

Neue Erkenntnisse für den konstruktiven Explosionsschutz von Becherelevatoren

Albrecht Vogl, Mannheim, und Siegfried Radandt, Brühl

Becherelevatoren werden in großer Zahl für die Senkrechtförderung brennbarer Schüttgüter eingesetzt. In Abhängigkeit der Betriebsbedingungen muss im Innern sowohl mit explosionsfähigen Staub/Luft-Gemischen als auch mit wirksamen Zündquellen gerechnet werden. Maßnahmen zur Zündquellenvermeidung reichen für den sicheren Betrieb oft nicht aus, sodass zusätzliche konstruktive Schutzmaßnahmen ergriffen werden müssen. Weil keine ausreichende Grundlage für die Auslegung von Explosionsunterdrückungssystemen und Löschmittelsperren an Becherelevatoren vorhanden war, wurden auf dem Versuchsgelände der BGN und FSA in Kappelrodeck Explosionsversuche im Großmaßstab durchgeführt. Nachfolgend werden die wesentlichen Erkenntnisse zur Auslegung der Schutzsysteme und zur erforderlichen Explosionsfestigkeit der Becherelevatoren vorgestellt.

In Becherelevatoren können Schüttgüter in staubförmiger Form, als Granulate oder auch als Pellets vorliegen. Bereits relativ geringe Feinstaubanteile des Schüttguts können Staubablagerungen im Elevator bilden, die ausreichen, um nach Verwirbelung durch das laufende Becherwerk explosionsfähige Staub/Luft-Gemische zu erzeugen. In Abhängigkeit der Schüttguteigenschaften und Prozessbedingungen können wirksame Zündquellen oft nicht ausgeschlossen werden. Es besteht das Risiko einer Staubexplosion und der Explosionsübertragung in verbundene Anlagenbereiche. In diesen Fällen müssen zusätzliche konstruktive Schutzmaßnahmen ergriffen werden, um die Auswirkungen einer möglichen Staubexplosion auf ein ungefährliches Maß zu begrenzen [1; 2]. Prinzipiell stehen hier die Explosionsdruckentlastung oder die Explosionsunterdrückung zur Verfügung, die mit Maßnahmen für die

explosionstechnische Entkopplung flankiert werden müssen.

Becherelevatoren unterscheiden sich geometrisch von Behältern, Silos, Filteranlagen oder anderen Apparaten aufgrund der langgestreckten Elevatorschächte. Diese und das Becherwerk besitzen einen starken Einfluss auf die Flammenfortpflanzung und den Explosionsdruckverlauf. Die bisher vorhandenen Kenntnisse und Regelwerke zur Auslegung der konstruktiven Explosionsschutzmaßnahmen können daher nicht auf Becherelevatoren angewendet werden.

Die Forschungsgesellschaft für angewandte Systemsicherheit und Arbeitsmedizin (FSA) hat mit maßgeblicher Unterstützung von der Berufsgenossenschaft Nahrungsmittel und Gastgewerbe (BGN), Berufsgenossenschaft Rohstoffe und chemische Industrie (BGRCI) und Herstellern von Elevatoren und Schutz-



Bild 1 Malzstaubexplosion in einem druckentlasteten Becherelevator auf dem Versuchsgelände der BGN/FSA mit Explosionsübertragung in die Entstaubungsanlage [3].

systemen entsprechende Forschungsprojekte [3; 4] zur Klärung offener Fragestellungen durchgeführt.

Kenntnisstand und Zielsetzung

Aus Explosionsversuchen in Becherelevatoren (Bild 1) ist bekannt, dass aufgrund der hohen Staubkonzentrationen bei voller Beladung mit brennbaren Stäuben nur geringe Explosionsüberdrücke unterhalb von 0,3 bar zu erwarten sind [3; 5; 6]. Sehr kritisch einzuschätzen ist dagegen der sog. „Leerlaufbetrieb“, in dem lediglich die Staubablagerungen durch das laufende Becherwerk aufgewirbelt werden. Unter diesen Betriebsbedingungen muss in Abhängigkeit der Eigenschaften des Staub/Luft-Gemischs mit hohen Flammengeschwindigkeiten und Explosionsdrücken gerechnet werden.

Aus Untersuchungen von *Bartknecht* [7] resultierte die Forderung, dass durch Löschmittelsperren geschützten Elevatoren eine Explosionsfestigkeit von 3 bar Überdruck besitzen müssen, wenn Stäube der Staubexplosionsklasse St1 ($K_{st} \leq 200 \text{ bar}\cdot\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$) gefördert werden. Die Erstellung der Staub/Luft-Gemische erfolgte in seinen Untersuchungen durch

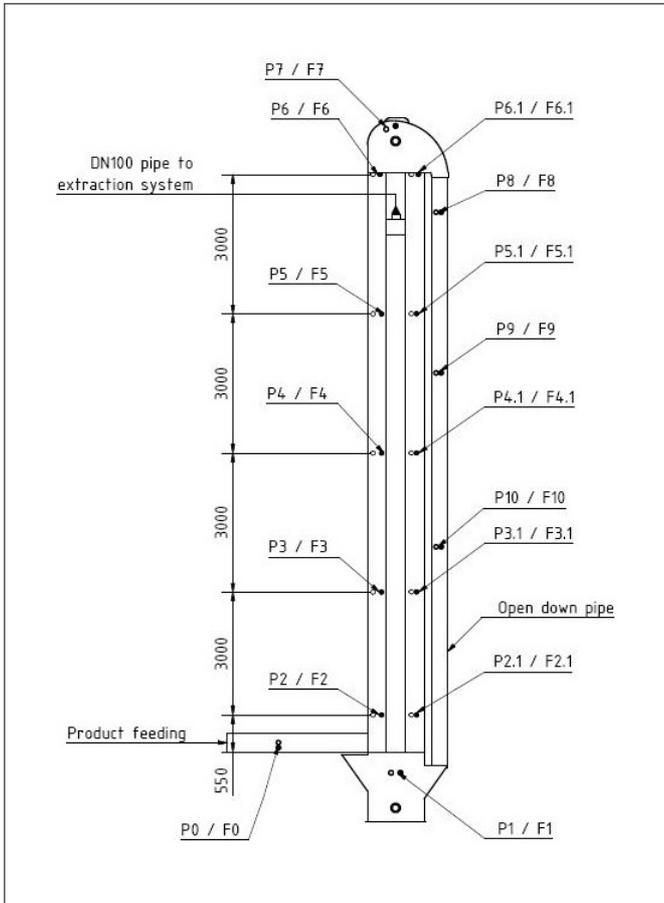


Bild 2 Prinzipbild des verwendeten Becherelevators mit Fallrohr für Kreislaufbetrieb und Angabe der Messstellen. P – Druckaufnehmer; F – Flammenmelder



Bild 3 Eingerüsteter Becherelevator auf dem Versuchsfeld der BGN/FSA in Kappelrodeck.

Dispergierung aus unter Überdruck stehenden Staubvorratsbehältern.

Der Einfluss des Becherabstands auf den Explosionsverlauf wurde von *Holbrow* und *Lunn* [5] untersucht. Sie machten die Beobachtung, dass eine Reduzierung des Becherabstands zu stärkerer Turbulenzanregung und damit zu höheren Flammengeschwindigkeiten und Drücken führen kann, wenn es sich um Stäube mit einem K_{St} -Wert größer als $200 \text{ bar}\cdot\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ handelt. Im Falle geringerer K_{St} -Werte hingegen war bei Verkürzung der Becherabstände eine Abnahme der Flammengeschwindigkeiten und Drücke festzustellen. Betragen die Becherabstände weniger als 280 mm, so war unabhängig vom K_{St} -Wert kein Einfluss mehr auf die Höhe der Explosionsdrücke zu erkennen.

Das vorliegende Projekt verfolgt das Ziel, die Auslegung von Explosionsunterdrückungssystemen und Löschmittelsperren hinsichtlich ihrer Effizienz zu

optimieren. Hierfür wurden auf der Versuchsanlage der BGN und FSA in Kappelrodeck praxisnahe Großversuche durchgeführt [4].¹⁾

Versuchsaufbau und -durchführung

Für die Großversuche wurde ein Becherelevator mit Metallbechern und rechteckigem Förder- und Rücklaufschacht mit folgenden technischen Daten eingesetzt:

Gesamtlänge: 15 125 mm
 Schachtabmessung: 270 mm x 390 mm
 Becherabmessung: 165 mm x 280 mm
 Becherabstand: 130 mm
 Wandabstand vorne/seitlich/hinten: 60 mm/55 mm/45 mm
 freie Querschnittsfläche: 54 %
 Förderleistung: $\approx 150 \text{ t/h}$ Getreide
 Fördergeschwindigkeit: 3,5 m/s

Im Hinblick auf die Flammenfortpflanzung spielt die Versperrung der Elevatorschächte durch das Becherwerk und somit die verbleibende freie Querschnittsfläche eine wichtige Rolle. Für die Versuche wurde ein Elevatortyp moderner Bauart mit hoher Becherbelegung (Becherabstand 130 mm) und mit allsei-

tigen Wandabständen $< 70 \text{ mm}$ gewählt, was dem heutigen Stand der Technik entspricht.

Bild 2 zeigt das Prinzipbild des verwendeten Becherelevators. Am Elevatorfuß, -kopf und entlang der Elevatorschächte wurden in definierten Abständen piezoelektrische Druckaufnehmer und Flammenmelder installiert. So konnten die Explosionsdruckverläufe gemessen und die Flammenfortpflanzung verfolgt werden.

Der Becherelevator wurde am Elevatorfuß und -kopf mit Löschmittelbehältern zur Explosionsunterdrückung und in den Elevatorschächten in definiertem Abstand unterhalb des Elevatorkopfes und oberhalb des Elevatorfußes mit Löschmittelsperren ausgerüstet. In **Bild 3** ist der eingerüstete Becherelevator auf der Versuchsanlage und in **Bild 4** das Becherwerk des Elevators zu sehen.

Der Becherelevator wurde zunächst mit voller Beladung betrieben, danach entleert und erneut angefahren. Die im Leerlaufbetrieb aufgewirbelten Staubablagerungen wurden mithilfe pyrotechnischer Zünder (Zündenergie 1 und 5 kJ)

¹⁾ Detaillierte Informationen stehen auf der Website der FSA (www.fsa.de) kostenlos zum Download zur Verfügung.



Bild 4 Becherwerk des für die Versuche verwendeten Elevators.

entweder im Elevatorfuß, -kopf oder -schacht entzündet. Diese Vorgehensweise zur Erstellung realistischer Staub/Luft-Gemische wurde zuvor optimiert und erbrachte gut reproduzierbare Ergebnisse.

Die Mehrzahl der Versuche wurde mit Zündortlage „Elevatorfuß“ durchgeführt, bei der i. Allg. die höchsten Explosionsdrücke auftraten.

Die explosionstechnischen Kenngrößen der für die Untersuchungen verwendeten Stäube können **Tabelle 1** entnommen werden. Die Versuche wurden überwiegend mit Malzstaub durchgeführt, der aufgrund seiner Eigenschaften einen Großteil der in Becherelevatoren geförderten Stäube hinsichtlich der Brand- und Explosionskenngrößen abdeckt.

Es wurden Explosionsunterdrückungssysteme und Löschmittelsperren verschiedener Hersteller eingesetzt. Als Löschmittelpulver diente Natriumbicarbonat. Für die Auslösung der Schutzsys-

teme wurden Druckdetektoren oder Flammenmelder verwendet. Die Aktivierung mithilfe von Druckdetektoren erfolgte nach Überschreitung einer definierten Druckschwelle (statische Druckdetektion) oder nach Überschreitung eines definierten zeitlichen Druckanstiegs $\Delta p/\Delta t$ (dynamische Druckdetektion).

Versuchsergebnisse

Die Löschmittelmengen betragen zwischen 2,5 und 4 kg je Löschmittelbehälter. Innerhalb dieses Bereichs konnten jedoch keine relevanten Unterschiede bezüglich der Wirksamkeit festgestellt werden.

Die im Elevatorkopf und -fuß installierten Löschmittelbehälter für die Explosionsunterdrückung und die Löschmittelsperren in den Elevatorschächten wurden zunächst mithilfe von Druckdetektions-

systemen ausgelöst. Erfolgte die Aktivierung der Löschmittelbehälter (Ausgangssignal der Meldezentrale) bei einem Explosionsüberdruck im Bereich von 100 bis 110 mbar, so hatten sich die Explosionsflammen zu diesem Zeitpunkt bereits bis zu 5,5 m in den Förder- und Rücklaufschacht fortgepflanzt. Die Löschmittelsperren, die sich in einem Einbauabstand von 6 m oberhalb des Elevatorfußes bzw. unterhalb des Elevatorkopfes befanden, wurden von den Explosionsflammen überlaufen. In Verbindung mit Malzstaub ($K_{St} \approx 150 \text{ bar} \cdot \text{m} \cdot \text{s}^{-1}$) wurden dabei Explosionsüberdrücke bis zu 2,4 bar erreicht. Der Einbauabstand der Löschmittelsperren hätte auf 8 m vergrößert werden müssen. Für diesen Fall konnte jedoch noch immer ein zu erwartender maximaler reduzierter Explosionsüberdruck von $p_{red} = 1,5 \text{ bar}$ abgeschätzt werden.

Die Messsignale zeigten, dass eine Flammenfortpflanzung in die Elevator-

schächte hinein bereits vor einem messbaren Druckanstieg im Elevatorfuß oder -kopf erfolgen kann. Diese Beobachtung kann phänomenologisch dadurch erklärt werden, dass ein rasches Durchzünden der gesamten Staubwolke im Elevatorfuß oder -kopf durch das laufende Becherwerk behindert wird. Die Ursache ist in der räumlichen Versperrung und im Entzug von Verbrennungswärme durch die Metallbecher zu suchen. Andererseits können sich Explosionsflammen partiell entzündeter Teilvolumina bereits in die Elevatorschächte hinein fortpflanzen.

Ein Blick auf die zeitlichen Druckverläufe zweier Explosionsversuche, die beispielhaft in **Bild 5** zu sehen sind, verdeutlicht das zuvor beschriebene Phänomen. Am Beispiel von unter gleichen Bedingungen durchgeführten Versuchen (Versuche Nr. C10 und D7) sind in **Bild 5** oben die Explosionsdruckverläufe von Messstelle p1 im Elevatorfuß und darunter von Messstelle p3 im Förderschacht (3 m über dem Elevatorfuß) zu sehen. In **Bild 5** unten werden die Signale der Flammenmelder F3 gezeigt, die parallel zur Druckmessstelle p3 (3 m über dem Elevatorfuß) installiert waren.

Aus dem zeitlichen Ablauf von Versuch C10 kann man entnehmen, dass sich die Explosionsflamme bereits ca. 200 ms vor einem erkennbaren Druckanstieg im Elevatorfuß an der Messstelle F3 befindet, d. h. die Flamme konnte sich bis zu diesem frühen Zeitpunkt bereits 3 m in den Elevatorschacht hinein fortpflanzen. Im Versuch D7 ist diese Zeitspanne zwar deutlich geringer, beträgt jedoch auch in diesem Falle ca. 50 bis 100 ms.

Wurden die Einstellungen der Druckdetektionssysteme so gewählt, dass die Aktivierung bei einem Explosionsüberdruck $\leq 80 \text{ mbar}$ erfolgte, so wurde ein maximaler reduzierter Explosionsüberdruck von $p_{red, max} = 1 \text{ bar}$ gemessen.

Nach weiterem Absenken der Auslöseschwelle, sodass die Aktivierung bei einem Explosionsüberdruck $\leq 30 \text{ mbar}$ erfolgte, sank der maximale Explosionsüberdruck im Becherelevator auf $p_{red, max} = 0,58 \text{ bar}$ ab. Die Löschmittelsperre wurde hierbei in einem Einbauabstand von 5 m installiert.

Für diesen Fall ist jedoch anzumerken, dass ein Druckdetektionssystem im Praxisbetrieb nur dann auf so niedrige Ansprechdrücke eingestellt werden kann, wenn es zur Vermeidung von Fehlauslösungen über eine entsprechende Störsicherheit gegenüber mechanischen Schwingungen und Stößen verfügt.

Tabelle 1 Explosionskenngrößen der verwendeten Schüttgüter (genormte Prüfmuster). P_{max} : maximaler Explosionsüberdruck, K_{St} : staubspezifische Kenngröße, UEG: untere Explosionsgrenze, MZE: Mindestzündenergie (bestimmt mit Induktivität im Entladekreis), MZT: Mindestzündtemperatur einer Staubwolke, S_N : mittlere Staubungszahl [8]

Schüttgut	P_{max} in bar	K_{St} in bar · m · s ⁻¹	UEG in g/m ³	MZE in mJ	MZT in °C	S_N
Weizenmehl Typ 550	6,8	109	60	> 10 bis ≤ 50	380	0,6
Malzstaub	8,4	159	60	> 5 bis ≤ 10	370	13,2
Maisstärke	8,7	204	60	> 4 bis ≤ 5	380	10,2

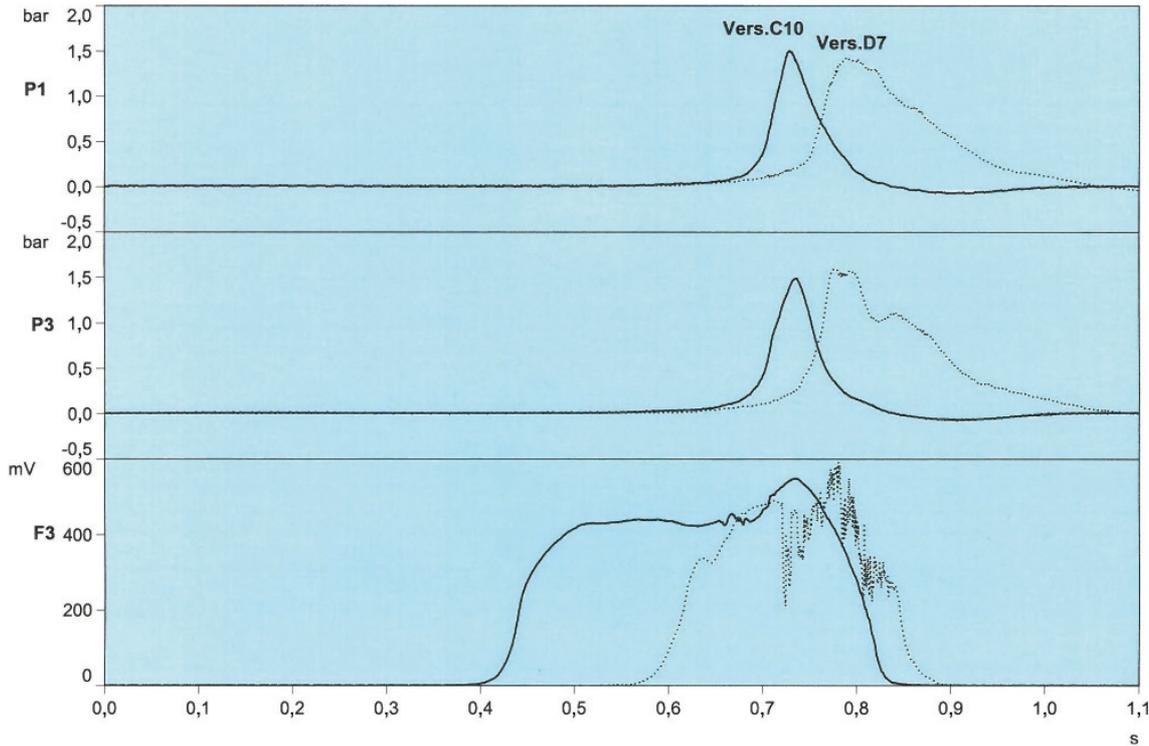


Bild 5 Zeitliche Explosionsdruckverläufe zweier unter gleichen Bedingungen durchgeführter Versuche mit Malzstaub, Zündortlage im Elevatorfuß, Zündzeitpunkt $t = 0$ s; Bild oben: Explosionsdruckverläufe im Elevatorfuß; Bild Mitte: Explosionsdruckverläufe im Elevatorschacht, 3 m über dem Fuß; Bild unten: Signale der Flammenmelder im Elevatorschacht, 3 m über dem Fuß.

Optimale Ergebnisse konnten mithilfe von Flammenmeldern erzielt werden, die am Elevatorschacht im Nahbereich des Elevatorfußes und -kopfs installiert waren. Die Auslösung der Löschmittelbehälter des Explosionsunterdrückungssystems erfolgte in diesem Falle so frühzeitig, dass keine Flammenfortpflanzung in die Elevatorschächte hinein zu beobachten war. Der reduzierte Explosionsüberdruck erreichte in diesem Fall lediglich $p_{red, max} \approx 0,1$ bar.

Ein Nachteil der Flammendetektion be-

steht darin, dass eine Entzündung im Elevatorschacht nicht sicher erkannt wird, wenn der Abstand zwischen Flammenmelder und Zündort mehr als drei Becher beträgt. Diese Zündortlage wird jedoch als unwahrscheinlich betrachtet, speziell wenn eine Schiefelaufüberwachung installiert und die Gurtspannung überwacht wird.

Schlussfolgerungen für die Praxis

Aus den Versuchsergebnissen lassen sich orientierende Angaben für die Einbauabstände der Löschmittelsperren in den

Elevatorschächten und zu den Festigkeitsanforderungen an Becherelevatoren ableiten. In Tabelle 2 werden entsprechende Angaben in Abhängigkeit des Druckbereichs gemacht, innerhalb dem die Aktivierung der Löschmittelbehälter mithilfe von Druckdetektoren erfolgt. Darüber hinaus werden Angaben bei Verwendung von Flammenmeldern gemacht. Es sei darauf hingewiesen, dass die Anforderung an die Explosionsfestigkeit der Elevatorschächte zwischen den Einbauorten der Löschmittelsperren reduziert werden kann (siehe P_{a2} in Tabelle 2 und Bild 6).

Sofern die o. g. 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 der Flammengeschwindigkeiten beim Austritt aus dem Elevatorfuß oder -kopf in die Elevatorschächte hinein zu erwarten, weil sich zu diesem Zeitpunkt noch kein ausreichender Explosionsdruck entwickelt hat, damit eine flammenbeschleunigende Expansionsströmung wirksam wird.

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

Die in Tabelle 2 gemachten Angaben können unter folgenden Bedingungen angewandt werden:

Tabelle 2 Orientierende Festigkeitsanforderungen für Becherelevatoren in Verbindung mit Explosionsunterdrückung/Löschmittelsperren und orientierende Angaben zum Einbauabstand der Löschmittelsperre (s. a. Bild 6).

Detektion	Einbauabstand l in m	Mindestauslegungsüberdruck p_{a1} in bar	Mindestauslegungsüberdruck p_{a2} in bar
Druckdetektion: Explosionsüberdruck zum Zeitpunkt der Aktivierung der Löschmittelbehälter: $80 < p_{act} \leq 110$ mbar	8	1,5	1,2
Druckdetektion: Explosionsüberdruck zum Zeitpunkt der Aktivierung der Löschmittelbehälter: $30 < p_{act} \leq 80$ mbar	6	1,0	0,7
Druckdetektion: Explosionsüberdruck zum Zeitpunkt der Aktivierung der Löschmittelbehälter: $p_{act} \leq 30$ mbar	5	0,7	0,4
Flammendetektion	1,5	0,3	0,2

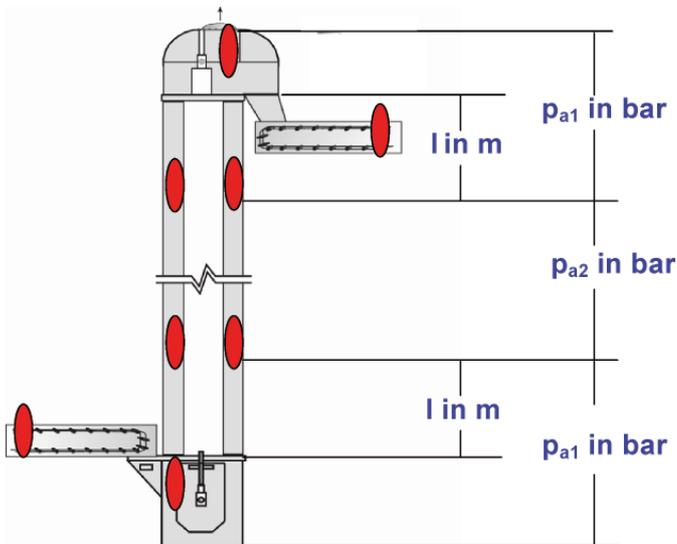


Bild 6 Orientierende Festigkeitsanforderungen für Becherelevatoren in Verbindung mit Explosionsunterdrückung/Löschmittelsperren und orientierende Angaben zum Einbauabstand der Löschmittelsperre (siehe Tabelle 2).

Literaturverzeichnis

- [1] VDI 2263 Blatt 8: Staubbrände und Staubexplosionen; Gefahren, Beurteilung, Schutzmaßnahmen; Brand- und Explosionsschutz an Elevatoren. Berlin: Beuth Verlag 2008.
- [2] VDI 2263 Blatt 8.1: Staubbrände und Staubexplosionen; Gefahren, Beurteilung, Schutzmaßnahmen; Brand- und Explosionsschutz an Elevatoren; Beispiele. Berlin: Beuth Verlag 2011.
- [3] Roser, M.; Vogl, A.; Radandt, S.: Konstruktiver Explosionsschutz für Elevatoren. Forschungsprojekt F-05-0701. Forschungsgesellschaft für angewandte Systemsicherheit und Arbeitsmedizin (FSA). Mannheim 2010.
- [4] Roser, M.; Vogl, A.; Radandt, S.: Optimierung des konstruktiven Explosionsschutzes an Becherelevatoren, Teil 1: Druckstoßfeste Bauweise in Verbindung mit Explosionsunterdrückung und Löschmittelsperren. Forschungsprojekt G-05-0801. Forschungsgesellschaft für angewandte Systemsicherheit und Arbeitsmedizin (FSA). Mannheim 2010.
- [5] Holbrow, P.; Lunn, G. A.: Explosion Venting of Bucket Elevators, Stage 2: Final Report (EC/01/50). Health and Safety Laboratory, Buxton 2001.
- [6] Vogl, A.; Radandt, S.: Explosionstechnische Untersuchungen für den konstruktiven Explosionsschutz von Elevatoren. VDI-Berichte Nr. 2024, S. 249-266. Düsseldorf: VDI Verlag 2008.
- [7] Bartknecht, W.: Explosionsschutz: Grundlagen und Anwendung. Berlin: Springer Verlag 1993.
- [8] VDI 2263 Blatt 9: Staubbrände und Staubexplosionen; Gefahren, Beurteilungen, Schutzmaßnahmen; Bestimmung des Staubungsverhaltens von Schüttgütern, Berlin: Beuth Verlag 2008,

- Stäube mit $p_{\max} \leq 9$ bar;
 - $K_{St} \leq 150 \text{ bar} \cdot \text{m} \cdot \text{s}^{-1}$;
 - Becherelevator mit rechteckigen Elevatorschächten;
 - Metallbecher;
 - allseitige Wandabstände der Becher ≤ 70 mm;
 - Becherabstände ≤ 280 mm.
- Herstellerspezifische Abweichungen von diesen orientierenden Angaben sind

möglich, wenn entsprechende Nachweise oder Erkenntnisse vorliegen.

Für die Erzielung einer optimalen Funktionssicherheit des Schutzsystems wird eine Kombination von Druck- und Flammendetektion empfohlen. TS 161



Dr.-Ing. **Albrecht Vogl**, Berufsgenossenschaft Nahrungsmittel und Gastgewerbe (BGN), Mannheim und Forschungsgesellschaft für angewandte Systemsicherheit und Arbeitsmedizin (FSA).
 Prof. Dr.-Ing. **Siegfried Radandt**, Forschungsgesellschaft für angewandte Systemsicherheit und Arbeitsmedizin (FSA), Brühl.