

# Neue Erkenntnisse über Entlastungsschote für die explosionstechnische Entkopplung

Albrecht Vogl, Mannheim, Peter Schepp, Kappelrodeck, Siegfried Radandt, Brühl

Entlastungsschote sind einfache mechanische Schutzsysteme, die eine mögliche Flammen- und Druckwellenfortpflanzung durch Rohrleitungen verhindern oder zumindest auf ein ungefährliches Maß reduzieren sollen. Aufgrund der preiswerten Bauweise fanden Entlastungsschote, auch Bersttöpfe genannt, eine rasche Verbreitung im Anlagenbau. Speziell in Entstaubungs- und Aspirationsanlagen werden sie vielfach zum Schutz der Filter eingebaut, obwohl zahlreiche Fragen zur Installation und Wirksamkeit im spekulativen Bereich angesiedelt waren. In jüngster Zeit wurden unter Berücksichtigung des vorhandenen Wissens zahlreiche Großversuche zur Klärung offener Fragen durchgeführt [1]. Darauf aufbauende Versuche zur Untersuchung zulässiger Einbauabstände zwischen Entlastungsschlot und nachfolgender Anlagenkomponente werden mit einer zusammenfassenden Darstellung des aktuellen Kenntnisstands über diese Schutzsysteme nachfolgend beschrieben.

Unter einem Entlastungsschlot (Bersttopf) versteht man ein Schutzsystem, das die Auswirkungen einer Explosionsübertragung durch Rohrleitungen auf ein ungefährliches Maß begrenzen soll. Es besteht im Wesentlichen aus Rohrelementen, die im Prinzip entsprechend der Darstellung in **Bild 1** (links) zusammengefügt sind. Das im Durchmesser erweiterte Rohrelement, in welches die ankommende Rohrleitung einmündet, ist auf der Oberseite mit einer Druckentlastungseinrichtung gegenüber dem atmosphärischen Druck verschlossen. In **Bild 1** (rechts) wird beispielhaft die praktische Realisierung eines Entlastungsschlots gezeigt.

Das Funktionsprinzip des Entlastungsschlots beruht auf einer Explosionsdruckentlastung bei gleichzeitiger 180°-Umlenkung der Rohrströmung. Die Druckwellen, die der Flammenfront voraus laufen, aktivieren die Druckentlastungseinrichtung und können sich in die freie Atmosphäre entspannen. Die nachfolgende Flamme kann sodann in axialer Richtung aus dem geöffneten Entlastungsschlot austreten und die gleichzeitige 180°-Umlenkung der Rohrströmung soll die weitere Flammenübertragung verhindern.

Entlastungsschote wurden erstmals in den 1980er Jahren in der Literatur beschrieben [2]. Sie eignen sich insbesondere für den Einbau in Rohrleitungen von Entstaubungs- und Aspirationsanlagen.

Um offene Fragen im Hinblick auf die Wirksamkeit dieser Schutzsysteme zu klären, wurden unter Berücksichtigung vorhandener Kenntnisse [2 bis 11] weiterführende Untersuchungen auf experimenteller Basis durchgeführt [1].

## Aktueller Kenntnisstand über Entlastungsschote

Aufgabe eines Entlastungsschlots ist die explosionstechnische Entkopplung von



Anlagenkomponenten. Hierbei muss zwischen den Explosionsrichtungen **in** und **gegen** die Strömungsrichtung innerhalb der Rohrleitung unterschieden werden.

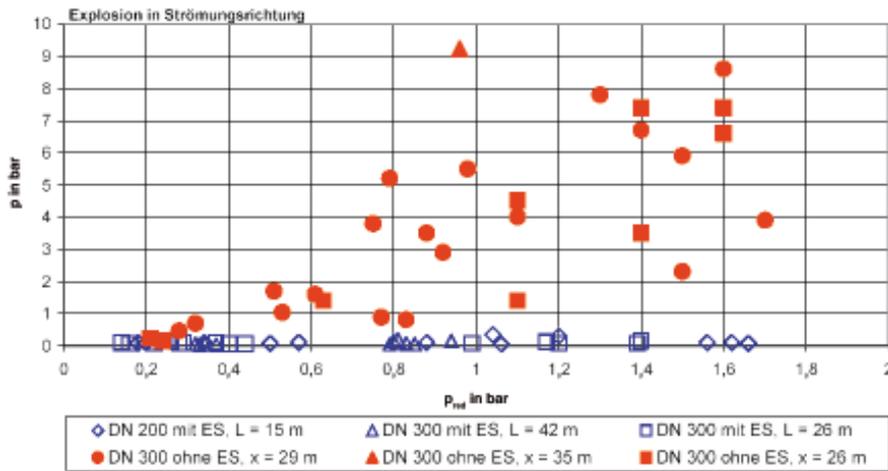
## Explosionsübertragung in Strömungsrichtung

Experimentelle Untersuchungen [1] haben eindeutig gezeigt, dass Entlastungsschote in Strömungsrichtung keine sichere Entkopplung darstellen. Die Übertragung gefährlicher Druckwellen wird aufgrund der Druckentlastung zwar sicher vermieden, mit Flammenübertragung über den Entlastungsschlot hinaus muss jedoch gerechnet werden. Allerdings wird die Wahrscheinlichkeit einer Flammenübertragung durch die Wirkung des Entlastungsschlots deutlich reduziert, insbesondere wenn es sich um heftige Explosionsabläufe handelt.

Ereignet sich aber dennoch eine Flammenübertragung, so wird durch den Entlastungsschlot zumindest eine gefährliche sog. „Flammenstrahlzündung“ sicher vermieden, die aufgrund von Vorkompressions- und Turbulenzeffekten zu außerordentlich hohen Explosionsdrücken in nachfolgenden Anlagenkomponenten führen kann (**Bild 2**).



**Bild 1** Prinzipbild eines Entlastungsschlots (links) und praktische Realisierung (rechts).



**Bild 2** Reduktion des maximalen Überdrucks in der Rohrleitung aufgrund der Entlastungswirkung des Entlastungsschlots (ES).

Der Entlastungsschlot ermöglicht es somit, die angeschlossenen Anlagenkomponenten selbst im Falle einer Flammenübertragung auf der Basis anerkannter Berechnungsgrundlagen zu schützen, z. B. durch Anwendung der „Explosionsdruckentlastung“ [12].

### Explosionsübertragung gegen die Strömungsrichtung

Auch entgegen der Strömungsrichtung stellt ein Entlastungsschlot nicht unter allen Betriebsbedingungen eine sichere Entkopplung gegenüber Flammenübertragung dar. Ist die Staubbelastung der Luftströmung in der Rohrleitung jedoch gering, d. h. kleiner als 50 % der unteren Explosionsgrenze des betreffenden Staubs, und beträgt die Rohrleitungslänge „stromaufwärts“ mehr als 15 m, so kann von einer sicheren Entkopplung gegen die Strömungsrichtung ausgegangen werden [1].

### Konstruktive Merkmale von Entlastungsschloten

**Umlenkung der Rohrströmung:** Ein sehr wichtiges konstruktives Merkmal besteht in der 180°-Umlenkung der Rohrströmung in Verbindung mit Explosionsdruckentlastung, durch die die Wahrscheinlichkeit einer weiteren Flammenübertragung zumindest stark eingeschränkt wird. Experimentelle Untersuchungen haben gezeigt, dass die Übertragungswahrscheinlichkeit bei einer Reduzierung des Umlenkungswinkels auf 110° bereits stark zunimmt und die Flammengeschwindigkeit nach dem Entlastungsschlot wesentlich höher ist als im Falle der 180°-Umlenkung [10]. Die Explosionsdrücke in nachfolgenden Anlagenkomponenten können unter diesen Umständen bereits die maximal zulässigen Werte überschreiten. Der Trend setzt sich in starkem Maße fort, wenn die Umlenkung lediglich noch 45° beträgt.

**Schlotgeometrie:** Aufgrund der 180°-Umlenkung muss die ankommende Rohrleitung (Eintrittsrohr) in eine Rohrerweiterung hineingeführt werden (Bild 1 links). Die Luft durchströmt dabei die Querschnittsfläche  $A_1$  des Eintrittsrohrs, eine zylindrische Fläche  $A_2$ , die sich aus dem Durchmesser dieses Rohrs und dem Abstand  $H$  zwischen der Rohrmündung und der Druckentlastungsfläche errechnet und sodann die Fläche  $A_3$  des Kreisrings zwischen Eintrittsrohr (inneres Rohr) und Rohrerweiterung. Im Idealfall werden die Flächen zu  $A_1 = A_2 = A_3$  gewählt. Aus strömungsmechanischer Sicht ist es jedoch ratsam, die Flächen in Reihenfolge der Durchströmung jeweils größer zu wählen. Der Abstand zwischen der Mündung des Eintrittsrohrs und der Entlastungsfläche beträgt typischerweise  $H = 0,5 \cdot D$  (mit  $D$  = Durchmesser des Eintrittsrohrs) [2]. Mit dieser Geometrie wurden auch die weitaus meisten experimentellen Versuche durchgeführt [1].

**Druckentlastungseinrichtung:** Von ganz entscheidender Bedeutung für die Wirksamkeit eines Entlastungsschlots ist das Ansprechverhalten der verwendeten Entlastungseinrichtung. Dabei ist zu berücksichtigen, dass Druckentlastungseinrichtungen mit einem statisch geprüften Ansprechdruck von 0,1 bar auf einem Entlastungsschlot ein gänzlich anders Ansprechverhalten aufweisen können als auf einem großvolumigen Behälter. Der Grund dafür liegt in der wesentlich höheren lokalen Druckanstiegsgeschwindigkeit vor der Entlastungseinrichtung, die durchaus Werte bis zu mehreren 1 000 bar·m·s<sup>-1</sup> erreichen kann.

An die mechanische Festigkeit sind daher wesentlich höhere Anforderungen zu stellen, als an Druckentlastungseinrichtungen für Behälter. Der statische Ansprechdruck der Druckentlastungseinrichtungen sollte ferner einen Wert von

100 mbar nicht übersteigen; empfehlenswert ist ein statischer Ansprechdruck im Bereich von 50 bis 70 mbar, um den negativen Einflüssen der Massenträgheit in Bezug auf die Entlastungsfähigkeit entgegenzuwirken.

Eine EG-Baumusterprüfung von Entlastungseinrichtungen für diesen speziellen Anwendungsfall ist erforderlich [13] (alternativ: Installation eines geeigneten „Fangkorbs“ für abreißende Teile der Entlastungseinrichtung).

### Zulässige Einbaudistanzen und Installationshinweise

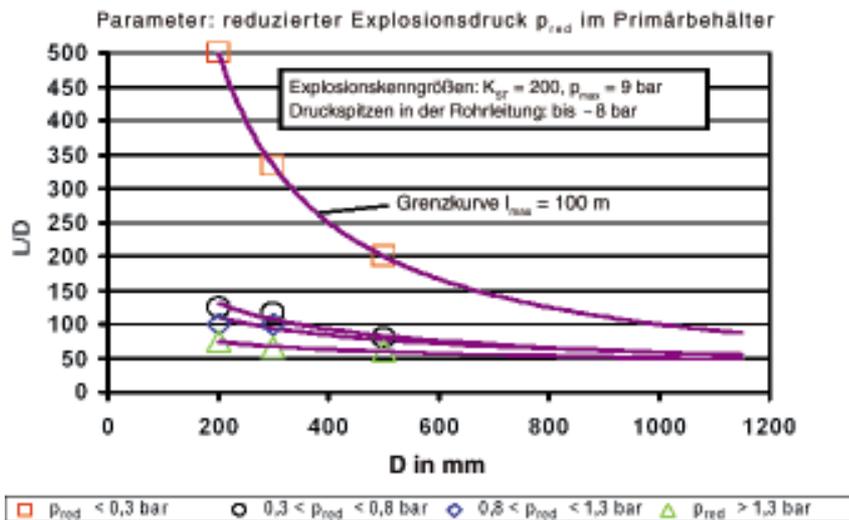
Die Festlegung der zulässigen Einbaudistanzen für Entlastungsschloten ist nicht allgemeingültig möglich. Eine Vielzahl von Parametern beeinflussen den Explosionsverlauf in der Rohrleitung, sie müssen deshalb bei der Auswahl des geeigneten Einbauorts berücksichtigt werden:

- Volumen der Komponente, in der die Explosion stattfindet,
- Durchmesser der Rohrleitung,
- staubspezifische Explosionskenngrößen ( $K_{St}$ -Wert,  $p_{max}$ ),
- Staubkonzentration in der Rohrleitung (hier ist nicht die auslegungsgemäße Staubkonzentration allein ausschlaggebend, sondern auch Staubablagerungen in Rohrleitungskrümmern, Verzweigungen, Absperreinrichtungen o. ä. beeinflussen im Falle einer Explosion die Staubkonzentration in der Rohrleitung),
- maximaler reduzierter Explosionsdruck derjenigen Komponente, in welcher die Explosion entsteht,
- maximale Druckstoßfestigkeit der Rohrleitung (unter Berücksichtigung der Verbindungselemente und der Leitungsgeometrie),
- Ansprechdruck der Entlastungseinrichtung des Schlots.

### Einbaudistanz zwischen Primärbehälter und Entlastungsschlot

**Bild 3** zeigt beispielhaft die zulässigen Einbaudistanzen stromab des Primärbehälters für Stäube bis  $K_{St} = 200 \text{ bar m s}^{-1}$  und  $p_{max} \leq 9 \text{ bar}$  sowie eine Druckstoßfestigkeit der Rohrleitung von  $p_R \leq 8 \text{ bar}$ . Aufgetragen ist das maximal zulässige Verhältnis  $L/D$  ( $L$  = Rohrleitungslänge vor dem Entlastungsschlot,  $D$  = Rohrleitungsdurchmesser) über dem Rohrleitungsdurchmesser  $D$ .

Für diese Darstellung wurden die Ergebnisse von mehr als 150 Versuchen herangezogen. In vier unterschiedlichen Druckklassen ( $p_{red} \leq 0,3 \text{ bar}$ ,  $0,3 \text{ bar} < p_{red} \leq 0,8 \text{ bar}$ ,  $0,8 \text{ bar} < p_{red} \leq 1,3 \text{ bar}$ ,  $p_{red} > 1,3 \text{ bar}$ ) und für vier unterschiedliche Rohrleitungsdurch-



**Bild 3** Zulässige Einbauabstände für Entlastungsschote (Beispiel).

messer (DN 100, DN 200, DN 300, DN 500) wurden diejenigen Versuche ausgewählt, bei denen die maximalen Drücke in der Rohrleitung aufgetreten waren. Die jeweiligen Druckverläufe wurden auf den maximal zulässigen Rohrleitungsdruck (im vorliegenden Beispiel 8 bar) extrapoliert und die damit verknüpfte Rohrleitungslänge ermittelt. Die Kurven  $L/D$  über  $D$  wurden aufgetragen und zu größeren Durchmessern hin extrapoliert. Als maximal zulässige Länge wurde  $L = 100$  m für alle Durchmesser festgelegt.

Die Ergebnisse lassen für die bei den berücksichtigten Versuchen vorliegenden Randbedingungen folgende Schlussfolgerungen zu:

- Für reduzierte Drücke im Explosionsbehälter  $p_{red} \leq 0,3$  bar tritt keine nennenswerte Beschleunigung der Flammenfront und damit auch kein signifikanter Druckanstieg entlang der Rohrleitung auf.
- Im Druckbereich zwischen 0,3 und 0,8 bar werden zwar höhere Drücke in der Rohrleitung erreicht, detonationsartige Explosionsverläufe wurden jedoch nicht beobachtet.
- Liegt der reduzierte Druck im Explosionsbehälter zwischen 0,8 und 1,3 bar können sowohl relativ schwache als auch sehr heftige Explosionsverläufe mit entsprechend hohen Druckspitzen in der Rohrleitung auftreten.
- Bei reduzierten Explosionsdrücken über 1,3 bar nimmt die Wahrscheinlichkeit für die Entstehung von Stoßwellen mit hohen Druckspitzen stark zu.

### Einbaudistanz zwischen Entlastungsschlot und Sekundärbehälter

Stand der Technik ist es, die Distanz zwischen dem Entlastungsschlot und der

nachfolgenden zu schützenden Anlagenkomponente so gering wie möglich zu halten; üblich sind Abstände von 3 bis 5 m. Diese Maßgabe resultiert aus der Vorstellung, dass es im Falle einer Flammenübertragung über den Schlot hinweg zu einer erneuten Beschleunigung der Flammenfront und somit zu einem Druckanstieg in der nachfolgenden Rohrleitung kommt. Berücksichtigt man jedoch Untersuchungen, die mit offenen Rohrleitungen unter Variation der Zündortlage durchgeführt wurden, so stellt man fest, dass bei Zündung eines Staub/Luftgemischs am offenen Rohrende keine nennenswerte Beschleunigung der Flammenfront und auch kein Druckanstieg beobachtet wurden. Es gibt für die Expansionsströmung keinen Grund, sich durch die enge Rohrleitung zu quälen, wenn sie doch bequem ins Freie abströmen kann. Einen ganz ähnlich gelagerten Fall stellt der Entlastungsschlot mit der nachfolgenden Rohrleitung dar: Ab dem Zeitpunkt, zu dem die Entlastungsfläche geöffnet ist, befindet sich hier das offene Ende der nachfolgenden Rohrleitung. Daraus wäre zu schließen, dass die Rohrleitungslänge stromab eines Entlastungsschlots nur dadurch begrenzt ist, dass auch in der nachfolgenden Anlagenkomponente eine Explosion auftreten könnte und somit die o. g. Ausführungen für die maximal zulässige Rohrleitungslänge vor einem Entlastungsschlot sinngemäß zur Anwendung kommen. Diese Erkenntnis ist von großer praktischer Bedeutung, würde sie doch entgegen bisheriger Annahmen bei Einsatz eines Entlastungsschlots die zulässige Rohrleitungslänge zwischen zwei zu schützenden Anlagenkomponenten nahezu verdoppeln. Diese Hypothese sollte durch eine weitere Versuchsreihe gestützt wer-

den, über deren Ergebnisse nachfolgend berichtet wird.

### Sonstige Installationshinweise

Entlastungsschote sind bevorzugt vertikal zu installieren, damit sich keine Staubablagerungen im Berststopf ausbilden. Sollte dies aus räumlichen Gründen nicht möglich sein, ist die Einbaulage des Entlastungsschlots in jedem Falle so zu wählen, dass keine Entstehung von Staubablagerungen möglich ist; ein Winkel von  $45^\circ$  aus der Vertikalen sollte dabei nicht überschritten werden. Selbstverständlich ist darauf zu achten, dass vom Entlastungsschlot selbst keine Gefährdung für Personal und Anlage beim Entlastungsvorgang ausgehen darf (Druck, austretende Flamme!).

Die Rohrleitungsführung, die Lage und Ausführung von Rohrleitungselementen und Armaturen (Krümmer, Diffusoren, Verzweigungen, Einbauten, Absperreinrichtungen,...) sowie der Betrieb der Anlage (Strömungsgeschwindigkeiten in der Rohrleitung, An- und Abfahrvorgänge) dürfen keine Ausbildung von Staubablagerungen zulassen, die die auslegungsgemäße Staubkonzentration in der Rohrleitung im Falle einer Explosion auf kritischere Werte anheben könnte.

Selbstverständlich müssen auch die verwendeten Rohrleitungen und Flanschverbindungen unter den vorliegenden Einbaubedingungen dem angestrebten Maximaldruck standhalten; hierbei ist insbesondere zu berücksichtigen, dass die durchlaufende Druckwelle Ausweichbewegungen der Rohrleitung verursachen kann, wenn diese nicht genügend fixiert ist und dass erhebliche Rückstoßkräfte im Rohrbogen vor dem Entlastungsschlot auftreten können.

### Neue Erkenntnisse über zulässige Einbaudistanzen zwischen Entlastungsschlot und nachfolgender Anlagenkomponente

Zuvor wurde die Hypothese aufgestellt, dass es möglich sein müsste, eine wesentlich größere maximal zulässige Einbaudistanz zwischen Entlastungsschlot und Sekundärbehälter zuzulassen als bislang üblich. Zur Untermauerung dieser These wurde eine Reihe von Versuchen im Großmaßstab unter praxisnahen Bedingungen durchgeführt, bei denen die Position des Entlastungsschlots relativ zu Primär- und Sekundärbehälter variiert wurde. Dabei wurde der schon aus früheren Untersuchungen bekannte Versuchsaufbau verwendet [1], wobei der Entlastungsschlot bei einer Versuchsreihe etwa in der Mitte

einer Rohrleitung DN 300 zwischen den beiden Explosionsbehältern installiert wurde ( $L_1 \approx 18\text{ m}$ ,  $L_2 \approx 22\text{ m}$ , Versuchsreihe A) und sich in einer zweiten Versuchsreihe nahe dem Primärbehälter und damit weit entfernt vom Sekundärbehälter befand ( $L_1 \approx 7\text{ m}$ ,  $L_2 \approx 34\text{ m}$ , Versuchsreihe B) (**Bild 4**).

**Versuchsdurchführung**

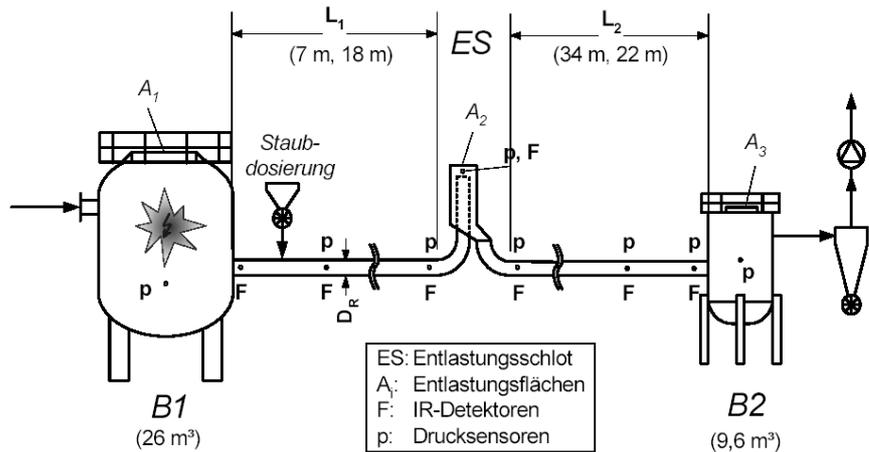
Die Versuchsdurchführung mit diesem Aufbau wurde bereits in [1] detailliert beschrieben, wir beschränken uns daher auf die Nennung der wesentlichen Versuchsparameter. Im primären Explosionsbehälter wurden homogen verteilte Staubkonzentrationen von 400 bzw. 500 g/m<sup>3</sup> erzeugt und mit pyrotechnischen Zündern zur Explosion gebracht. Mithilfe der unmittelbar stromab des Primärbehälters installierten Zellenradschleuse wurden Staubkonzentrationen zwischen 0 (in einem Falle) und 150 g/m<sup>3</sup> in der Rohrleitung DN 300 eingestellt. Mit beiden Installationsvarianten (Entlastungsschlot unmittelbar stromab Primärbehälter und in der Mitte zwischen Primär- und Sekundärbehälter) wurden jeweils elf Versuche bei unterschiedlichen Primärexplosionsdrücken und verschiedenen Staubkonzentrationen in der Rohrleitung durchgeführt (**Bild 5**).

**Ergebnisse der Versuchsreihe A**

Bei insgesamt elf Versuchen, bei denen der Entlastungsschlot ca. 18 m stromab des primären Explosionsbehälters und ca. 22 m stromauf des Sekundärbehälters montiert war, wurde in keinem Fall ein Druckanstieg oder eine Flammenbeschleunigung stromab des Entlastungsschlots beobachtet. Eine Flammenübertragung über den Schlot hinweg erfolgte nur bei zwei Versuchen, wobei die Flamme allerdings nur bei sieben Versuchen den Entlastungsschlot erreichte. Ein signifikanter Druckanstieg in der Rohrleitung vor dem Entlastungsschlot trat bei drei Versuchen auf, der höchste Druck wurde mit 4,9 bar unmittelbar vor Entlastungsschlot bei Versuch A7 erreicht. In **Bild 6** sind die mittleren Flammenfrontgeschwindigkeiten und lokalen maximalen Explosionsdrücke entlang der Rohrleitung am Beispiel einiger ausgewählter Versuche grafisch dargestellt.

**Ergebnisse der Versuchsreihe B**

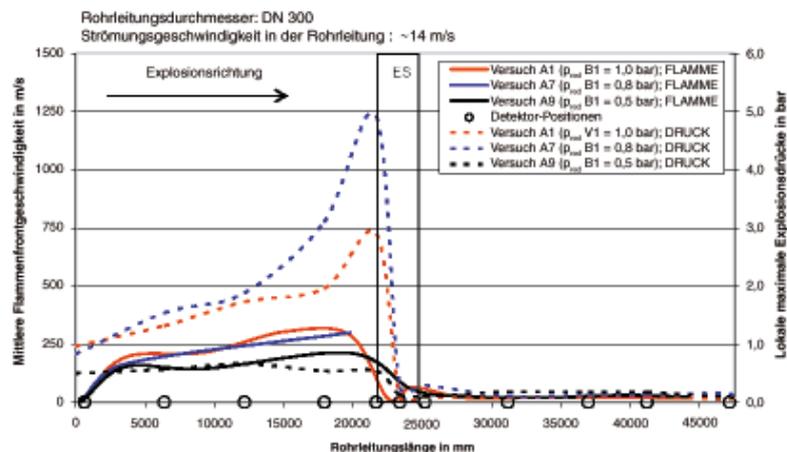
Die Installation des Entlastungsschlots ca. 7 m stromab des Primär- und damit ca. 34 m stromauf des Sekundärbehälters erbrachte folgende Ergebnisse: Obwohl die Flamme bei allen elf Versuchen den Schlot erreichte, kam es nur in einem Versuch zu



**Bild 4** Prinzipielle Darstellung des Versuchsaufbaus.



**Bild 5** Momentaufnahme eines Explosionsversuchs auf dem Versuchsgelände der BGN/IFA in Kappelrodeck. Auf dem Bild ist rechts noch die abklingende Flamme der Primärexplosion zu sehen, links daneben der Flammen- und Staubaustritt aus dem Entlastungsschlot.



**Bild 6** Ergebnisse einiger ausgewählter Versuche der Versuchsreihe A.

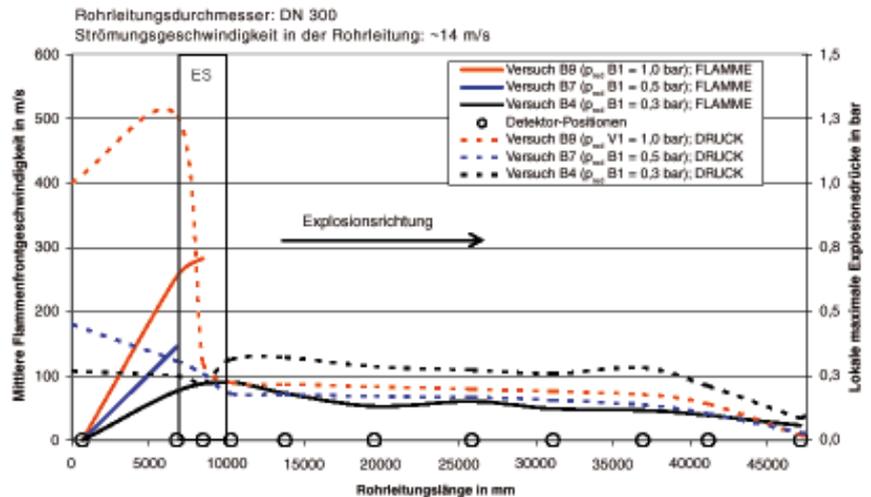
einer Flammenübertragung über den Entlastungsschlot hinweg. Ein nennenswerter Druckanstieg in der kurzen Rohrleitung bis zum Schlot trat nur bei einem Versuch auf. Auch in dieser Versuchsreihe wurden bei keinem Versuch ein Druckanstieg bzw. eine Flammenbeschleunigung stromab des Entlastungsschlots nachgewiesen. Die Ergebnisse ausgewählter Versuche sind in **Bild 7** grafisch aufbereitet.

## Zusammenfassung

In einer Reihe von 22 Explosionsversuchen im Großmaßstab unter praxisnahen Bedingungen wurden weitere Erkenntnisse zur maximal zulässigen Rohrleitungslänge zwischen einem Entlastungsschlot und der nachfolgenden zu schützenden Anlagenkomponente gewonnen. Folgende zusätzliche Aussagen zur Wirksamkeit von Entlastungsschlotten als Schutzmaßnahme lassen sich ableiten:

- Die bisher allgemein verbreitete Ansicht, dass die Distanz zwischen dem Entlastungsschlot und der nachfolgenden zu schützenden Anlagenkomponente so gering wie möglich zu halten ist (bisher üblich: 3 bis 5 m), konnte nicht bestätigt werden. Es wurde die Hypothese aufgestellt, dass eine Rohrleitung hinter einem Entlastungsschlot nach dem Ansprechen der Entlastungsfläche des Schlots wie eine durchströmte Rohrleitung betrachtet werden kann, bei der das darin befindliche explosive Staub/Luftgemisch am offenen Rohrleitungsende entzündet wird und dass deshalb stromab des Entlastungsschlots keine nennenswerte Beschleunigung der Flammenfront und auch kein Druckanstieg auftritt. Diese Hypothese wurde mit keinem der 22 Versuche widerlegt. In den Fällen, in denen eine Flammenübertragung über den Schlot hinweg stattgefunden hat, wies die Geschwindigkeit der Flammenfront stromab des Schlots einen näherungsweise linearen Verlauf auf

Dr.-Ing. **Albrecht Vogl**, Leiter Zentral-labor der Berufsgenossenschaft Nahrungsmittel und Gaststätten (BGN) und Leiter der Prüfstelle für Systemsicherheit (FSA), Mannheim.  
Dipl.-Ing. **Peter Schepp**, Wissenschaftlicher Mitarbeiter und autorisierter Prüfer der Forschungsgesellschaft für angewandte Systemsicherheit und Arbeitsmedizin (FSA), Kappelrodeck.  
Prof. Dr.-Ing. **Siegfried Radandt**, Geschäftsführer und Leiter der Prüf- und Zertifizierungsstelle für Systemsicherheit der FSA, Brühl.



**Bild 7** Ergebnisse einiger ausgewählter Versuche der Versuchsreihe B.

## Literaturverzeichnis

- [1] Vogl, A.; Schepp, P.; Radandt, S.: Wirksamkeit von Entlastungsschlotten. VDI-Berichte Nr. 1873, S. 135-151. Düsseldorf: VDI-Verlag 2005.
- [2] Faber, M.: Explosionstechnische Entkopplung. VDI-Berichte Nr. 701, S. 659-680. Düsseldorf: VDI-Verlag 1989.
- [3] Bartknecht, W.: Explosionsschutz, Grundlagen und Anwendung. Berlin: Springer-Verlag 1993.
- [4] Steen, H.: Handbuch des Explosionsschutzes. Weinheim: Wiley-VCH 2000.
- [5] Eckhoff, R. K.: Dust Explosions in the Process Industries. London: Butterworth-Heinemann, 2nd. Ed. 1997.
- [6] Radandt, S.: Explosionsabläufe in Rohrleitungen in Abhängigkeit von Betriebsparametern. VDI-Berichte Nr. 701, S. 801-818. Düsseldorf: VDI-Verlag 1989.
- [7] Radandt, S.; Vogl, A.: Brand- und Explosionsgefahren, Staubexplosionen in Kleinsilos. Heidelberg: Roland Asanger Verlag 1992.
- [8] Vogl, A.; Bartknecht, W.; Radandt, S.: Untersuchungen zum Explosions-

- schutz, Sperrwirkung eines Entlastungsschlotes. Berufsgenossenschaft Nahrungsmittel und Gaststätten, Symposium Heft 19, S. 17-25. Mannheim 1989.
- [9] Vogl, A.: Wie wirksam sind Explosionsentlastungsschlote?. Vortrag Europex-Seminar, Antwerpen 1989.
  - [10] Vogl, A.: Wirksamkeit von Entlastungsschlotten. Forschungsprojekt F-05-9706 der Forschungsgesellschaft für angewandte Systemsicherheit (FSA). Mannheim 1997 (unveröffentlicht).
  - [11] Vogl, A.: Ablauf von Staubexplosionen in pneumatischen Saug-Flug-Förderanlagen. Heidelberg: Roland Asanger Verlag 1995.
  - [12] VDI 3673 Blatt 1: Druckentlastung von Staubexplosionen. Berlin: Beuth-Verlag 2002.
  - [13] Richtlinie 94/9/EG des Europäischen Parlaments und Rats vom 23. März 1994 zur Angleichung der Rechtsvorschriften der Mitgliedsstaaten für Geräte und Schutzsysteme zur bestimmungsgemäßen Verwendung in explosionsgefährdeten Bereichen. ABl. EG Nr. L 100 vom 19. April 1994, S. 1- 29.

und war dem Betrage nach deutlich niedriger als in der Rohrleitung vor dem Entlastungsschlot. Auch bei Auftreten hoher Explosionsdrücke unmittelbar vor dem Entlastungsschlot überstiegen die lokalen maximalen Drücke in der Rohrleitung stromab des Schlots nicht den dynamischen Ansprechdruck der Entlastungsfläche des Schlots; die lokalen maximalen Drücke in

der Rohrleitung zwischen Entlastungsschlot und Sekundärbehälter nahmen zudem grundsätzlich mit der Lauflänge ab.

- Die Versuchsergebnisse lassen außerdem darauf schließen, dass die Flammenübertragungswahrscheinlichkeit über den Schlot hinweg tendenziell abnimmt, je näher der Entlastungsschlot an den primären Explosionsbehälter heranrückt. TÜ 550