn das Detektionssystem zur Vermeidung von Fehlauflösungen über eine entsprechende Störsicherheit gegenüber mechanischen Schwingungen und Stößen verfügt. Relevante Druckwellen durch herabfallendes Schüttgut sollten durch die engen Spalte zwischen Becherwerk und Schacht (entsprechend der heutigen Bauweise) nicht von Relevanz sein.

Optimale Ergebnisse konnten schließlich mit Hilfe von Flammenmeldern erzielt werden, wenn sich der Zündort im Elevatorfuß oder –kopf befindet. In diesem Falle erfolgte die Aktivierung der Löschmittelbehälter zu einem sehr frühen Zeitpunkt, so dass die Explosionsflammen den Elevatorkopf oder –fuß nicht oder nur maximal 0.5 m verlassen konnten.

Aus den Versuchsergebnissen können orientierende Angaben für die Einbauabstände der Löschmittelsperren und für die Festigkeitsanforderungen an Becherelevatoren abgeleitet werden.

Im Hinblick auf die Festigkeitsanforderungen kann man differenzieren zwischen einem Mindestauslegungsüberdruck  $p_{a1}$ , der für den Elevatorkopf und den Elevatorfuß bis zum Einbauort der Löschmittelsperren in den Elevatorschächten gefordert werden muss und einem geringeren Mindestauslegungsüberdruck  $p_{a2}$ , der für die Elevatorschächte zwischen den Löschmittelsperren erforderlich ist (siehe Bild 5).

Aus Tabelle 6 können die erforderlichen Druckstoßfestigkeiten des Becherelevators und die Einbauabstände der Löschmittelsperren entnommen werden. Die Angaben werden in Abhängigkeit des Druckbereichs gemacht, innerhalb dem die Aktivierung der Löschmittelbehälter mit Hilfe von Druckdetektoren erfolgt und es werden Angaben bei Verwendung von Flammendektoren gemacht.

Herstellerspezifische Abweichungen von diesen orientierenden Angaben sind möglich, wenn entsprechende Nachweise oder Erkenntnisse vorliegen.

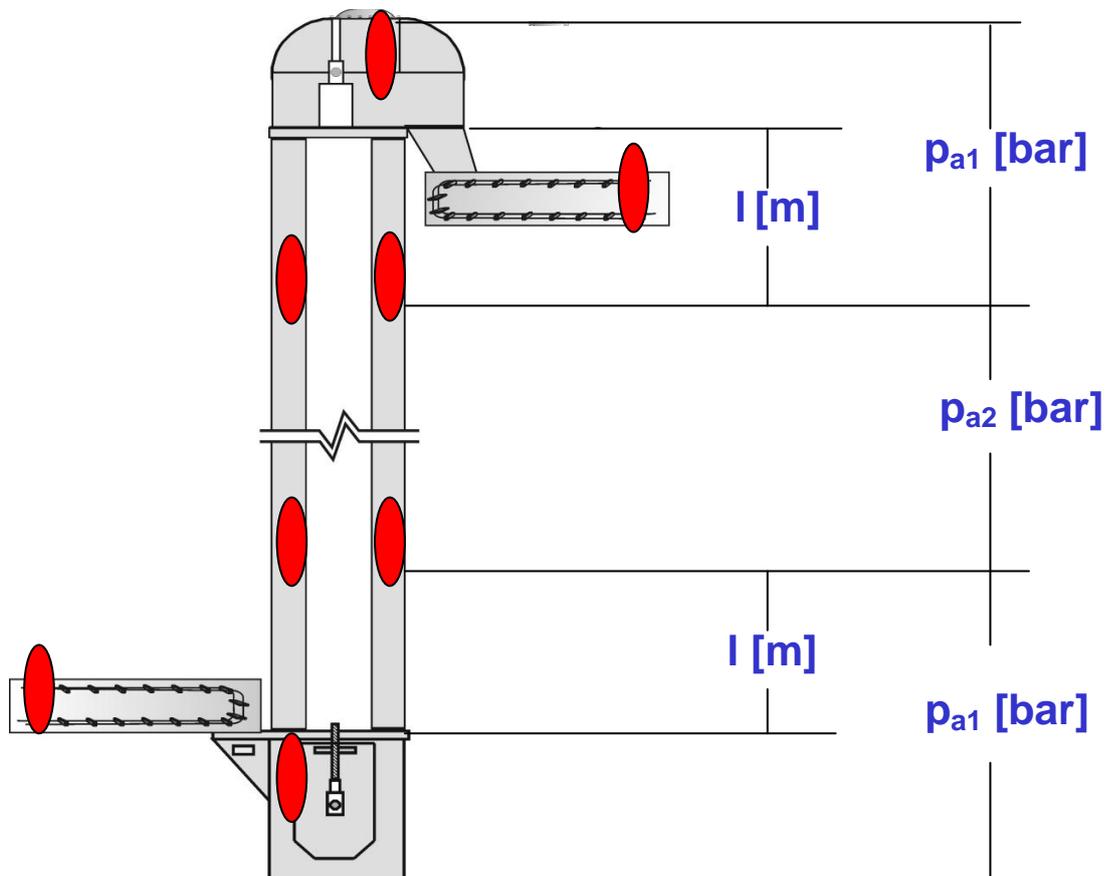


Bild 5: Orientierende Festigkeitsanforderungen für Becherelevatoren in Verbindung mit Explosionsunterdrückung und Löschmittelsperren sowie orientierende Angaben zum Einbauabstand der Löschmittelsperre (siehe Tabelle 6)

Die in Tabelle 6 gemachten Angaben können unter folgenden Bedingungen angewandt werden:

- Stäube mit  $p_{\max} \leq 9 \text{ bar}$ ;  $K_{St} \leq 150 \text{ bar} \cdot \text{m} \cdot \text{s}^{-1}$
- Becherelevator mit rechteckigen Elevatorschächten
- Metallbecher

- allseitige Wandabstände der Becher  $\leq 70$  mm
- Becherabstände  $\leq 280$  mm

Tabelle 6: Orientierende Festigkeitsanforderungen für Becherelevatoren in Verbindung mit Explosionsunterdrückung / Löschmittelsperren und orientierende Angaben zum Einbauabstand der Löschmittelsperre (siehe auch Bild 5).

| Detektion   | Einbauabstand $l$ [m] | erforderliche Druckstoßfestigkeit $p_{a1}$ [bar] | erforderliche Druckstoßfestigkeit $p_{a2}$ [bar] |
|---|-----------------------|--|--|
| Druckdetektion:<br>Explosionsüberdruck zum Zeitpunkt der Aktivierung der Löschmittelbehälter:<br>$80 < p_{act} \leq 110$ mbar | 8                     | 1.5  | 1.2  |
| Druckdetektion:<br>Explosionsüberdruck zum Zeitpunkt der Aktivierung der Löschmittelbehälter:<br>$30 < p_{act} \leq 80$ mbar  | 6                     | 1.0  | 0.7  |
| Druckdetektion:<br>Explosionsüberdruck zum Zeitpunkt der Aktivierung der Löschmittelbehälter:<br>$p_{act} \leq 30$ mbar       | 5                     | 0.7  | 0.4  |
| Flammendetektion  | 1.5                   | 0.3  | 0.2  |

Im Rahmen des vorliegenden Projekts konnten nur zwei Versuche unter Verwendung eines Staubs mit  $K_{St} \sim 100 \text{ bar} \cdot \text{m} \cdot \text{s}^{-1}$  (Weizenmehl Typ 550) durchgeführt werden (siehe Tabelle 4). Die Ergebnisse lassen erwarten, dass im Falle einer Druckdetektion mit einer Auslösung des Schutzsystems im Druckbereich von  $p_{act} \leq 110$  mbar eine Explosionsfestigkeit von  $\geq 0.3$  bar (Überdruck) als ausreichend betrachtet werden kann, wenn der Einbauabstand der Löschmittelsperren  $l = 8$  m beträgt. Wird hingegen mit Flammendetektion gearbeitet, so erscheint eine Explosionsfestigkeit von  $\geq 100$  mbar als ausreichend.

*Anmerkung: Mit Schüttgütern, deren Feinstaubanteile  $K_{St}$ -Werte  $\leq 100 \text{ bar} \cdot \text{m} \cdot \text{s}^{-1}$  besitzen, kann unabhängig von der Länge des Elevators auf die Explosionsunterdrückung verzichtet werden, wenn die Explosionsfestigkeit  $\geq 1$  bar (Überdruck) beträgt. Diese Erkenntnis ergab sich aus dem Forschungsprojekt zur Explosionsdruckentlastung, in dessen Rahmen zusätzliche Versuche mit Weizenmehl (siehe Tabelle 2) auch ohne Explosionsdruckentlastung durchgeführt wurden [2, 6].*

Werden Schüttgüter gefördert, deren Feinstaubanteile bis zu  $K_{St} = 200 \text{ bar}\cdot\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$  betragen, so sollte der Becherelevator eine Explosionsfestigkeit von  $\geq 1 \text{ bar}$  (Überdruck) besitzen und die Aktivierung der Schutzsysteme mit Flammendetektion erfolgen.

Für die Erzielung einer optimalen Funktionssicherheit des Schutzsystems wird eine Kombination von Druck- und Flammendetektion empfohlen.

Sofern die zur Tabelle 6 genannten Anwendungsgrenzen eingehalten werden, können die Versuchsergebnisse und die daraus abgeleiteten Anforderungen auch auf Becherelevatoren höherer Förderleistungen und damit größerer Schachtquerschnitte übertragen werden. Es sind keine relevanten Abweichungen oder Steigerungen der Flammengeschwindigkeiten beim Austritt aus dem Elevatorfuß oder –kopf in die Elevatorschächte hinein zu erwarten.

Die erforderlichen Löschmittelmengen müssen jedoch an die größeren Volumina des Elevatorfußes, –kopfes und der Elevatorschächte angepasst werden.

## 6 Literaturhinweise

- [1] VDI 2263 Blatt 8: 2008-12 Staubbrände und Staubexplosionen; Gefahren, Beurteilung, Schutzmaßnahmen; Brand- und Explosionsschutz an Elevatoren, Beuth Verlag, Berlin
- [2] VDI 2263 Blatt 8.1: 2011-03 Staubbrände und Staubexplosionen; Gefahren, Beurteilung, Schutzmaßnahmen; Brand- und Explosionsschutz an Elevatoren; Beispiele, Beuth Verlag, Berlin
- [3] BARTKNECHT: Explosionsschutz: Grundlagen und Anwendung, S.: 709-715, Springer Verlag, 1993.
- [4] Holbrow, P., Lunn, G. A.: Explosion Venting of Bucket Elevators, Stage 2: Final Report (EC/01/50), Health and Safety Laboratory, Buxton, 2001
- [5] Vogl, A., Radandt, S.: Explosionstechnische Untersuchungen für den konstruktiven Explosionsschutz von Elevatoren, VDI-Berichte Nr. 2024, Seite 249-266, VDI-Verlag GmbH Düsseldorf 2008
- [6] Roser, M., Vogl, A., Radandt, S.: Konstruktiver Explosionsschutz für Elevatoren, Forschungsprojekt F-05-0701, Forschungsgesellschaft für angewandte Systemsicherheit und Arbeitsmedizin (FSA) Mannheim, 2010
- [7] DIN EN 14034-1: 2004-12 Bestimmung der Explosionskenngrößen von Staub/Luft-Gemischen – Teil 1: Bestimmung des maximalen Explosionsdrucks  $p_{\max}$  von Staub/Luft-Gemischen, Beuth Verlag, Berlin
- [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, Beuth Verlag, Berlin
- [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, Beuth Verlag, Berlin
- [10] DIN EN 13821: 2003-03 Explosionsfähige Atmosphären – Explosionsschutz – Bestimmung der Mindestzündenergie von Staub/Luft-Gemischen, Beuth Verlag, Berlin
- [11] VDI 2263 Blatt 9: 2008-05 Staubbrände und Staubexplosionen; Gefahren, Beurteilungen, Schutzmaßnahmen; Bestimmung des Staubungsverhaltens von Schüttgütern, Beuth Verlag, Berlin

## **7 Anhang**

7.1 Bilddokumentation

7.2 Messergebnisse

7.3 Duck- und Flammenverläufe von ausgewählten Versuchen

## 7 Anhang

### 7.1 Bilddokumentation



Bild A1: Eingerüsteter Becherelevator mit Entstaubungsleitung



Bild A2: Elevatorfuß mit Einlaufrohr (linke Seite) und Fallrohr (rechte Seite)

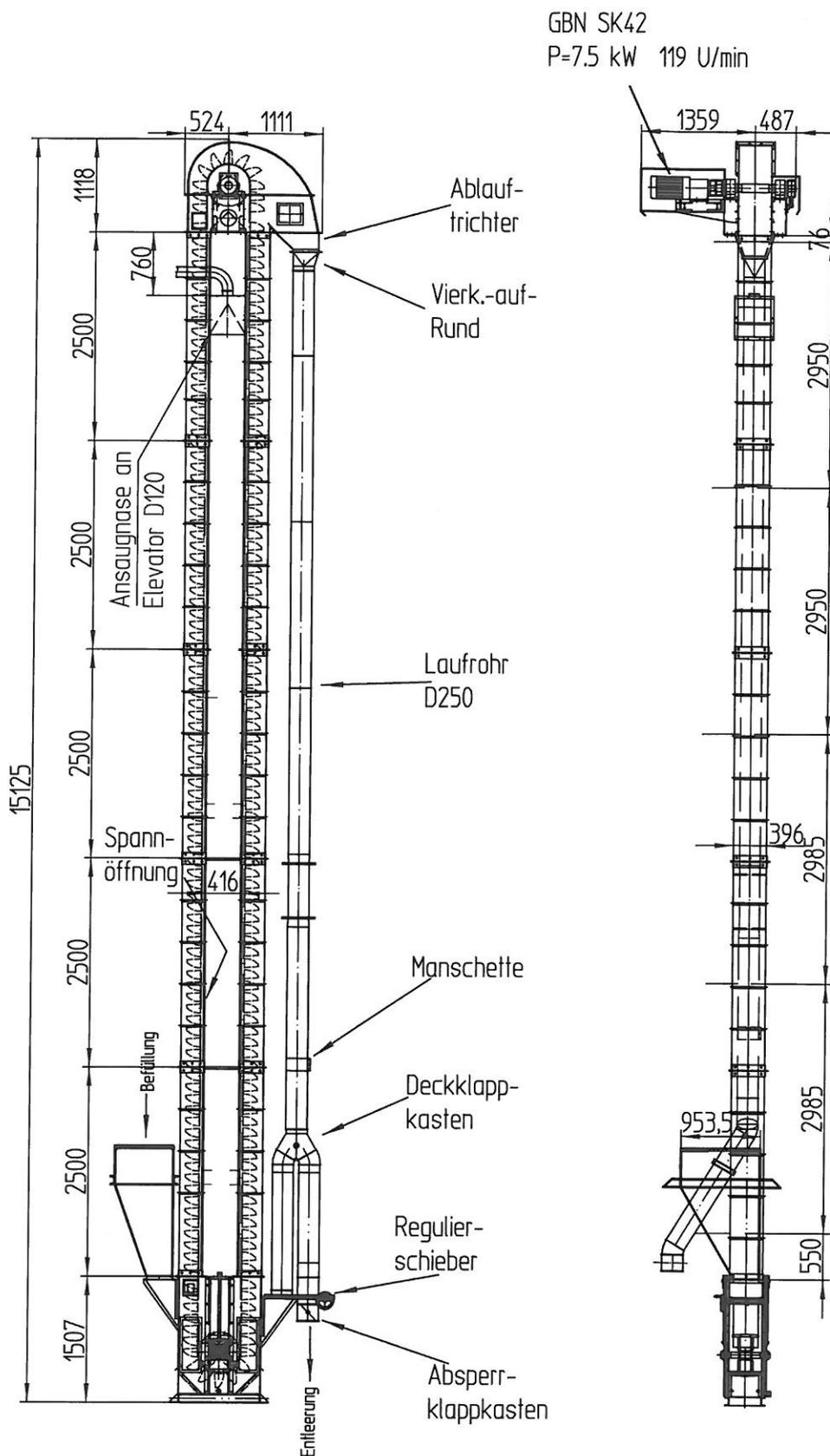


Bild A3: Schieber Elevatorfuß / Fallrohr

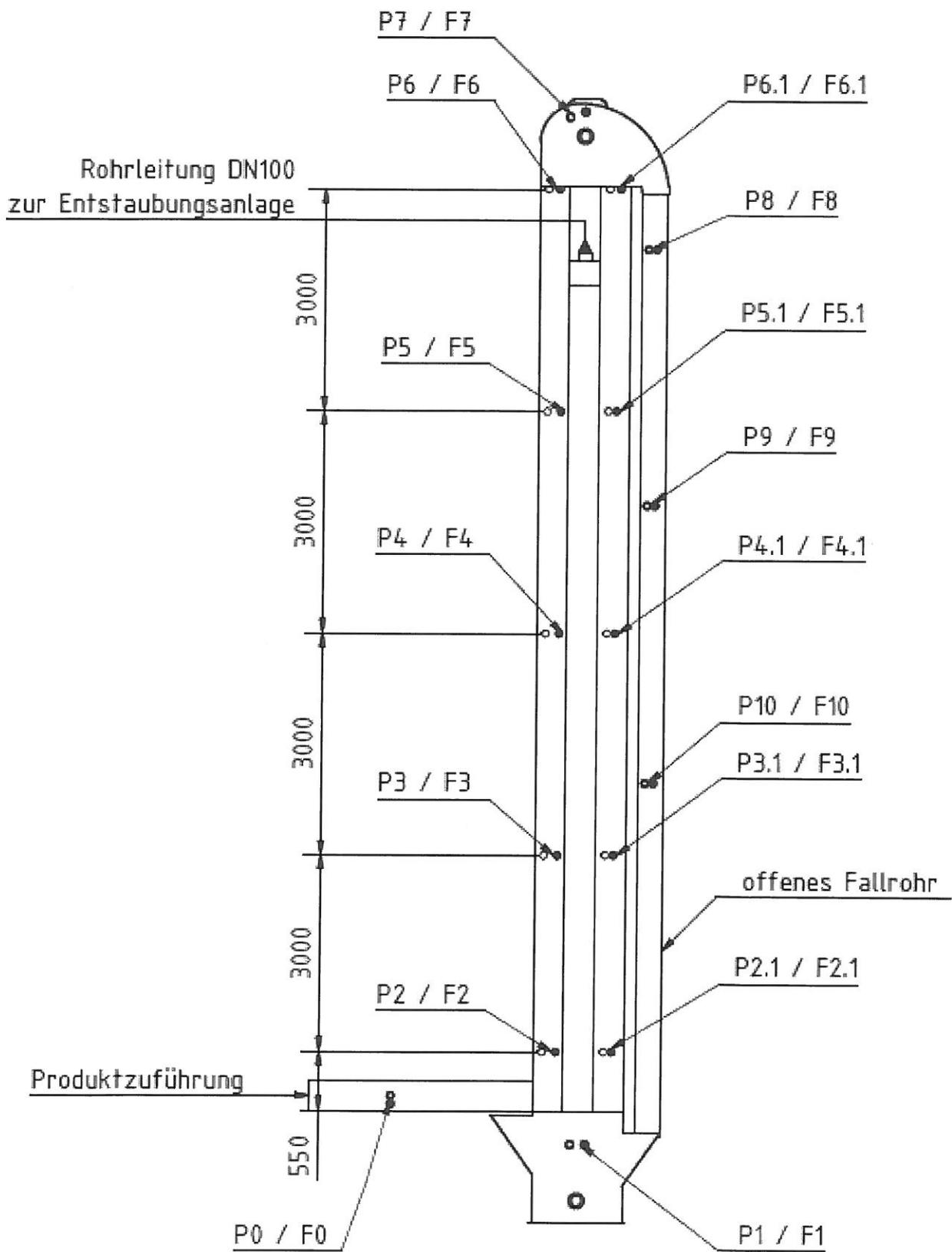


Bild A4: Elevatorkopf



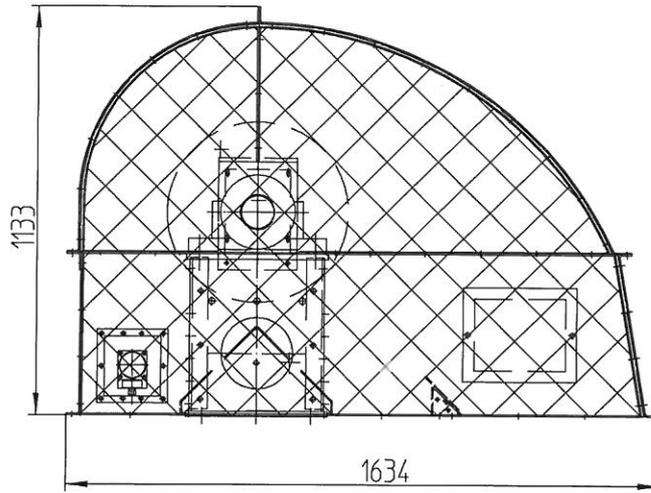


|           |          |     |      |  |           |                          |                                     |                                     |                        |
|-----------|----------|-----|------|--|-----------|--------------------------|-------------------------------------|-------------------------------------|------------------------|
| Werkstoff |          |     |      | Freimasstoleranz<br><b>DIN ISO 2768-mK</b> |           | <b>Schmidt-Seeger AG</b> |                                     | Gegenstand<br><b>Versuchsaufbau</b> | Maßstab<br><b>1:75</b> |
|           |          |     |      | Tag  | Name      |                          |                                     |                                     |                        |
|           |          |     |      | Gez.                                       | 13-Mar-07 | Wittmann                 | Zeichnungs-Nr.<br><b>3502_ac_01</b> |                                     | <b>1:50</b>            |
| Ausg.     | Änderung | Tag | Name | Norm                                       |           |                          |                                     |                                     |                        |

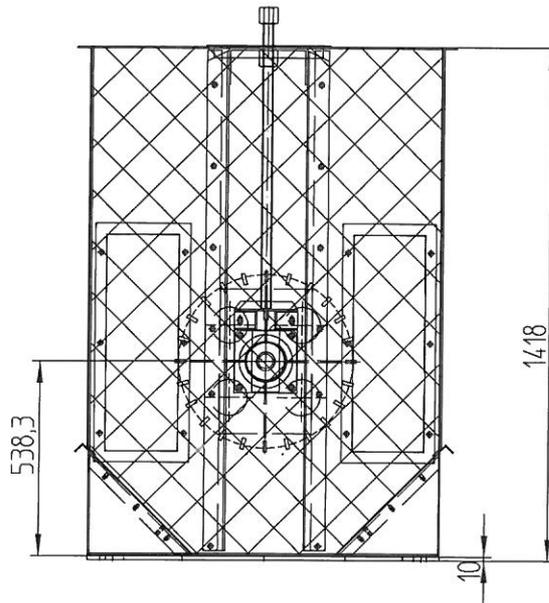


Die SCHMIDT-SEEGER GmbH behält sich alle Rechte an dieser Zeichnung vor. Ferner unterliegt sie dem Schutz des Urheberrechts, sowie anderer anwendbarer Schutzgesetze. Ohne vorherige schriftliche Zustimmung der SCHMIDT-SEEGER GmbH darf diese Zeichnung und ihr Inhalt nicht zu kommerziellen Zwecken kopiert, verwendet, verbreitet, verändert oder Dritten zur Verfügung gestellt werden. Zuwiderhandlungen verpflichten zu Schadensersatz.

All rights are reserved by SCHMIDT-SEEGER GmbH. This drawing is protected by copyright and other protective laws to the extent to which they may be applicable. This drawing and its content may not be copied, used, disseminated, altered or made available to third parties for commercial purposes without the prior written permission of SCHMIDT-SEEGER GmbH. Noncompliance will be prosecuted to the maximum extent possible.



507 dm<sup>3</sup>



480 dm<sup>3</sup>

|           |          |                  |           |            |       |  |                |         |
|-----------|----------|------------------|-----------|------------|-------|--|----------------|---------|
| Werkstoff |          | Freimasstoleranz |           |            |       |  | Gegenstand     | Maßstab |
| ST        |          | DIN ISO 2768-mK  |           |            |       |  |                |         |
|           |          |                  | Tag       | Name       | Gez.  |  | Zeichnungs-Nr. | 1:20    |
|           |          |                  | 13-Aug-10 | Mehringner | Gepr. |  |                |         |
| Index     | Änderung | Tag              | Name      | Norm       |       |  | 0000_tm_45     |         |

## **7.2 Messergebnisse**

Optimierung des konstruktiven Explosionsschutzes von Becherelevatoren

Projekt Nr.: G-05-0801

| Vers. Nr.                                   | Datum      | Fuß                              |                |                |                |                |                | Kopf                            |                |                |                |                |                | Auslauf P8     | Meldezentrale Aus (gemessen) [mbar] | Bemerkungen  |  |
|---|------------|----------------------------------|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|---------------------------------|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|-------------------------------------|--|--|
|   |            | Explosionsdruck Schacht aufwärts |                |                |                |                |                | Explosionsdruck Schacht abwärts |                |                |                |                |                |                |                                     |  |  |
|   |            | P1                               | P2             | P3             | P4             | P5             | P6             | P7                              | P6_1           | P5_1           | P4_1           | P3_1           | P2_1           |                |                                     |  |  |
|   |            | Pred,max [bar]                   | Pred,max [bar] | Pred,max [bar] | Pred,max [bar] | Pred,max [bar] | Pred,max [bar] | Pred,max [bar]                  | Pred,max [bar] | Pred,max [bar] | Pred,max [bar] | Pred,max [bar] | Pred,max [bar] | Pred,max [bar] |                                     |  |  |
| Zündort Elevatorfuß (2x 1000 J), Malzstaub  |            |                                  |                |                |                |                |                |                                 |                |                |                |                |                |                |                                     |  |  |
| C3  | 10.09.2008 | 0,981                            | 1,146          | 1,330          | 1,324          | 1,321          | 0,846          | 0,927                           | 0,790          | 0,718          | 1,165          | 1,390          | 1,131          | 0,418          | 104                                 | Unterdrückung in Kopf (2,9 kg) und Fuß (2,9 kg), Detektion Kopf: 100 mbar, Fuß 100 mbar  |  |
| C7  | 11.09.2008 | 0,613                            | 0,643          | 0,714          | 0,529          | 0,418          | 0,412          | 0,423                           | 0,385          | 0,413          | 0,596          | 0,875          | 0,615          | 0,200          | 103                                 | Unterdrückung in Kopf (2,9 kg) und Fuß (2,9 kg), Entkopplung in beiden Schächten (6 m, 8,3 kg); Detektion Kopf: 100 mbar, Fuß 100 mbar   |  |
| C10   | 11.09.2008 | 1,498                            | 1,463          | 1,487          | 1,434          | 1,298          | 0,744          | 0,757                           | 0,697          | 0,840          | 0,848          | 1,417          | 1,484          | 0,371          | 101                                 | Unterdrückung in Kopf (2,9 kg) und Fuß (2,9 kg), Entkopplung in beiden Schächten (6 m, 8,3 kg); Entkopplung im Einlaufrohr (4,48 m, 8,3 kg) Detektion Kopf: 100 mbar, Fuß 100 mbar |  |
| Zündort Elevatorfuß (2x 1000 J), Weizenmehl |            |                                  |                |                |                |                |                |                                 |                |                |                |                |                |                |                                     |  |  |
| C14   | 16.09.2008 | 0,100                            | 0,084          | 0,092          | 0,083          | 0,090          | 0,073          | 0,103                           | 0,065          | 0,081          | 0,092          | 0,083          | 0,067          | 0,064          | 33                                  | Unterdrückung in Kopf (2,9 kg) und Fuß (2,9 kg), Entkopplung in beiden Schächten (6 m, 8,3 kg); Detektion Kopf: 35 mbar, Fuß 35 mbar   |  |
| C16   | 17.09.2008 | 0,281                            | 0,286          | 0,250          | 0,230          | 0,253          | 0,267          | 0,261                           | 0,263          | 0,294          | 0,286          | 0,223          | 0,260          | 0,237          | 40                                  | Entkopplung in beiden Schächten (6 m, 8,3 kg); Entkopplung im Einlaufrohr (4,48 m, 8,3 kg) Detektion Kopf: 35 mbar, Fuß 35 mbar  |  |

| Vers. Nr.                                   | Datum      | Fuß                              |      |      |      |      |      | Kopf                            |      |      |      |      |      | Aspiration |      | Einlauf |      |      | Auslauf |      | Meldezentrale Aus (gemessen) [ms] |
|---|------------|----------------------------------|------|------|------|------|------|---------------------------------|------|------|------|------|------|------------|------|---------|------|------|---------|------|-----------------------------------|
|   |            | Flammenlaufzeit Schacht aufwärts |      |      |      |      |      | Flammenlaufzeit Schacht abwärts |      |      |      |      |      | F10        | F11  | F12     | F13  | F14  | F8      | F9   |                                   |
|   |            | F1                               | F2   | F3   | F4   | F5   | F6   | F7                              | F6_1 | F5_1 | F4_1 | F3_1 | F2_1 | [ms]       | [ms] | [ms]    | [ms] | [ms] | [ms]    | [ms] |                                   |
|   |            | [ms]                             | [ms] | [ms] | [ms] | [ms] | [ms] | [ms]                            | [ms] | [ms] | [ms] | [ms] | [ms] | [ms]       | [ms] | [ms]    | [ms] | [ms] | [ms]    | [ms] |                                   |
| Zündort Elevatorfuß (2x 1000 J), Malzstaub  |            |                                  |      |      |      |      |      |                                 |      |      |      |      |      |            |      |         |      |      |         |      |                                   |
| C3  | 10.09.2008 | 714                              | 846  | 904  | 946  | 974  |      |                                 |      | 1832 | 933  | 891  | 802  |            |      |         |      |      |         |      | 881                               |
| C7  | 11.09.2008 | 51                               | 345  | 433  |      |      |      |                                 |      |      |      | 438  | 286  |            |      |         |      | 381  | 422     |      | 402                               |
| C10   | 11.09.2008 | 48                               | 431  | 647  | 696  | 723  |      |                                 |      |      |      | 711  | 614  |            |      |         |      | 665  |         |      | 676                               |
| Zündort Elevatorfuß (2x 1000 J), Weizenmehl |            |                                  |      |      |      |      |      |                                 |      |      |      |      |      |            |      |         |      |      |         |      |                                   |
| C14   | 16.09.2008 | 108                              | 411  | 568  |      |      |      |                                 |      |      |      |      | 396  |            |      |         |      | 443  | 549     | 603  | 547                               |
| C16   | 17.09.2008 | 21                               | 542  | 1116 | 1474 | 1611 |      |                                 |      | 1856 | 1829 | 1969 |      |            |      |         | 1610 | 379  | 1744    | 1860 | 1661                              |

Optimierung des konstruktiven Explosionsschutzes von Becherelevatoren

Projekt Nr.: G-05-0801

| Vers. Nr.                         | Datum      | Fuß                                 | Explosionsdruck Schacht aufwärts    |                                     |                                     |                                     |                                     |                                     | Kopf                                  | Explosionsdruck Schacht abwärts       |                                       |                                       |                                       |                                     |    | Auslauf  | Ansprechdruck<br>(gemessen)<br>[mbar] | Bemerkungen |
|-----------------------------------|------------|-------------------------------------|-------------------------------------|-------------------------------------|-------------------------------------|-------------------------------------|-------------------------------------|-------------------------------------|---------------------------------------|---------------------------------------|---------------------------------------|---------------------------------------|---------------------------------------|-------------------------------------|----|--|---------------------------------------|-------------|
|                                   |            | P1<br>P <sub>red,max</sub><br>[bar] | P2<br>P <sub>red,max</sub><br>[bar] | P3<br>P <sub>red,max</sub><br>[bar] | P4<br>P <sub>red,max</sub><br>[bar] | P5<br>P <sub>red,max</sub><br>[bar] | P6<br>P <sub>red,max</sub><br>[bar] | P7<br>P <sub>red,max</sub><br>[bar] | P6_1<br>P <sub>red,max</sub><br>[bar] | P5_1<br>P <sub>red,max</sub><br>[bar] | P4_1<br>P <sub>red,max</sub><br>[bar] | P3_1<br>P <sub>red,max</sub><br>[bar] | P2_1<br>P <sub>red,max</sub><br>[bar] | P8<br>P <sub>red,max</sub><br>[bar] |    |  |                                       |             |
| Zündort: Elevatorfuß (1x 5000 J)  |            |                                     |                                     |                                     |                                     |                                     |                                     |                                     |                                       |                                       |                                       |                                       |                                       |                                     |    |  |                                       |             |
| D7                                | 25.09.2008 | 1,41                                | 1,46                                | 1,59                                | 1,85                                | 1,88                                | 1,65                                | 1,34                                | 1,38                                  | 2,39                                  | 2,36                                  | 1,70                                  | 1,49                                  | 0,69                                | 90 | Unterdrückung in Kopf (4 kg) und Fuß (4 kg),<br>Detektion Kopf: 40 mbar / 40 ms, Fuß 40 mbar / 30 ms   |                                       |             |
| D8                                | 26.09.2008 | 0,45                                | 0,38                                | 0,53                                | 0,45                                | 0,38                                | 0,31                                | 0,32                                | 0,28                                  | 0,37                                  | 0,56                                  | 0,64                                  | 0,52                                  | 0,12                                | 70 | Unterdrückung in Kopf (4 kg) und Fuß (4 kg),<br>Entkopplung in beiden Schächten (6 m, 4 kg);<br>Detektion Kopf: 30 mbar / 100 ms, Fuß 30 mbar / 100 ms |                                       |             |
| D10                               | 30.09.2008 | 0,83                                | 0,849                               | 0,817                               | 0,618                               | 0,447                               | 0,441                               | 0,482                               | 0,495                                 | 0,548                                 | 0,76                                  | 0,933                                 | 0,901                                 | 0,181                               | 60 | Unterdrückung in Kopf (4 kg) und Fuß (4 kg),<br>Entkopplung in beiden Schächten (6m, 4 kg);<br>Detektion Kopf: 30 mbar / 100 ms, Fuß 35 mbar / 100 ms  |                                       |             |
| Zündort: Elevatorkopf (1x 5000 J) |            |                                     |                                     |                                     |                                     |                                     |                                     |                                     |                                       |                                       |                                       |                                       |                                       |                                     |    |  |                                       |             |
| D12                               | 30.09.2008 | 0,16                                | 0,162                               | 0,176                               | 0,14                                | 0,134                               | 0,106                               | 0,171                               | 0,116                                 | 0,147                                 | 0,169                                 | 0,158                                 | 0,172                                 | 0,083                               | 40 | Unterdrückung in Kopf (4 kg) und Fuß (4 kg),<br>Entkopplung in beiden Schächten (6m, 4 kg);<br>Detektion Kopf: 35 mbar / 100 ms, Fuß 35 mbar / 100 ms  |                                       |             |
| D13                               | 01.10.2008 | 0,326                               | 0,328                               | 0,347                               | 0,358                               | 0,398                               | 0,349                               | 0,35                                | 0,341                                 | 0,355                                 | 0,335                                 | 0,297                                 | 0,332                                 | 0,165                               | 67 | Unterdrückung in Kopf (4 kg) und Fuß (4 kg),<br>Entkopplung in beiden Schächten (6m, 4 kg);<br>Detektion Kopf: 35 mbar / 100 ms, Fuß 35 mbar / 100 ms  |                                       |             |

| Vers. Nr.                         | Datum      | Fuß        | Flammenlaufzeit Schacht aufwärts |            |            |            |            |            | Kopf         | Flammenlaufzeit Schacht abwärts |              |              |              |             |             | Aspiration  |             | Einlauf     |            |            | Auslauf |     | Meldezentrale Aus<br>(gemessen)<br>[ms] |
|-----------------------------------|------------|------------|----------------------------------|------------|------------|------------|------------|------------|--------------|---------------------------------|--------------|--------------|--------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|------------|------------|---------|-----|---|
|                                   |            | F1<br>[ms] | F2<br>[ms]                       | F3<br>[ms] | F4<br>[ms] | F5<br>[ms] | F6<br>[ms] | F7<br>[ms] | F6_1<br>[ms] | F5_1<br>[ms]                    | F4_1<br>[ms] | F3_1<br>[ms] | F2_1<br>[ms] | F10<br>[ms] | F11<br>[ms] | F12<br>[ms] | F13<br>[ms] | F14<br>[ms] | F8<br>[ms] | F9<br>[ms] |         |     |   |
| Zündort: Elevatorfuß (1x 5000 J)  |            |            |                                  |            |            |            |            |            |              |                                 |              |              |              |             |             |             |             |             |            |            |         |     |   |
| D7                                | 25.09.2008 |            | 193                              | 599        | 691        | 736        | 769        |            | 837          | 801                             | 722          | 706          | 368          | 763         |             |             | 551         | 656         |            |            |         | 700 |   |
| D8                                | 26.09.2008 |            | 54                               | 338        | 437        |            |            |            |              |                                 |              | 419          | 191          |             |             |             | 212         | 347         |            |            |         | 410 |   |
| D10                               | 30.09.2008 |            | 49                               | 194        | 327 ?      |            |            |            |              |                                 |              | 218          | 129          |             |             |             | 102         | 217         |            |            |         | 175 |   |
| Zündort: Elevatorkopf (1x 5000 J) |            |            |                                  |            |            |            |            |            |              |                                 |              |              |              |             |             |             |             |             |            |            |         |     |   |
| D12                               | 30.09.2008 |            |                                  |            |            |            |            |            | 141          |                                 |              |              |              |             |             |             |             |             |            |            |         | 137 |   |
| D13                               | 01.10.2008 |            |                                  |            |            |            |            |            | 182          |                                 | 455          |              |              | 198         | 292         |             |             |             |            |            |         | 268 |   |

Optimierung des konstruktiven Explosionsschutzes von Becherelevatoren

Projekt Nr.: G-05-0801

| Vers. Nr.   | Datum      | Fuß                         |                             | Explosionsdruck Schacht aufwärts |                             |                             |                             | Kopf                        | Explosionsdruck Schacht abwärts |                             |                             |                             |                             | Auslauf                     | Meldezentrale Aus (gemessen) [mbar] | Bemerkungen   |
|---|------------|-----------------------------|-----------------------------|----------------------------------|-----------------------------|-----------------------------|-----------------------------|-----------------------------|---------------------------------|-----------------------------|-----------------------------|-----------------------------|-----------------------------|-----------------------------|-------------------------------------|---|
|   |            | P1                          | P2                          | P3                               | P4                          | P5                          | P6                          | P7                          | P6_1                            | P5_1                        | P4_1                        | P3_1                        | P2_1                        | P8                          |                                     |   |
|   |            | P <sub>Pred,max</sub> [bar] | P <sub>Pred,max</sub> [bar] | P <sub>Pred,max</sub> [bar]      | P <sub>Pred,max</sub> [bar] | P <sub>Pred,max</sub> [bar] | P <sub>Pred,max</sub> [bar] | P <sub>Pred,max</sub> [bar] | P <sub>Pred,max</sub> [bar]     | P <sub>Pred,max</sub> [bar] | P <sub>Pred,max</sub> [bar] | P <sub>Pred,max</sub> [bar] | P <sub>Pred,max</sub> [bar] | P <sub>Pred,max</sub> [bar] |                                     |   |
| Zündort Elevatorfuß (1x 5000 J), Malzstaub                                    |            |                             |                             |                                  |                             |                             |                             |                             |                                 |                             |                             |                             |                             |                             |                                     |   |
| G3  | 26.06.2009 | 0,075                       |                             | 0,062                            | 0,052                       | 0,049                       | 0,059                       | 0,057                       | 0,051                           | 0,052                       | 0,050                       | 0,050                       | 0,057                       | 0,036                       | 25                                  | Unterdrückung im Fuß (2,9 kg),<br>Entkopplung in beiden Schächten (6 m, 8,3 kg),<br>Entkopplung im Einlaufrohr (4,2 m, 8,3 kg)<br>Detektion Schachtanfang (0,54 m): optisch mit Verzögerung von 45 ms |
| Zündort Elevatorkopf (1x 5000 J), Malzstaub                                   |            |                             |                             |                                  |                             |                             |                             |                             |                                 |                             |                             |                             |                             |                             |                                     |   |
| G4  | 30.06.2009 | 0,046                       | 0,011                       | 0,054                            | 0,058                       | 0,060                       | 0,074                       | 0,100                       | 0,066                           | 0,064                       | 0,063                       | 0,052                       | 0,060                       | 0,071                       | 9                                   | Unterdrückung im Kopf (2,9 kg),<br>Entkopplung in beiden Schächten (6m, 8,3 kg)<br>Detektion Schachtende (0,54 m): optisch mit Verzögerung von 45 ms  |
| Zündort Schachtanfang (aufsteigender Schacht, 0,54 m), (1x 5000 J), Malzstaub |            |                             |                             |                                  |                             |                             |                             |                             |                                 |                             |                             |                             |                             |                             |                                     |   |
| G6  | 01.07.2009 | 0,952                       | 1,043                       | 1,360                            | 1,428                       | 0,788                       | 0,424                       | 0,294                       | 0,243                           | 0,433                       | 0,522                       | 0,744                       | 0,991                       | 0,155                       | 49                                  | Unterdrückung im Fuß (2,9 kg),<br>Entkopplung in beiden Schächten (6 m, 8,3 kg)<br>Detektion Schachtanfang (0,54 m): optisch mit Verzögerung von 45 ms  |
| Zündort Schachtanfang (aufsteigender Schacht, 3,48 m), (1x 5000 J), Malzstaub |            |                             |                             |                                  |                             |                             |                             |                             |                                 |                             |                             |                             |                             |                             |                                     |   |
| G8  | 02.07.2009 | 0,453                       | 0,645                       | 0,950                            | 1,223                       | 1,388                       | 0,754                       | 0,654                       | 0,523                           | 0,484                       | 0,503                       | 0,400                       | 0,290                       | 0,482                       | 74                                  | Unterdrückung im Fuß (2,9 kg),<br>Entkopplung in beiden Schächten (6 m, 8,3 kg)<br>Detektion Schachtanfang (0,54 m): optisch ohne Verzögerung   |
| Zündort Elevatorfuß (1x 5000 J), getrocknete Maisstärke                       |            |                             |                             |                                  |                             |                             |                             |                             |                                 |                             |                             |                             |                             |                             |                                     |   |
| G9  | 03.07.2009 | 0,804                       | 0,729                       | 0,428                            | 0,339                       | 0,208                       | 0,210                       | 0,200                       | 0,212                           | 0,214                       | 0,306                       | 0,455                       | 0,873                       | 0,125                       | 92                                  | Unterdrückung im Fuß (2,9 kg),<br>Entkopplung in beiden Schächten (6 m, 8,3 kg)<br>Detektion Schachtanfang (0,54 m): optisch mit Verzögerung von 45 ms  |

| Vers. Nr.   | Datum      | Fuß  |      | Flammenlaufzeit Schacht aufwärts |      |      |      | Kopf | Flammenlaufzeit Schacht abwärts |      |      |      |      | Aspiration |      | Einlauf |      |      | Auslauf |      | Meldezentrale Aus (gemessen) [ms] |
|---|------------|------|------|----------------------------------|------|------|------|------|---------------------------------|------|------|------|------|------------|------|---------|------|------|---------|------|-----------------------------------|
|   |            | F1   | F2   | F3                               | F4   | F5   | F6   | F7   | F6_1                            | F5_1 | F4_1 | F3_1 | F2_1 | F10        | F11  | F12     | F13  | F14  | F8      | F9   |                                   |
|   |            | [ms] | [ms] | [ms]                             | [ms] | [ms] | [ms] | [ms] | [ms]                            | [ms] | [ms] | [ms] | [ms] | [ms]       | [ms] | [ms]    | [ms] | [ms] | [ms]    | [ms] |                                   |
| Zündort Elevatorfuß (1x 5000 J), Malzstaub                                    |            |      |      |                                  |      |      |      |      |                                 |      |      |      |      |            |      |         |      |      |         |      |                                   |
| G3  | 26.06.2009 | 0    | 66   |                                  |      |      |      |      |                                 |      |      |      |      | 54         |      |         |      |      |         |      | 45                                |
| Zündort Elevatorkopf (1x 5000 J), Malzstaub                                   |            |      |      |                                  |      |      |      |      |                                 |      |      |      |      |            |      |         |      |      |         |      |                                   |
| G4  | 30.06.2009 |      |      |                                  |      |      | 0    | 0    | 0                               |      |      |      |      | 162        |      |         |      |      |         |      | 45                                |
| Zündort Schachtanfang (aufsteigender Schacht, 0,54 m), (1x 5000 J), Malzstaub |            |      |      |                                  |      |      |      |      |                                 |      |      |      |      |            |      |         |      |      |         |      |                                   |
| G6  | 01.07.2009 | 41   | 0    | 84                               |      |      |      |      |                                 |      |      |      |      | 101        |      |         | 50   |      |         |      | 45                                |
| Zündort Schachtanfang (aufsteigender Schacht, 3,48 m), (1x 5000 J), Malzstaub |            |      |      |                                  |      |      |      |      |                                 |      |      |      |      |            |      |         |      |      |         |      |                                   |
| G8  | 02.07.2009 | 144  | 115  | 0                                | 111  | 142  | 166  |      |                                 |      |      |      |      |            |      |         |      |      |         |      | 114                               |
| Zündort Elevatorfuß (1x 5000 J), getrocknete Maisstärke                       |            |      |      |                                  |      |      |      |      |                                 |      |      |      |      |            |      |         |      |      |         |      |                                   |
| G9  | 03.07.2009 | 0    | 39   | 95                               |      |      |      |      |                                 |      |      |      |      | 60         |      |         | 0    |      |         |      | 46                                |

Optimierung des konstruktiven Explosionsschutzes von Becherelevatoren

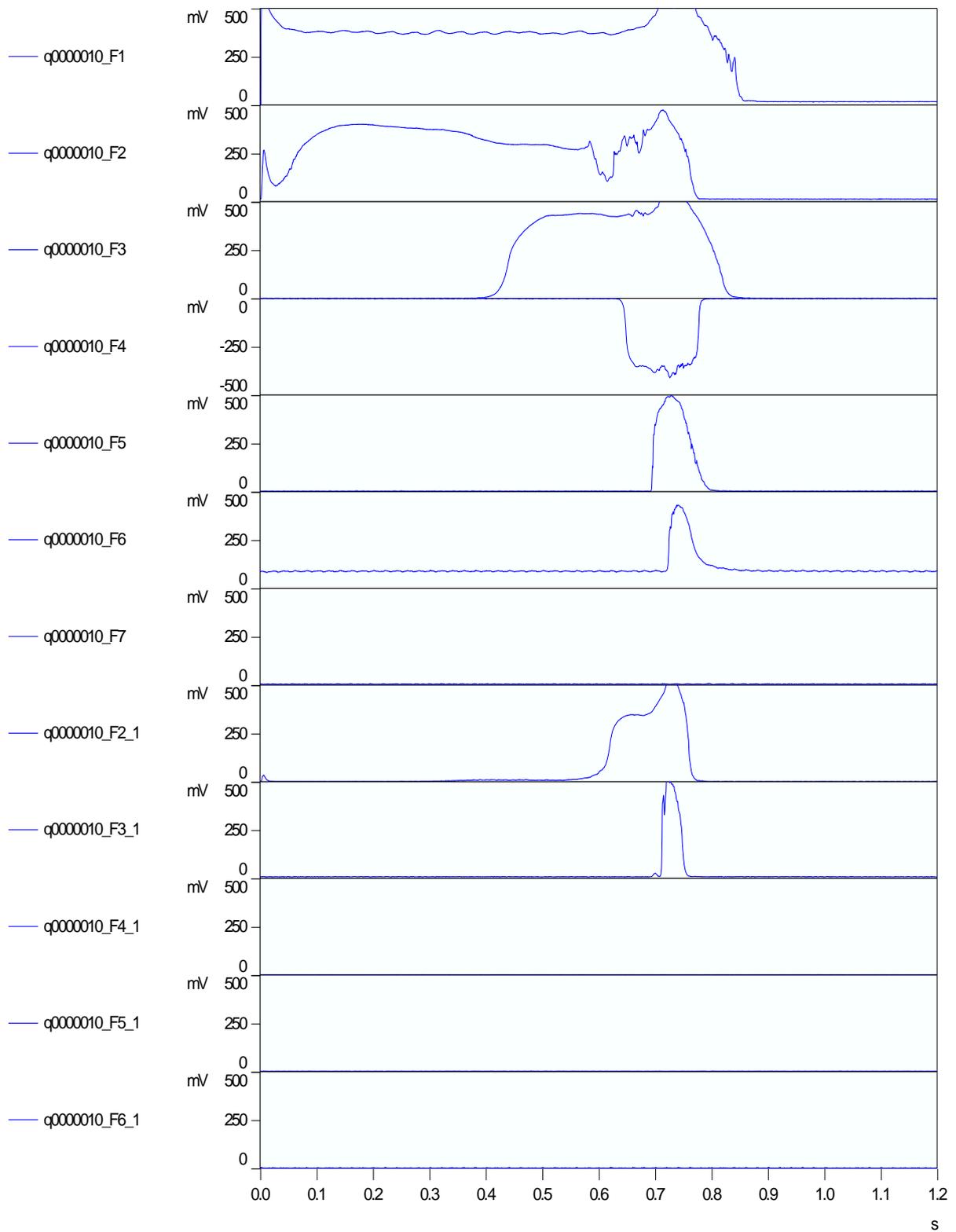
Projekt Nr.: G-05-0801

| Vers. Nr.   | Datum          | Fuß                              |                |                |                |                |                | Kopf                            |                |                |                |                |       | Auslauf | Meldezentrale Aus (gemessen) [mbar] | Bemerkungen   |
|---|----------------|----------------------------------|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|---------------------------------|----------------|----------------|----------------|----------------|-------|---------|-------------------------------------|---|
|   |                | Explosionsdruck Schacht aufwärts |                |                |                |                |                | Explosionsdruck Schacht abwärts |                |                |                |                |       |         |                                     |   |
|   |                | P1                               | P2             | P3             | P4             | P5             | P6             | P7                              | P6_1           | P5_1           | P4_1           | P3_1           | P2_1  |         |                                     |   |
| Pred,max [bar]  | Pred,max [bar] | Pred,max [bar]                   | Pred,max [bar] | Pred,max [bar] | Pred,max [bar] | Pred,max [bar] | Pred,max [bar] | Pred,max [bar]                  | Pred,max [bar] | Pred,max [bar] | Pred,max [bar] | Pred,max [bar] |       |         |                                     |   |
| Zündort Elevatorfuß                                       |                |                                  |                |                |                |                |                |                                 |                |                |                |                |       |         |                                     |   |
| H1  | 20.07.2009     | 0,318                            | 0,211          | 0,184          | 0,159          | 0,128          | 0,101          | 0,105                           | 0,110          | 0,116          | 0,067          | 0,163          | 0,272 | 0,090   |                                     | Malzstaub (1 x 5000 J)<br>Unterdrückung im Fuß (2,5 kg),<br>Entkopplung in beiden Schächten (1,40 m, je 2,5 kg)   |
| H3  | 21.07.2009     | 0,342                            | 0,336          | 0,202          | 0,165          | 0,118          | 0,133          | 0,127                           | 0,120          | 0,133          | 0,108          | 0,172          | 0,335 | 0,082   |                                     | Malzstaub (1 x 5000 J),<br>Unterdrückung im Fuß (2,5 kg),<br>Entkopplung in beiden Schächten (1,40 m, je 2,5 kg)  |
| H4  | 22.07.2009     | 0,454                            | 0,209          | 0,204          | 0,169          | 0,152          | 0,129          | 0,128                           | 0,131          | 0,160          | 0,179          | 0,233          | 0,499 | 0,094   |                                     | Malzstaub (2 x 1000 J),<br>Unterdrückung im Fuß (2,5 kg),<br>Entkopplung in beiden Schächten ( 1,40 m, je 2,5 kg) |
| H5  | 23.07.2009     | 0,191                            | 0,280          | 0,165          | 0,215          | 0,265          | 0,268          | 0,271                           | 0,271          | 0,269          | 0,243          | 0,205          | 0,180 | 0,203   |                                     | Weizenmehl (2 x 1000 J),<br>Unterdrückung im Fuß (2,5 kg),<br>Entkopplung in beiden Schächten (1,40 m, je 2,5 kg) |
| Zündort Schachtanfang/Elevatorfuß (1 x 5000 J), Malzstaub |                |                                  |                |                |                |                |                |                                 |                |                |                |                |       |         |                                     |   |
| H2  | 20.07.2009     | 0,312                            | 0,305          | 0,157          | 0,141          | 0,115          | 0,107          | 0,107                           | 0,113          | 0,125          | 0,133          | 0,140          | 0,287 | 0,088   |                                     | Unterdrückung im Fuß (2,5 kg),<br>Entkopplung in beiden Schächten (1,40 m, je 2,5 kg)                             |
| Zündort Elevatorkopf (2 x 1000 J), Malzstaub              |                |                                  |                |                |                |                |                |                                 |                |                |                |                |       |         |                                     |   |
| H6  | 28.07.2009     | 1,101                            | 0,860          | 0,850          | 0,524          | 0,326          | 0,279          | 0,303                           | 0,380          | 0,943          | 1,559          |                | 1,721 | 0,118   |                                     | Unterdrückung im Kopf (2,5 kg),<br>Entkopplung in beiden Schächten (1,40 m, je 2,5 kg)                            |
| H7  | 29.07.2009     | 0,297                            | 0,281          | 0,280          | 0,346          | 0,562          | 0,582          | 0,577                           | 0,578          | 0,533          | 0,334          | 0,275          | 0,290 | 0,451   |                                     | Unterdrückung im Kopf (2,5 kg),<br>Entkopplung in beiden Schächten (5 m, je 2,5 kg)                               |

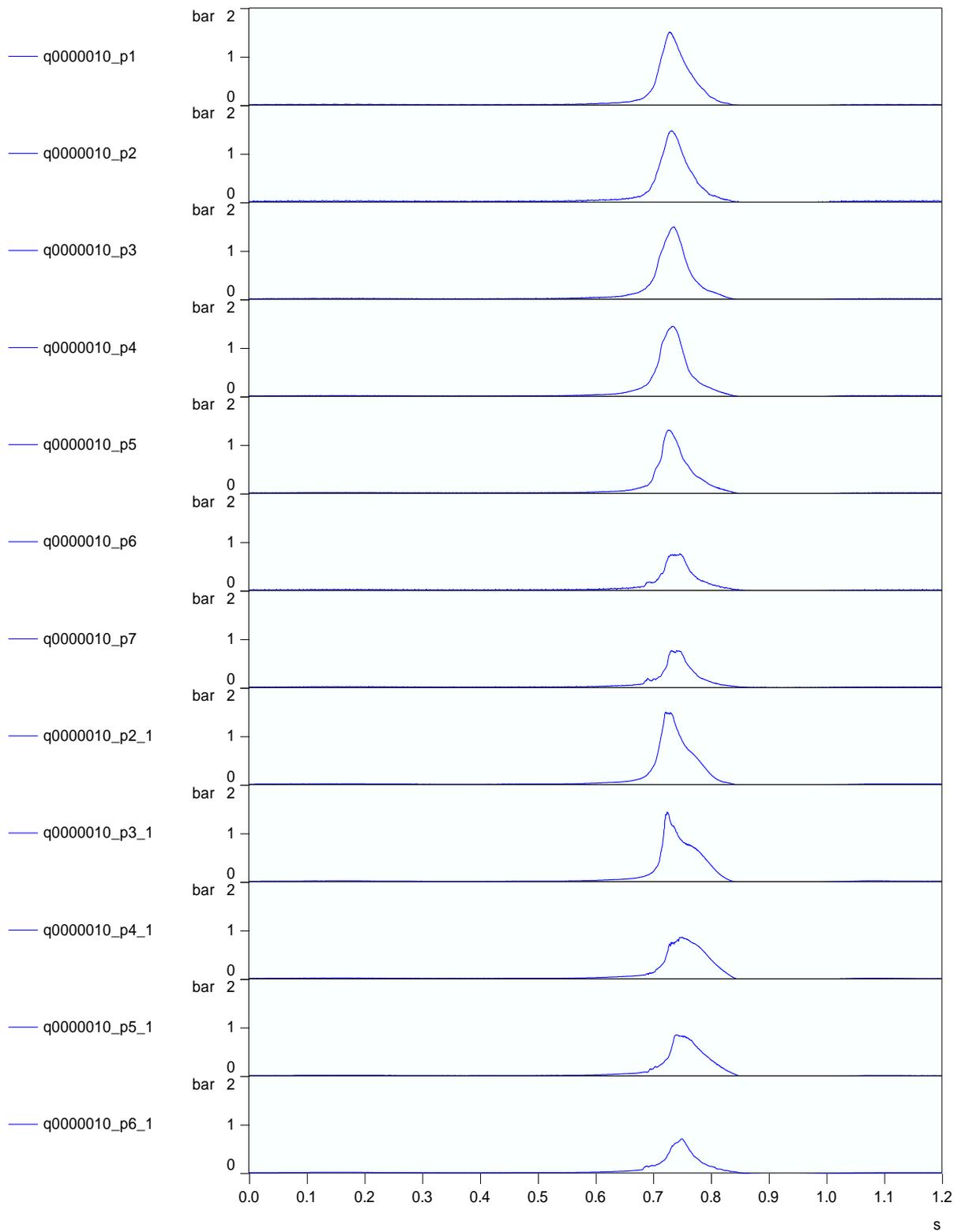
| Vers. Nr.                                      | Datum      | Fuß                              |      |      |      |      |      | Kopf                            |      |      |      |      |      | Aspiration |     | Einlauf |      |      | Auslauf |      | Meldezentrale Aus (gemessen) [ms] |
|--|------------|----------------------------------|------|------|------|------|------|---------------------------------|------|------|------|------|------|------------|-----|---------|------|------|---------|------|-----------------------------------|
|  |            | Flammenlaufzeit Schacht aufwärts |      |      |      |      |      | Flammenlaufzeit Schacht abwärts |      |      |      |      |      | F10        | F11 | F12     | F13  | F14  | F8      | F9   |                                   |
|  |            | F1                               | F2   | F3   | F4   | F5   | F6   | F7                              | F6_1 | F5_1 | F4_1 | F3_1 | F2_1 |            |     |         |      |      |         |      |                                   |
| [ms]   | [ms]       | [ms]                             | [ms] | [ms] | [ms] | [ms] | [ms] | [ms]                            | [ms] | [ms] | [ms] |      |      |            |     |         |      |      |         |      |                                   |
| Zündort Elevatorfuß (1 x 5000 J)               |            |                                  |      |      |      |      |      |                                 |      |      |      |      |      |            |     |         |      |      |         |      |                                   |
| H1   | 20.07.2009 |                                  | 73   |      |      |      |      |                                 |      |      |      |      |      |            |     |         |      |      |         |      |                                   |
| H3   | 21.07.2009 |                                  | 64   |      |      |      |      |                                 |      |      |      |      |      |            |     |         | 135  |      |         |      |                                   |
| H4   | 22.07.2009 |                                  | 65   |      |      |      |      |                                 |      |      |      |      |      | 116        |     |         |      | 127  |         |      |                                   |
| H5   | 23.07.2009 |                                  | 178  | 542  | 1067 | 1212 | 1275 | 1342                            | 1395 | 1437 | 1553 |      |      | 1278       |     |         | 1145 | 1260 | 1297    | 1411 | 1449                              |
| Zündort Schachtanfang/Elevatorfuß (1 x 5000 J) |            |                                  |      |      |      |      |      |                                 |      |      |      |      |      |            |     |         |      |      |         |      |                                   |
| H2   | 20.07.2009 |                                  |      |      |      |      |      |                                 |      |      |      |      |      |            |     |         |      |      |         |      |                                   |
| Zündort Elevatorkopf (1 x 5000 J)              |            |                                  |      |      |      |      |      |                                 |      |      |      |      |      |            |     |         |      |      |         |      |                                   |
| H6   | 28.07.2009 |                                  |      | 2181 | 1993 | 1264 |      |                                 |      | 1162 | 1312 | 1339 | 1359 | 836        |     |         |      |      |         | 1059 | 1245                              |
| H7   | 29.07.2009 |                                  |      |      |      | 585  |      |                                 |      | 144  | 520  |      |      | 442        |     |         |      |      |         | 543  |                                   |

### **7.3 Druck- und Flammenverläufe von ausgewählten Versuchen**

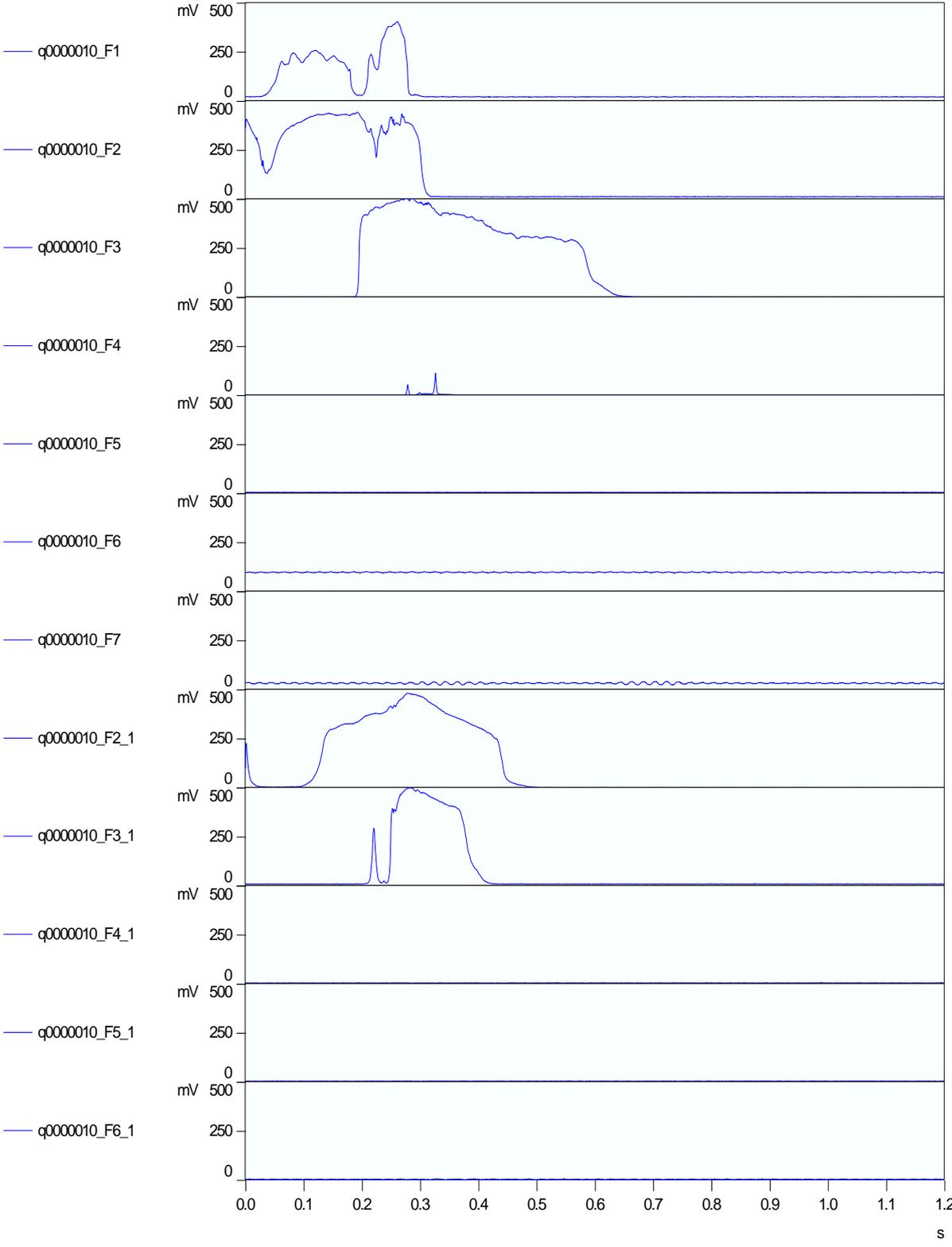
# Versuch C10\_Flammen



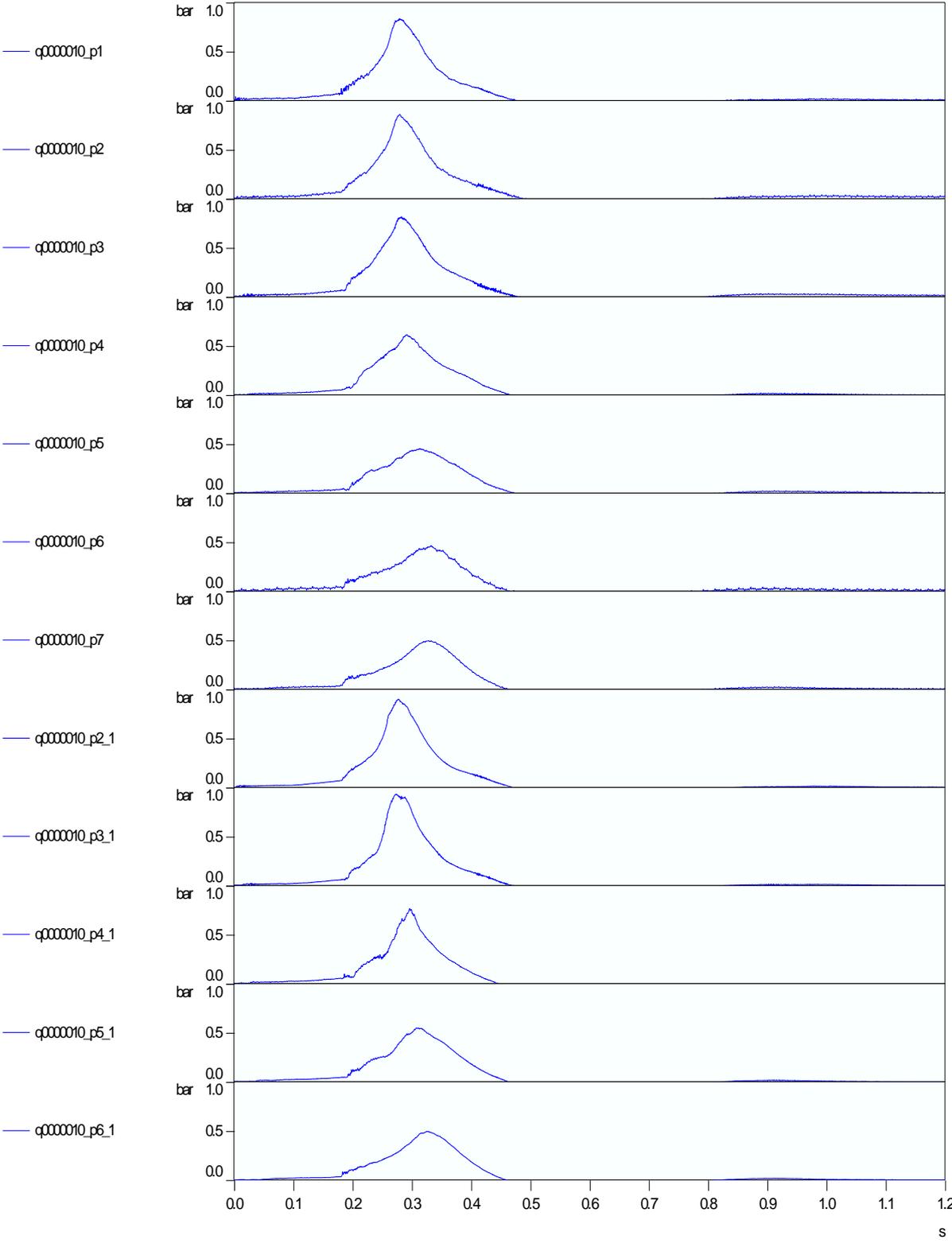
# Versuch C10\_Druck



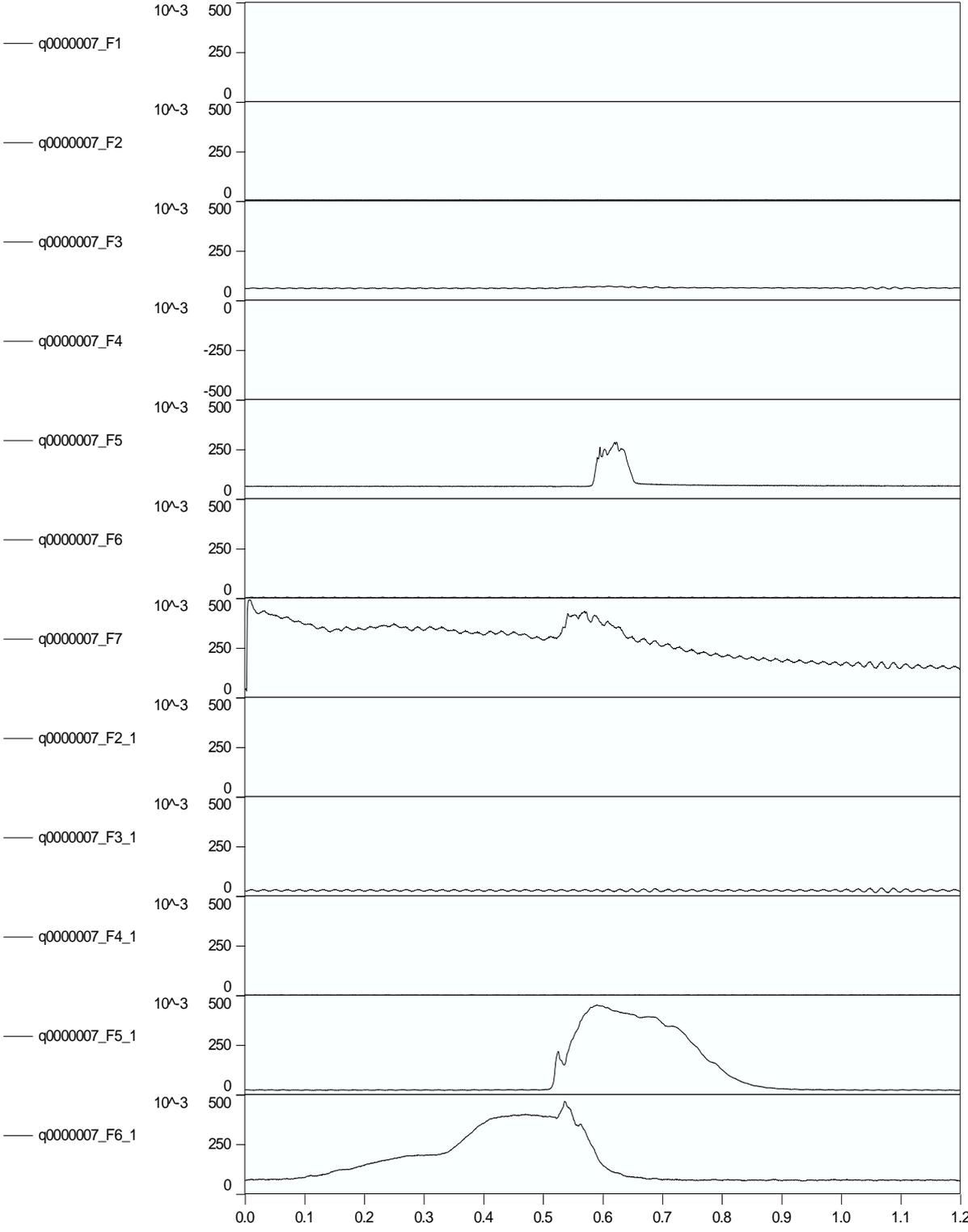
Versuch D10\_Flammen



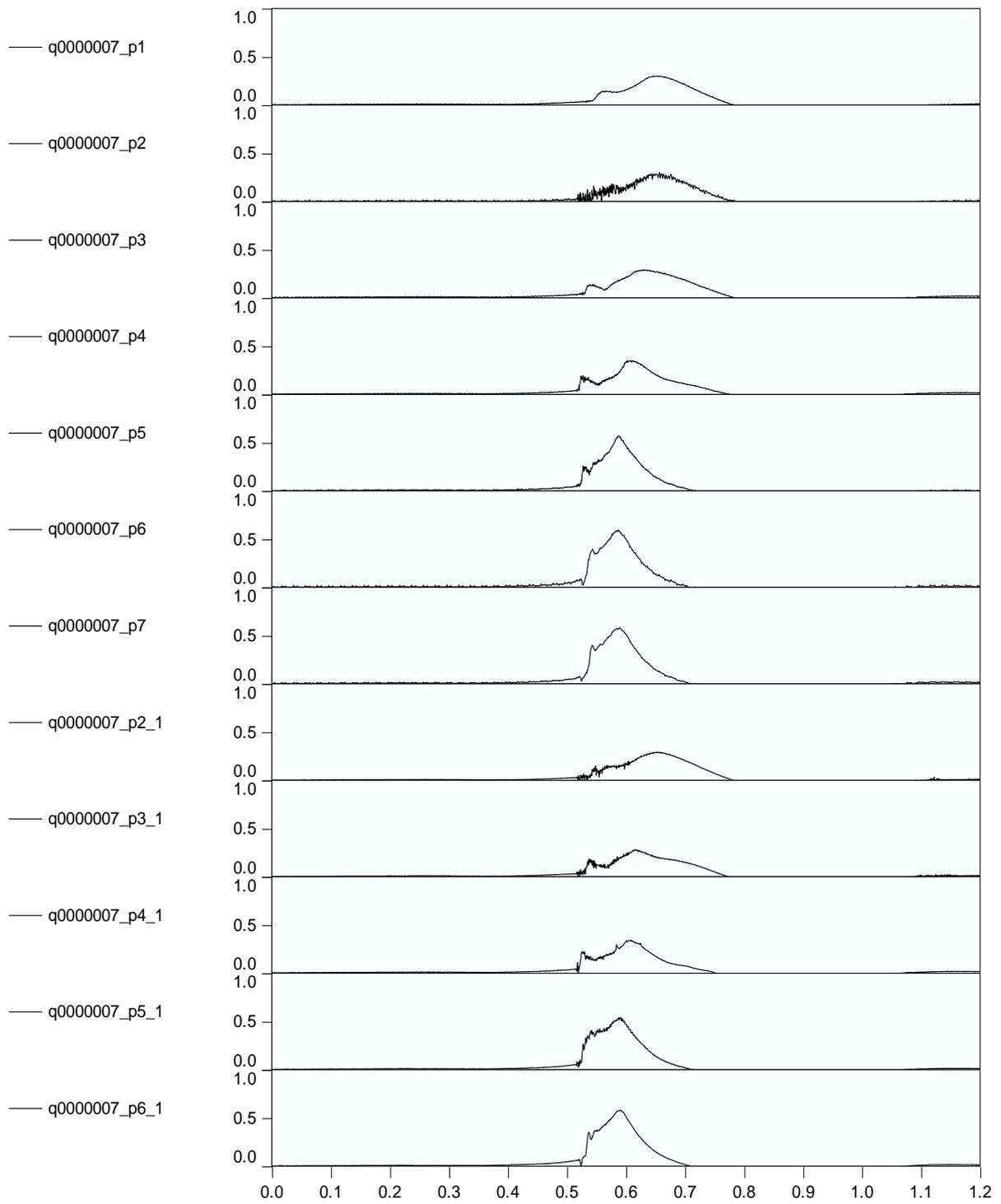
Versuch D10\_Druck



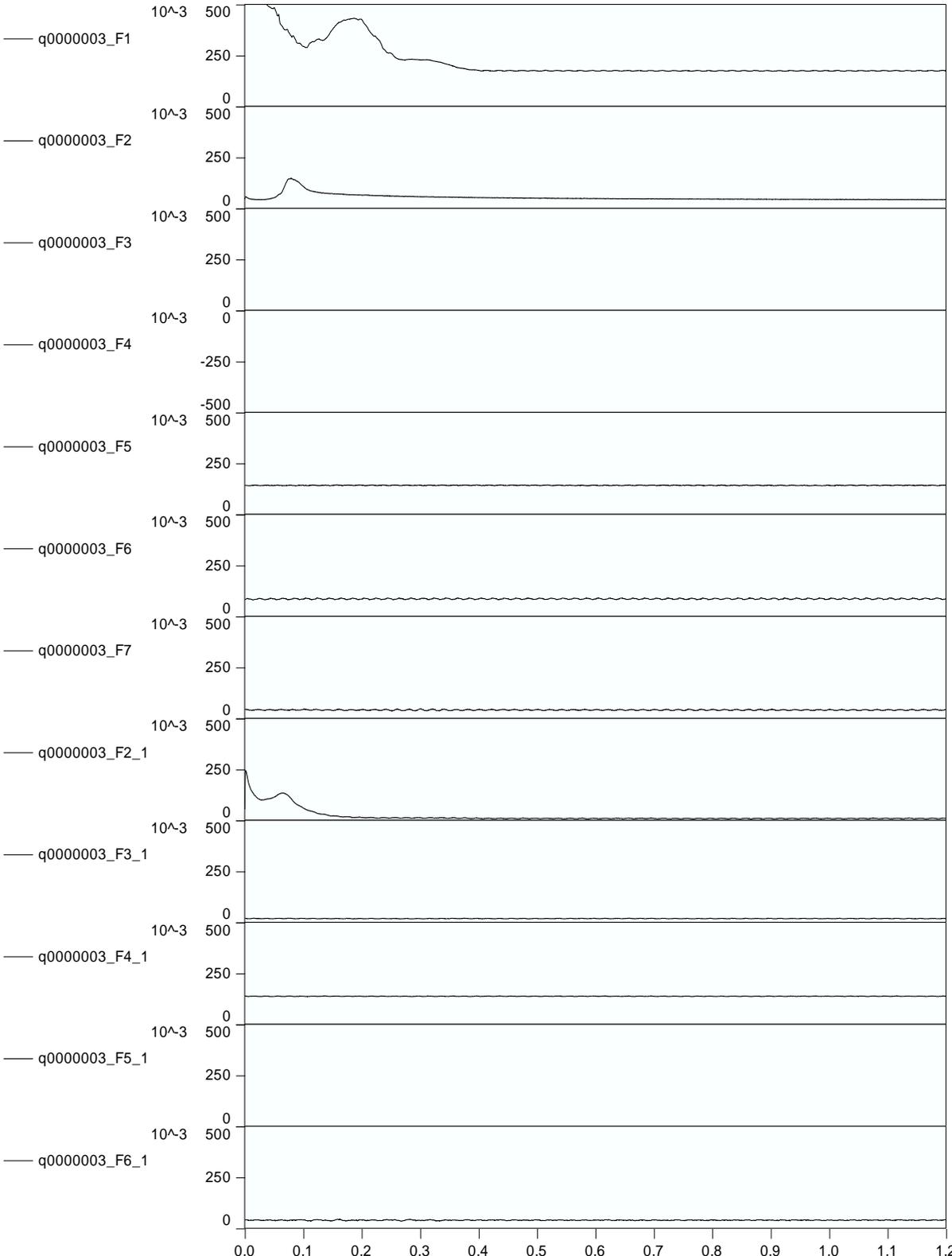
Versuch H7\_Flammen



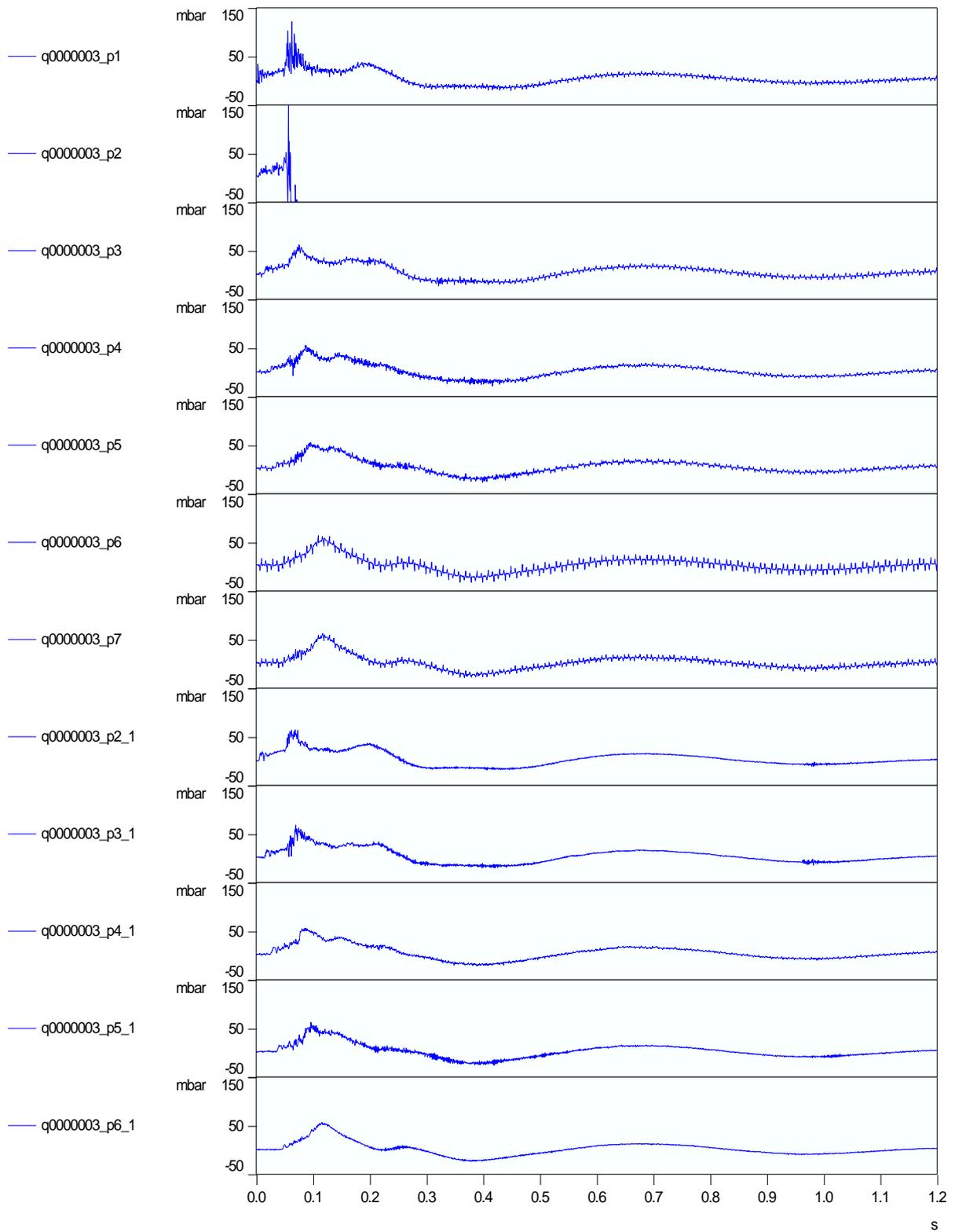
# Versuch H7\_Druck



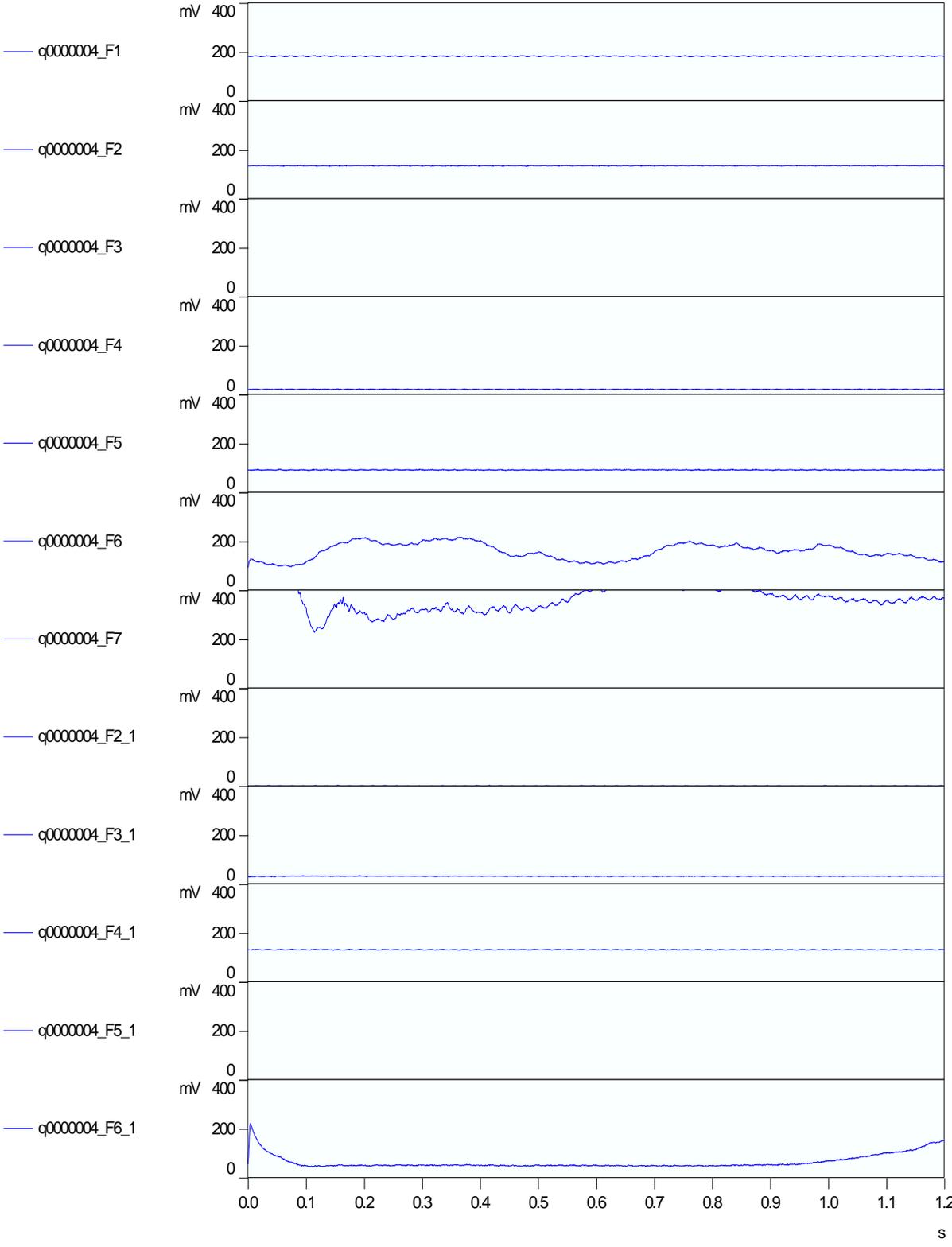
Versuch G3\_Flammen



# Versuch G3\_Druck



Versuch G4\_Flammen



# Versuch G4\_Druck

