

Ergebnisse der experimentellen Untersuchungen zur Visualisierung der Wirksamkeit von Deflagrationsrohr Sicherungen in einer PVC-U Rohrleitung.

Dirk Schmidt¹, Thomas Heidermann²

¹ Bundesanstalt für Materialforschung und -prüfung, 2.4 Konstruktiver Brand- und Explosionsschutz Gase, Berlin

² Braunschweiger Flammenfilter GmbH, Braunschweig

Kurzfassung:

Deflagrationsrohr Sicherungen sind Sicherheitseinrichtungen, die den Durchfluss von brennbaren Gasen und Dämpfen brennbarer Flüssigkeiten ermöglichen, den Flammendurchschlag und eine weitere Explosionsausbreitung nach der Zündung von explosionsfähigen Gas-/Dampf-Luftgemischen jedoch verhindern sollen. Die Einbaubedingungen sind dabei von besonderer Bedeutung für die Wirksamkeit der Deflagrationsrohr Sicherungen. Oft lassen sich aus betrieblichen bzw. verfahrenstechnischen Gründen entsprechende Einbaubedingungen nur schwer oder nicht realisieren. So können beispielsweise Rohrleitungsverzweigungen zusätzliche Turbulenzen induzieren und dadurch zu erhöhten Flammenausbreitungsgeschwindigkeiten und Explosionsdrücken und ggf. zum Versagen der Deflagrationsrohr Sicherung führen. Neben den „klassischen“ Untersuchungsmethoden dieser Belastungssituationen von Deflagrationsrohr Sicherungen, wie die Erfassung des Explosionsdruckes und der Flammenausbreitungsgeschwindigkeiten, werden in diesem Beitrag die Ergebnisse der visuellen Beobachtungen des Reaktionsverlaufes sowie die Belastungen der Flammendurchschlagsicherung bei unterschiedlichen Einbaubedingungen in den Vordergrund gestellt. Gegenübergestellt wird die Belastungssituation der Flammensperre in einer geraden und einer verzweigten Rohrleitung. Verwendet wurde dafür eine speziell gefertigte Deflagrationsrohr Sicherung, die eine Beobachtung des Reaktionsverlaufes im Bereich der spiralförmig gewickelten Metallbändern erlaubt. Zusätzlich wurde im geschützten Bereich in der Rohrleitung eine Kamera installiert, die die Belastungssituation bei den einzelnen Versuchen dokumentierte. Die Ergebnisse bestätigen sehr eindrucksvoll, dass die Belastungssituation der Deflagrationsrohr Sicherung sich in Abhängigkeit von der Konfiguration der Rohrleitung entscheidend ändert.

1 Einleitung

Deflagrationsrohr Sicherungen werden seit Jahrzehnten in großem Umfang in der chemischen, petrochemischen Industrie und in den letzten Jahren auch in Biogas- und Deponiegasanlagen eingesetzt.

Für die explosionstechnische Entkopplung von Anlagen oder Anlagenteilen haben sich Detonations- und Deflagrationsrohr Sicherungen bewährt. Unter Deflagrationen versteht man Explosionen, die sich mit Unterschallgeschwindigkeit fortpflanzen und im Vergleich zu Detonationen relativ langsam sind. Im Unterschied zu den Detonationsrohr Sicherungen unterliegt die Deflagrationsrohr Sicherungen bei der Installation einigen Beschränkungen. So ist die Rohrlänge zwischen potentieller Zündquelle und dem Einbauort der Sicherung

beschränkt. Ebenfalls müssen mindestens 10% der Rohrquerschnittsfläche an der Zündquelle offen sein, um eine Überlastung der Armatur im Explosionsfall auszuschließen. Im Vergleich zur Detonationssicherung sind Deflagrationsrohrsicherungen in der Regel aber preiswerter und haben einen geringeren Druckverlust. Für den Einsatz von Deflagrationsrohrsicherungen sind spezielle Leistungsanforderungen sowie Prüfverfahren und Einsatzgrenzen zu beachten. Diese sind in der DIN EN ISO 16852 [1] beschrieben. Abweichungen von den normativen Anforderungen, die Grundlage der Prüfung und Zulassung von Deflagrationsrohrsicherungen sind, können zum Versagen der Sicherheitseinrichtung führen.

Von besonderer Bedeutung für die Wirksamkeit der Deflagrationsrohrsicherung ist der Einbauort. So wird in der DIN EN ISO 16852 empfohlen, dass der Leitungsabschnitt vor der Sicherheitseinrichtung (ungeschützte Seite) so gerade wie möglich und ohne Hindernisse ausgeführt sein sollte. Ziel ist es, turbulenzinduzierende Einbauten zu vermeiden, die zu einer beschleunigten Flammenausbreitung und Erhöhung des Explosionsdruckes führen. Ein in der betrieblichen Praxis häufig anzutreffender Anwendungsfall sind Rohrleitungsverzweigungen auf der ungeschützten Seite der Sicherheitseinrichtung. Diese Verzweigungen können entsprechende Turbulenzen erzeugen, die dann zu einem Versagen der Rohrsicherung führen.

Bisher liegen nur wenige belastbare Aussagen über den Einfluss von verzweigten Rohrleitungen auf den sicheren Einsatz von Deflagrationsrohrsicherungen vor. Hier wird überwiegend auf Betriebserfahrungen bzw. einige wenige Literaturquellen verwiesen, die allerdings in der Regel nur schwierig zu verifizieren sind. Das erschwert den optimalen Einsatz der Armaturen und sorgt für Unsicherheit beim Anlagenbetreiber. Ein Ziel im Rahmen eines Forschungsvorhabens mit der Braunschweiger Flammenfilter GmbH war die Untersuchung der Belastungssituation der Deflagrationsrohrsicherungen bei unterschiedlichen Rohrleitungskonfigurationen. Dazu wurden mit einer speziellen Deflagrationsrohrsicherung und unterschiedlichen Rohrleitungskonfigurationen Versuche durchgeführt, um die Belastung der Flammendurchschlagsicherung bei unterschiedlichen Randbedingungen zu untersuchen. Über diese Ergebnisse wird in diesem Beitrag berichtet.

2 Versuchsaufbau und Versuchsdurchführung

Gegenstand der experimentellen Untersuchungen ist die Ausbreitung von deflagrativen Explosionen in einer Rohrleitungen sowie dessen Wechselwirkung mit einer Deflagrationsrohrsicherung (s. Abb. 1 und 2). Zur visuellen Beobachtung, mit der in den Abb. 1 und 2 angegebenen Kameratechnik, wurden die Versuche in einer transparenten PVC-U Rohrleitung durchgeführt. Zu Beginn der Versuche mit Verzweigungen wurde die Rohrleitung allerdings fast komplett zerstört. Der Grund dafür war der Kraftstoß auf die Rohrleitungsenden der Verzweigung und die damit im Zusammenhang stehenden erheblichen Zugkräfte, die auf den fixierten geraden Abschnitt der PVC-U Rohrleitung wirkten. Das Ergebnis war ein Bersten des geraden Rohrleitungsabschnittes der Verzweigung. Deshalb mussten die Versuche in einer vorhandenen Stahl Rohrleitung (DN 150 PN 100) weitergeführt werden.

In den Abbildungen 1 und 2 sind die schematischen Versuchsaufbauten und die entsprechende Instrumentierung der Versuche dargestellt. Die Rohrleitungen waren beidseitig verschlossen. Die Zündung erfolgte in der Mitte eines Blindflansches am Anfang des Rohres. Die Zugänge für die Gasversorgung, die Vakuumpumpe und das Abgas waren mit pneumatischen Ventilen bestückt.

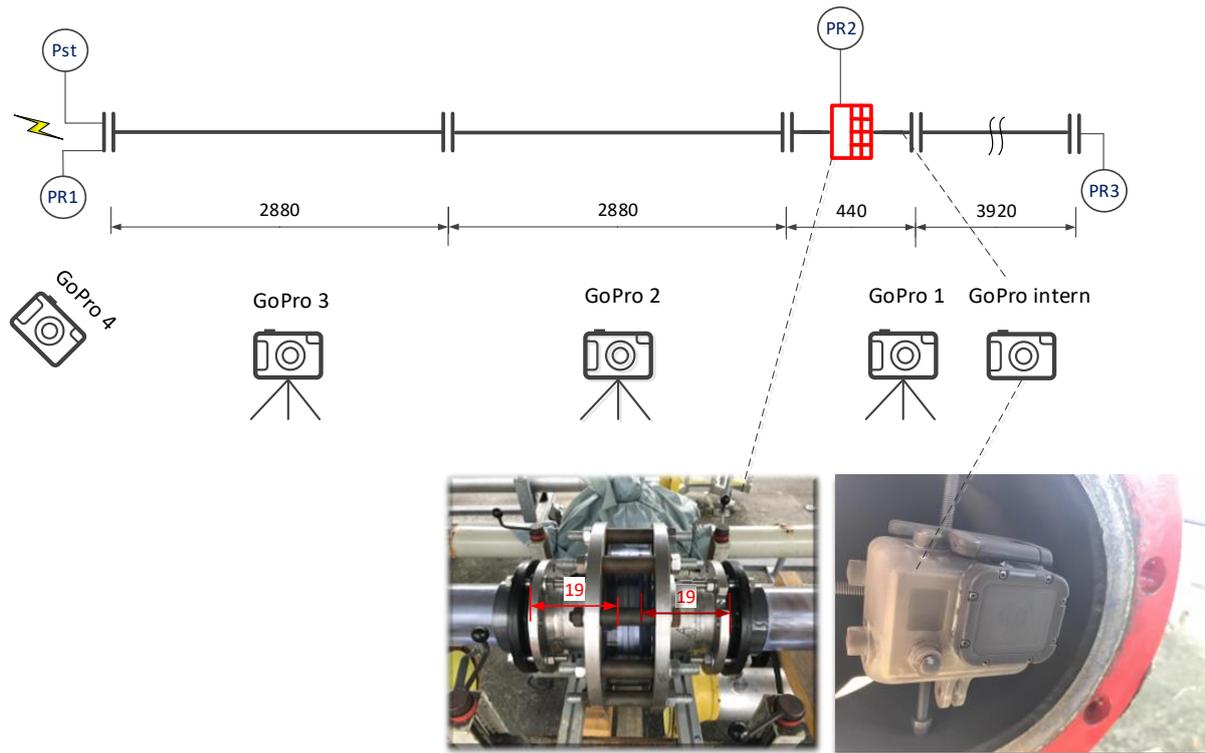


Abb. 1: Versuchsaufbau gerades PVC-U Rohr (DN 150; PN 7), Deflagurationsrohrsicherung, Anordnung der Kameras (GoPro®) und Drucksensoren.

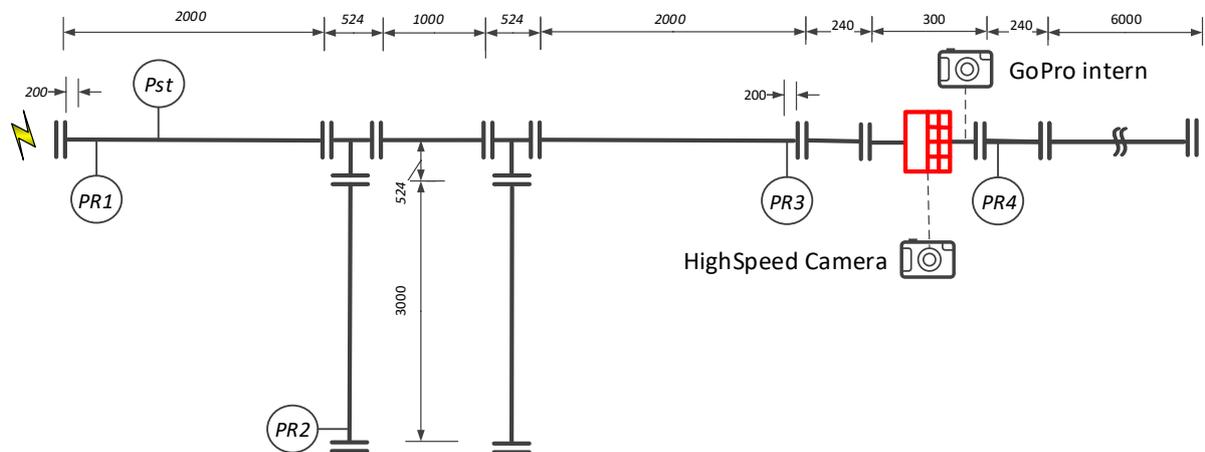


Abb. 2: Versuchsaufbau verzweigte Stahlrohrleitung (DN 150; PN 100), Deflagurationsrohrsicherung, Anordnung der Kameras (GoPro® und High-Speed Kamera) und Drucksensoren.

Nach der Evakuierung der Rohrleitung wurde mittels Massendurchflussregler das Gasgemisch aus den einzelnen Volumenströmen hergestellt und die Rohrleitungsstrecke bis zum gewünschten Anfangsdruck (1,0 bar - 1,6 bar abs) befüllt. Verwendet wurden für die Versuche unterschiedliche Propan-/Luft-Gemische (3,0 - 4,2 Vol.%).

Druck, Temperatur und Sauerstoffkonzentration des Gasgemisches wurden während des Füllvorganges kontinuierlich überwacht. Für die Messung des Anfangsdruckes wurde ein

piezoresistiver Drucksensor (Pst) verwendet. Alle anderen Druckmessstellen waren mit piezoelektrischen Drucksensoren (PR1-4) ausgerüstet. Die Zündung des explosionsfähigen Brenngas/Luft-Gemisches erfolgte mittels eines Drahtzünders. Die dabei freigesetzte Zündenergie lag in einem Bereich von 20-25 J.

Der maximale Explosionsdruck wurde an den entsprechenden Messstellen (s. Abb. 1 und 2) mittels Transientenrekorder erfasst und mit dem Programm TranAX3 [2] ausgewertet.

Verwendet wurde für die Versuche eine Deflagrationsrohrsicherung (s. Abb. 1), die von der Firma Braunschweiger Flammenfilter GmbH zur Verfügung gestellt wurde. Besonderes Merkmal dieser Sicherung ist der umlaufende transparente Ring, der den Blick auf die spiralförmig gewickelten Metallbändern sowie das innere der Rohrsicherung (geschützter/ungeschützter Bereich) zulässt. Die verwendete Deflagrationsrohrsicherung ist nicht für den produktiven Einsatz geeignet, sondern kann ausschließlich nur für den experimentellen Versuchsbetrieb verwendet werden. Mittels einer Highspeed Kamera (5000 fps) wurden die Abläufe in der Sicherung (vor, nach und zwischen den Metallbändern) beobachtet.

3 Ergebnisse der experimentellen Untersuchungen

3.1 Deflagrationsrohrsicherung in der geraden Rohrleitung

Durch die Verwendung einer transparenten PVC-U Rohrleitung war der Verlauf der Deflagration des Propan-/Luft-Gemisches sehr gut zu beobachten. Die verwendeten Kameras zeichneten rohrabschnittsweise die Entwicklung der Deflagration auf. In der Abb. 3 ist ein beispielhafter Verlauf, in Abhängigkeit von der Zeit, über die gesamte Rohrstrecke dargestellt.

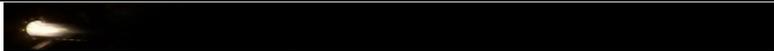
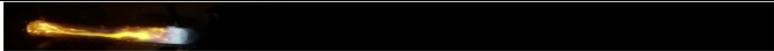
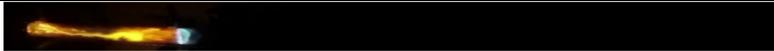
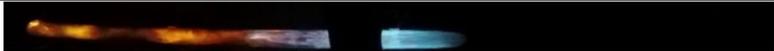
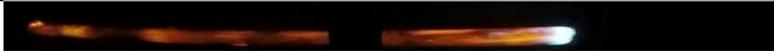
Bild Nr.		Zeit [ms]
1		100
2		300
3		400
4		500
5		800
6		900
7		1100
8		1200
9		1400
10		1500
11		1700

Abb. 3: Deflagrative Ausbreitung der Flammenfront eines stöchiometrischen Propan-/Luft-Gemisches in einer geraden PVC-U Rohrleitung bis zur Deflagrationsrohrsicherung (Sichteinschränkung der Kamera durch Stahlträger in den Sequenzen 7-11).

Nach der Zündung (Bild Nr. 1) des homogenen vorgemischten explosionsfähigen Propan/Luft-Gemisches breitet sich die Flammenfront vom Ort der Zündung aus (Bilder Nr. 2-11), unter der Voraussetzung, dass die entsprechenden Mischungsvorgänge und Kettenreaktionen genügend rasch ablaufen. Hinter der Flammenfront entsteht eine verbrannte Zone. Die laminare Flammenfront zeichnet sich durch ein bläuliches Leuchten aus, verursacht im Wesentlichen durch Lichtemissionen von CH und C₂ Radikalen.

Außerdem konnten bei allen Versuchen in der geraden Rohrleitung signifikante Schwankungen der Flammenausbreitungsgeschwindigkeiten beobachtet werden. Diese resultieren aus der Verringerung der Ausbreitungsgeschwindigkeit durch den Wärmeverlust an der Rohrwandung und dem beschleunigenden Effekt einer sich einstellenden turbulenten Rückströmung. Über ähnliche Effekte wurde auch schon in [4 und 5] berichtet.

Zur Untersuchung der Belastung der verwendeten Deflagrationsrohrsicherung wurde neben der Aufzeichnung des Explosionsdruckes auch erstmalig eine visuelle Beobachtung der eingebauten Bandsicherung vorgenommen. Dazu wurde eine Kamera hinter der Deflagrationsrohrsicherung (geschützte Seite) in der Rohrleitung montiert (s. Abb. 1) und so die Belastung der Flammensicherung beobachtet (s. Abb. 4).

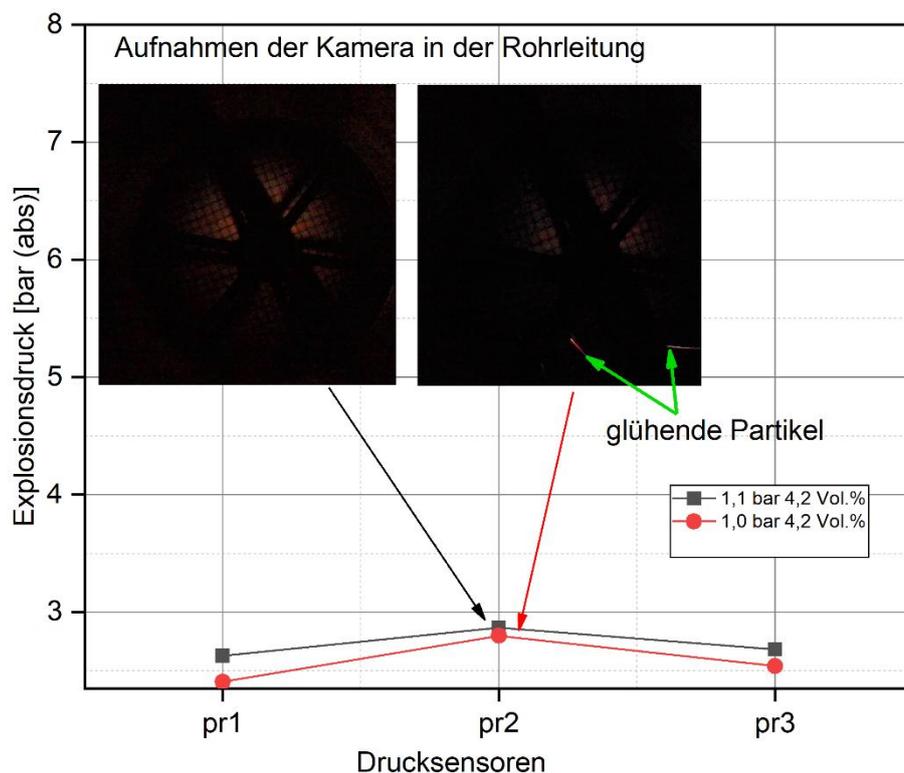


Abb. 4: Maximalen Explosionsdrücke eines stöchiometrischen Propan-/Luft-Gemisches (4,2 Vol.%) in einer geraden PVC-U Rohrleitung und die dazugehörigen Belastungen der Flammensperre (s. auch Abb.1).

Die Bandsicherungen der Flammendurchschlagsicherung werden aus einem aufeinander liegenden geriffelten und einem glatten Metallband gewickelt. Es entstehen Kanäle mit dreieckigem Querschnitt, so dass eine Charakterisierung über ihre Dreieckshöhe erfolgen kann. Bedingt durch das Fertigungsverfahren treten im Zentrum sowie in den Randgebieten der Bandsicherungen etwas kleinere Dreieckshöhen als im restlichen Teil auf.

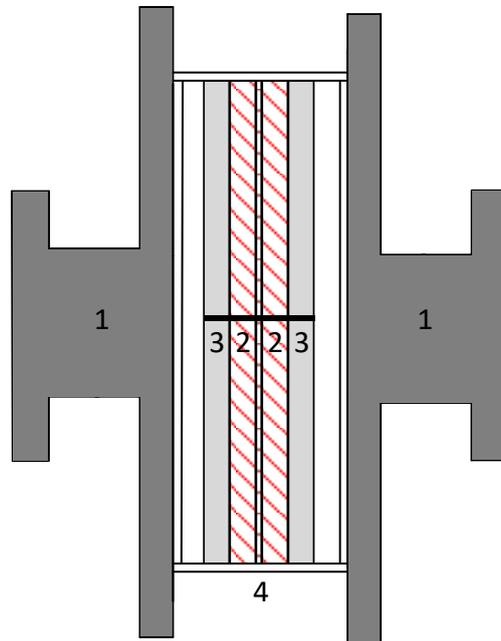


Abb. 5: Schematischer Aufbau der Deflagurationsrohrsicherung bestehend aus 1) Gehäuse 2) Bandsicherungen 3) Unterstütszungsringe 4) Plexiglasbehälter.

Nachdem die Flammenfront die Bandsicherung (s. Abb. 5) erreicht, wird im Idealfall die Flamme gelöscht. Der dafür hauptsächlich verantwortliche Effekt ist die Wärmeableitung (Kühlung) sowie die Streckung der Reaktionszone. Unter bestimmten Randbedingungen (höhere Temperaturen) kann auch der Effekt der Zerstörung reaktiver Zwischenprodukte durch Reaktionen an der Wandoberfläche einen Beitrag zur Flammenlöschung leisten.

Aus diversen Prüfungen von Flammendurchschlagsicherungen in Stahl und Edelstahlrohrleitungen ist bekannt, dass das Versagen einer Flammendurchschlagsicherung mit unterschiedlichen Geschwindigkeiten stattfindet. In der Regel sind die Flammendurchschläge sehr schnell und dauern nur wenige Millisekunden. Seltener sind, vor allem bei Deflagrationsversuchen, vergleichsweise langsam verlaufende Durchschläge mit Verweilzeiten in der Sicherung von bis zu einer Sekunde.

Untersuchungen der PTB mit Flammendurchschlagsicherungen aus transparentem Material zeigten die Flammenfortpflanzung in Rohrleitung und Armatur. Auch hier beobachtete man unterschiedliche Mechanismen des Durchschlages: schnelle und langsame, mit und ohne erkennbare Verbrennung zwischen den einzelnen Filtern, sowie strahlförmige Zündungen auf der zu schützenden Seite. Die Anordnung der Hochgeschwindigkeitskamera war auch in diesen Versuchen orthogonal zur Ausbreitungsrichtung der Flamme. Im Vergleich zu einer handelsüblichen Flammendurchschlagsicherung wurde der Abstand der Bandsicherungen bei diesen Versuchen stark vergrößert, um den Zwischenraum besser beobachten zu können.

In den Aufnahmen der Abb. 4 ist eine geringe Belastung der Flammensperren in Abhängigkeit vom maximalen Explosionsdruck zu erkennen. Die Segmente nahe dem Mittelpunkt werden dabei am stärksten mit Flammen beaufschlagt.

Interessant ist beim Versuch mit 1,0 bar Anfangsdruck das Auftreten von glühenden Partikeln im geschützten Bereich der Rohrleitung, deren Energieinhalt allerdings nicht zur Zündung des explosionsfähigen Gasgemisches ausreichte.

3.2 Deflagrationsrohrsicherung in der verzweigten Rohrleitung

Die Ergebnisse der Highspeed-Aufnahmen der Deflagrationsrohrsicherung zeigten, dass mit der Verringerung des Abstandes von der Rohrleitungswandung eine Zunahme der Intensität der Flammen verbunden ist. In der Abb. 6 ist in einer beispielhaften Bildsequenz dieser Sachverhalt sehr deutlich zu erkennen.

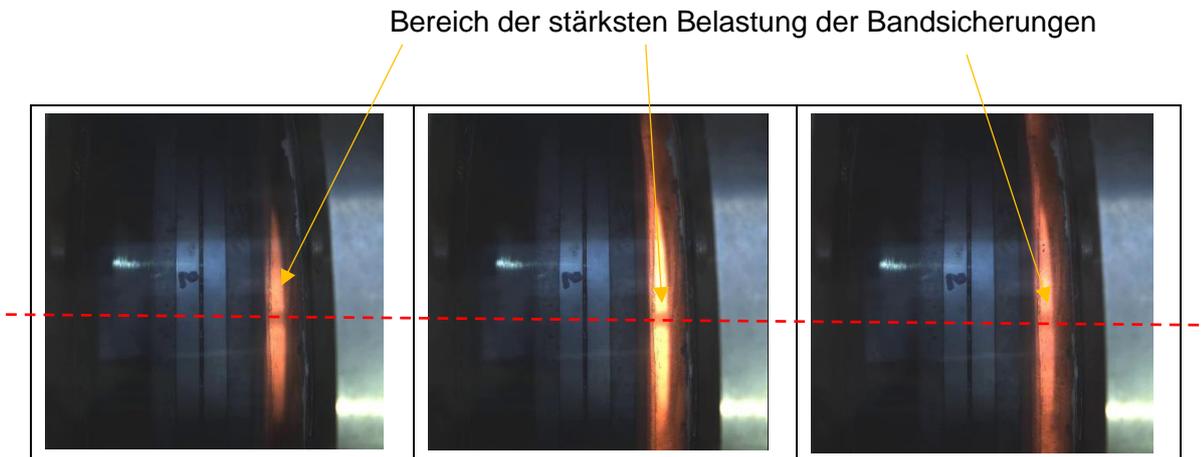


Abb. 6: Highspeed Aufnahmen der Belastung der Deflagrationsrohrsicherung zu unterschiedlichen Zeiten (rot = Mittelachse der Rohrsicherung) mit einem Propan-/Luft-Gemisch (3 Vol.%).

Ein wesentlicher Grund für die stärkere axiale Belastung der Deflagrationsrohrsicherung ist der Einfluss der Rohrwandung, die als Wärmeübertragungsfläche fungiert und somit zu einer Verringerung der Flammenausbreitungsgeschwindigkeit in diesem Bereich führt.

In einem nächsten Schritt, wie in der Abb. 7 ersichtlich, wurde der Zwischenraum zwischen den 2 Bandsicherungen untersucht. Ziel war es dort Hinweise auf die Art der Belastung der Deflagrationsrohrsicherung zu finden. Leider konnten selbst bei einem Flammendurchschlag keine Veränderungen (Helligkeitsschwankungen) in dem beobachteten Spalt nachgewiesen werden.

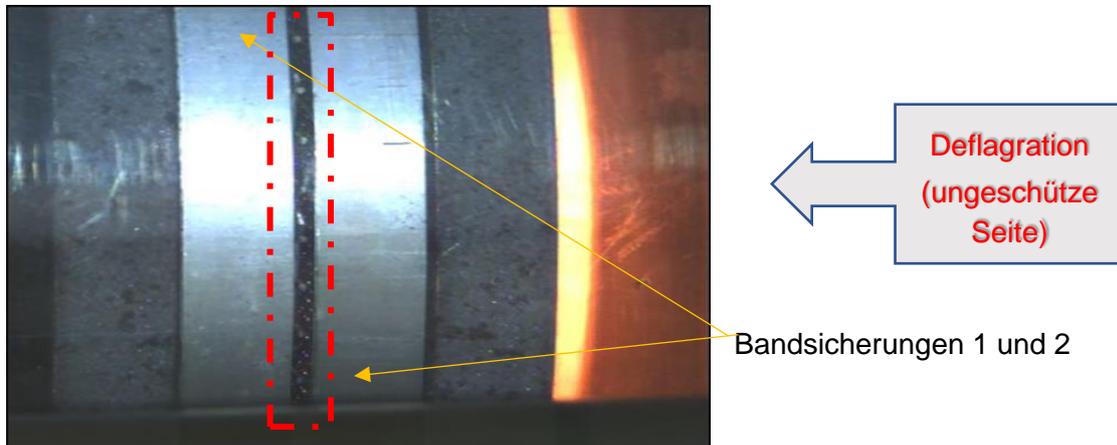


Abb. 7: Momentaufnahme (rotes Rechteck – 5000 fps) zwischen den beiden Bandsicherungen bei einer Deflagration eines Propan-/Luft-Gemisches (3 Vol.%).

In Analogie zur geraden Rohrleitung wurden auch in der verzweigten Rohrleitung Kameraaufnahmen hinter der Deflagrationsrohrsicherung (geschützter Bereich) durchgeführt.

Deutlich ist in der Abb. 8 der Einfluss der veränderten Rohrleitungskonfiguration zu erkennen.

Die turbulenzinduzierenden Verzweigungen zwischen der Zündquelle und der Deflagrationsrohrsicherung führen zu einer deutlichen Erhöhung des Explosionsdruckes (vgl. Abb. 4 und 8). Im Vergleich zur geraden Rohrleitung kam es fast zu einer Verdoppelung des maximalen Explosionsdruckes (PR2 vs. PR3) vor der Deflagrationsrohrsicherung. Damit konnten die Ergebnisse aus [6] bestätigt werden. Zu beachten ist allerdings, dass sich das L/D -Verhältnis der ungeschützten Rohrseite der Versuchsaufbauten geringfügig unterscheidet, sowie die Rohrleitungen (s. Abb. 1 und 2) aus unterschiedlichen Materialien (Stahl/PVC-U) bestehen.

Wie in der Abb. 8 ersichtlich, steigt neben dem maximalen Explosionsdruck auch die Belastung der Bandsicherungen deutlich. Damit steigt die Gefahr, dass die Oberflächentemperatur der Bandsicherungen die Zündtemperatur des Propan-/Luft-Gemisches ($> 450^{\circ}\text{C}$) überschreitet und so zur Zündquelle für das explosionsfähige Gasgemisch im eigentlich geschützten Teil der Rohrleitung wird.

Eine moderate Erhöhung des Anfangsdruckes auf 1,2 bar abs verstärkt den diskutierten Effekt noch deutlich.

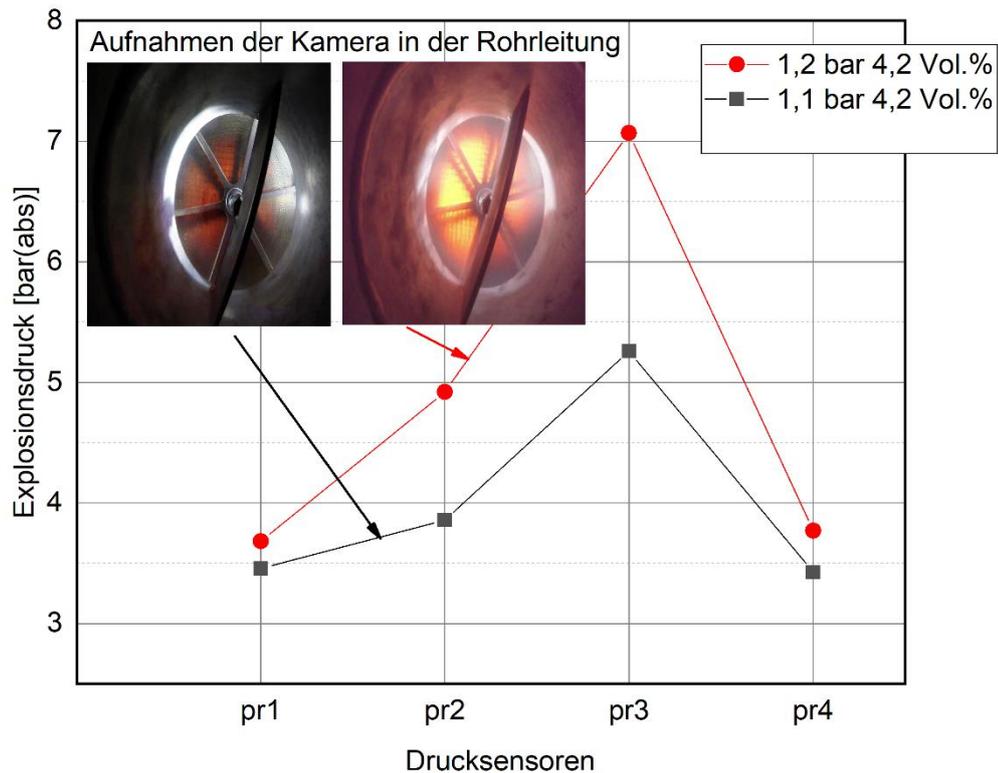


Abb. 8: Druckabhängigkeit der maximalen Explosionsdrücke eines stöchiometrischen Propan-/Luft-Gemisches (4,2 Vol.%) in einer verzweigten Rohrleitung und die dazugehörigen Belastungen der Flammensperren (s. auch Abb.1).

4 Zusammenfassung

Die Ergebnisse der experimentellen Untersuchungen zeigen sehr deutlich, dass die Belastungssituation der Deflagrationsrohrsicherung sehr stark von der Konfiguration des Versuchsaufbaues abhängig ist. Erstmals wurde ein visueller Vergleich der Beanspruchung einer Deflagrationsrohrsicherung in einer geraden und einer verzweigten Rohrleitung durchgeführt. Damit konnten die Ergebnisse aus [6] bestätigt und zusätzlich wichtige Einblicke in die Wirkungsweise der verwendeten Bandsicherungen gewonnen werden.

Das besondere bei den hier gezeigten Versuchen war, dass die Kamera auf der geschützten Seite in der Rohrleitung eingebaut wurde. Durch diese Anordnung wurde es zum ersten Mal möglich, eine Flammendurchschlagsicherung bei einer Explosion in dieser Position zu beobachten. Es führt zu einem nahezu 3-dimensionalen Bild einer Deflagrationsrohrsicherung, während sie von einer Explosion beaufschlagt wird. Die Kameraaufnahmen, die mit einer Bildrate von 120 fps aufgenommen wurden, zeigen keine Inhomogenität, d. h., keine lokal stark ausgeprägten Leuchterscheinungen. Im Rahmen der Zeitauflösung ist eine über den Radius absolut gleichmäßige Emission zu beobachten. Bei Flammendurchschlägen ist die Intensität naturgemäß sehr viel größer als bei den Versuchen ohne Durchschlag. Versuche, die zur Zündung auf der geschützten Seite führten, weisen keine Hot Spots auf. Ereignisse, wie eine Strahlzündung, wurden nicht beobachtet.

Diese Ergebnisse sind für die Entwicklung neuer Flammendurchschlagsicherungen wichtig. Je gleichförmiger die Strömung durch eine Sicherung ist, umso weniger Bandsicherungen sind für ein Löschen der Explosion erforderlich. Zwischenlagen, die zwischen den einzelnen Bandsicherungen eingebaut werden, dienen der Gleichverteilung und fördern so ein Quenchen der Reaktionen.

Die Erkenntnisse zeigen, dass beim bestimmungsgemäßen Einsatz von Flammendurchschlagsicherungen ein hohes Maß an Sicherheit gewährleistet ist und damit einen wichtiger Beitrag zum tertiären Explosionsschutz geleistet wird.

Zukünftig sollen weitere Einflussfaktoren wie der Ort der Zündung, der Einfluss der Zündenergie und die Art der Abzweigungen untersucht werden.

Die geplanten Arbeiten verfolgen das Ziel, allgemeine Gestaltungsgrundsätze für den sicherheitsgerechten Einsatz von Deflagrationssicherungen in verzweigten Rohrleitungen abzuleiten. Die Erkenntnisse sollen dann auch in die Normung einfließen.

Literaturverzeichnis

[1] DIN EN ISO 16852:2016: Flammendurchschlagsicherungen -Leistungsanforderungen, Prüfverfahren und Einsatzgrenzen.

[2] MF Instruments GmbH: TranAX3 (v3.41) 2014.

[4] Drame, C.: Ausbreitung von Deflagrationen in geschlossenen langen Rohrleitungen. Dissertation, Universität Duisburg-Essen (2010).

[5] Phylaktou, H.; Andrews, G.E.: Gas explosions in long closed vessels, Combust. Sci. Technol.,77(1991), S. 27-39.

[6] Schmidt, D.; Heidermann, T.: Einfluss von Rohrleitungsverzweigungen auf die Wirksamkeit von Deflagrationsrohrsicherungen, Technische Sicherheit Bd. 8 (2018) Nr. 4.