

**Forschungsgesellschaft
für angewandte
Systemsicherheit und
Arbeitsmedizin**



**Projekt: F - 05 - 9510
Abschlußbericht**

**Explosionsübertragung aus Behältern
in Rohrleitungen pneumatischer Anlagen**

Mannheim, 8. 8. 1996

Explosionsübertragung aus Behältern in Rohrleitungen pneumatischer Anlagen

A. Vogl, Mannheim

	Seite
1. Einleitung.....	2
2. Versuchsaufbau.....	4
3. Versuchsdurchführung.....	6
4. Ergebnisse.....	8
4.1 Explosionsablauf in Rohrleitungen mit Durchmesser $D = 200$ mm.....	8
4.2 Explosionsablauf in Rohrleitungen mit Durchmesser $D = 100$ mm.....	15
5. Diskussion der Ergebnisse und Schlußfolgerungen für die praktische Anwendung.....	18
6. Literaturangaben.....	22

Explosionsübertragung aus Behältern in Rohrleitungen pneumatischer Anlagen

Zusammenfassung

Staubexplosionen können sich in industriellen Anlagen über Rohrleitungen ausbreiten und schwerwiegende Sekundärexplosionen verursachen. Zur Schadensbegrenzung müssen daher explosionstechnische Entkopplungsmaßnahmen ergriffen werden. Für die Festlegung der Einbauorte geeigneter Schutzsysteme werden genaue Kenntnisse über die Flammenfortpflanzung benötigt. Aus diesem Grund wurden im Großmaßstab Explosionsversuche in einem druckentlasteten Behälter durchgeführt und die dadurch verursachte Flammenfortpflanzung in angeschlossenen Rohrleitungen einer pneumatischen Anlage näher betrachtet. Hierzu wurden Drücke und Flammenlaufzeiten in den Rohrleitungen in Abhängigkeit von Betriebsparametern und vom reduzierten Explosionsdruck im vorgeschalteten Behälter gemessen. Die Expansionsströmung der heißen Verbrennungsgase aus dem Behälter wurde als dominierende Einflußgröße bezüglich der Flammenlaufzeit in der Rohrleitung ermittelt. Diagramme zur Festlegung von Einbauorten und Mindestabständen von Schutzsystemen werden angegeben.

1. Einleitung

In der Industriepraxis sind Behälter, Silos und Apparate vielfach durch Rohrleitungen pneumatischer Förder-, Entstaubungs- und Aspirationsanlagen miteinander verbunden. Im Falle einer Staubexplosion besteht hierdurch die Gefahr der Flammenfortpflanzung und Druckwellenausbreitung auch in entfernte Anlagenbereiche. Schwerwiegende Sekundärexplosionen können die Folge sein. Zur Schadensbegrenzung ist es daher erforderlich, die verschiedenen Anlagenbereiche explosionstechnisch zu entkoppeln [1,2,3]. Dies kann durch den gezielten Einbau selbsttätig wirkender oder über ein Detektionssystem fremdbetätigter Entkopplungseinrichtungen in die Rohrleitungen erfolgen, wie z.B. Explosionsschutzventile, Schnellschlußschieber, -klappen, Quenchventile oder Löschmittelsperren.

Um die Wirksamkeit solcher Entkopplungssysteme zu gewährleisten ist es notwendig, den Mindestabstand zwischen der zu schützenden Apparatur bzw. dem Detektor und dem Einbauort der Entkopplungseinrichtung unter Berücksichtigung von deren Eigenzeit festzulegen. Das kann aber nur dann geschehen, wenn genaue Kenntnisse über den Ablauf von Staubexplosionen in Rohrleitungen vorliegen.

Zur Problematik des Ablaufs von Staubexplosionen in Rohrleitungen wurden umfangreiche experimentelle Untersuchungen durchgeführt [4-9], die sich jedoch hinsichtlich der Gemischerstellung deutlich von den Bedingungen des praktischen Anlagenbetriebs unterscheiden. Andererseits ist aus zahlreichen Forschungsarbeiten bekannt, daß der Entstehungsmechanismus eines Staub/Luft-Gemisches und die damit verknüpfte Turbulenz einen starken Einfluß auf die Verbrennungsgeschwindigkeit und somit auf die Explosionsheftigkeit ausübt [10-15].

Um möglichst praxisnahe Ergebnisse unter Berücksichtigung realer Betriebsbedingungen zu erhalten, wurden experimentelle Untersuchungen in Rohrleitungen pneumatischer Anlagen durchgeführt und der Einfluß von Durchmesser, Fördergeschwindigkeit, Zündortlage, Staubart und Staubkonzentration auf die Flammenfortpflanzung und den zeitlichen Druck untersucht [16].

Bei diesen Untersuchungen hat sich herausgestellt, daß unabhängig von den Betriebsbedingungen die Zündortlage den stärksten Einfluß auf den Explosionsablauf ausübt.

Die maximalen Flammengeschwindigkeiten und Explosionsdrücke wurden dann ermittelt, wenn sich der Zündort in der Mitte der Rohrleitung befand. Die Expansionsströmung der Verbrennungsgase verursacht in diesem Falle sehr hohe Flammengeschwindigkeiten und die Flammenfortpflanzung kann in und gegen die Förderrichtung erfolgen. Mit einem Rohrdurchmesser von 200 mm und bei Verwendung von Maisstärke als Brennstaub ($K_{St} = 200 \text{ bar}\cdot\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$) konnten bereits nach relativ kurzem Flammenlaufweg von ca. 8-10 m Flammenfrontgeschwindigkeiten im Überschallbereich gemessen und im weiteren Verlauf nach ca. 15-19 m das Auftreten von Stoßwellen beobachtet werden. Nach einer Rohrlänge von 23 m wurden maximale Flammenfrontgeschwindigkeiten bis ca. 1200 m/s und Stoßwellen mit maximalen Druckspitzen von ca. 40 bar gemessen.

Abbildung 1 zeigt beispielhaft die in diesen Untersuchungen gemessenen Flammenlaufzeiten in Abhängigkeit der K_{St} -Werte der Versuchsstäube für Rohrleitungen mit Durchmessern von $D = 100 \text{ mm}$ und 200 mm . Die Versuchsergebnisse beziehen sich auf den "worst case", d.h. auf optimale Staubkonzentration, Zündortlage "Mitte" und Fördergeschwindigkeit 30 m/s.

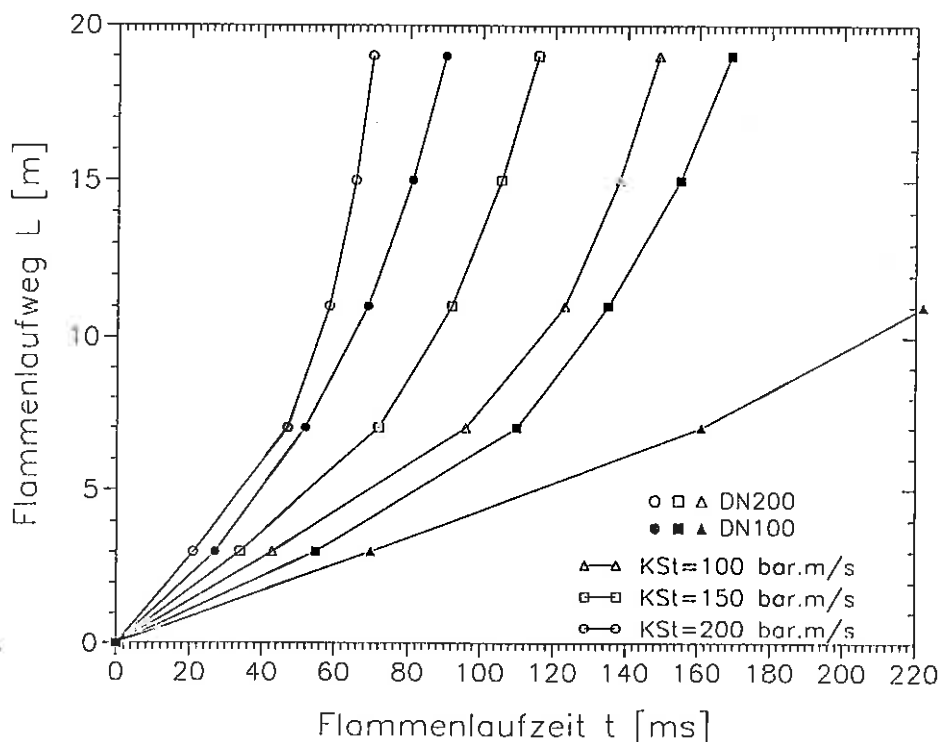


Abb.1: Flammenlaufweg L als Funktion der Flammenlaufzeit t in Abhängigkeit vom K_{St} -Wert des Staubes für Rohrleitungen mit Durchmessern von $D = 100 \text{ mm}$ und 200 mm - Zündort: Rohrmitte, Fördergeschwindigkeit $v_F = 30 \text{ m/s}$, Meßwerte in Förderrichtung - [16]

Häufig werden Staubexplosionen jedoch aus Apparaten, Behältern, Silos oder Filteranlagen in Rohrleitungen hinein übertragen. Die Bedingungen hinsichtlich der Flammenfortpflanzung können sich dadurch gegenüber den zuvor erläuterten Ergebnissen bei Zündortlage innerhalb der Rohrleitung verändern. Insbesondere ist zu vermuten, daß sich die Änderungen der Druck- und Strömungsverhältnisse auf den explosiblen Verbrennungsablauf in den angeschlossenen Rohrleitungen auswirken können.

Aus diesem Grund wurde die bereits in [16] verwendete pneumatische Saug-Flug-Förderanlage mit einem druckentlasteten 9.4 m³-Behälter verbunden und Flammenlaufzeiten und Drücke in der Rohrleitung in Abhängigkeit der Förderrichtung, der Fördergeschwindigkeit und des zeitlichen Explosionsdrucks im vorgeschalteten Behälter untersucht.

2. Versuchsaufbau

Für die Untersuchungen wurde eine pneumatische Saug-Flug-Förderanlage in Verbindung mit Rohrleitungsdurchmessern von wahlweise 100 mm und 200 mm eingesetzt und mit einem druckentlasteten 9.4 m³-Behälter entsprechend der schematischen Darstellung in Abbildung 2 verbunden.

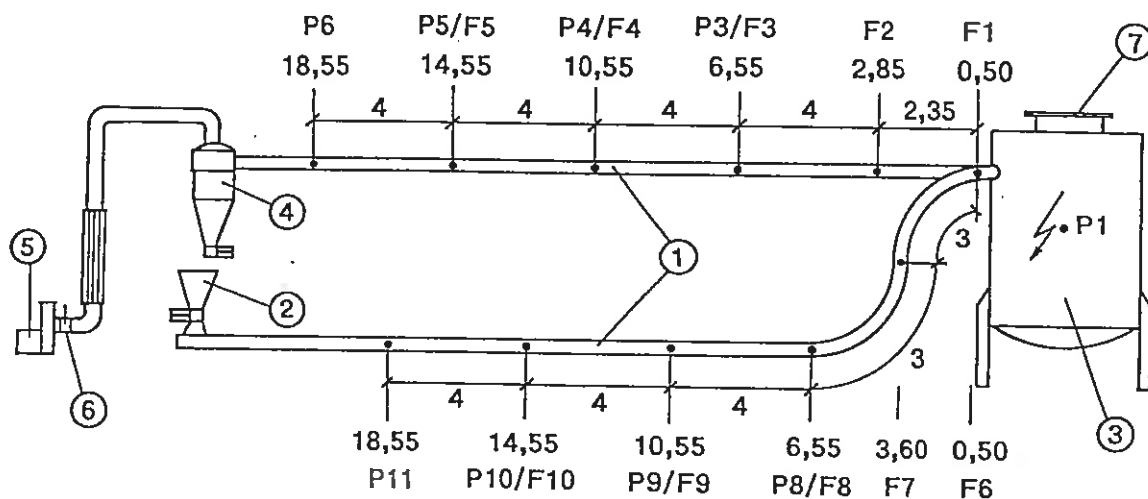


Abb.2: Versuchsaufbau in schematischer Darstellung

Mit Hilfe eines Radial-Saug-Gebläses (5) wird die Luft durch das offene Rohrende unmittelbar vor der Produktaufgabe (2) im unteren Rohrarm angesaugt, strömt in den Behälter (3) und von dort durch eine parallel angeflanschte Rohrleitung (1) in Richtung Zyklon (4) bzw. Saug-Gebläse (5). Fördergeschwindigkeiten bis zu 30 m/s können durch einen Drosselschieber (6) eingestellt werden. Der 9.4 m³-Behälter ist auf der Oberseite mit variablen Druckentlastungsflächen (7) ausgestattet.

Die Versuchsanordnung bietet die Möglichkeit, die Flammenfortpflanzung unter gleichen Ausgangsbedingungen sowohl in als auch gegen die Strömungsrichtung zu beobachten. Die praktische Realisierung des Versuchsaufbaus ist in Abbildung 3 zu sehen.

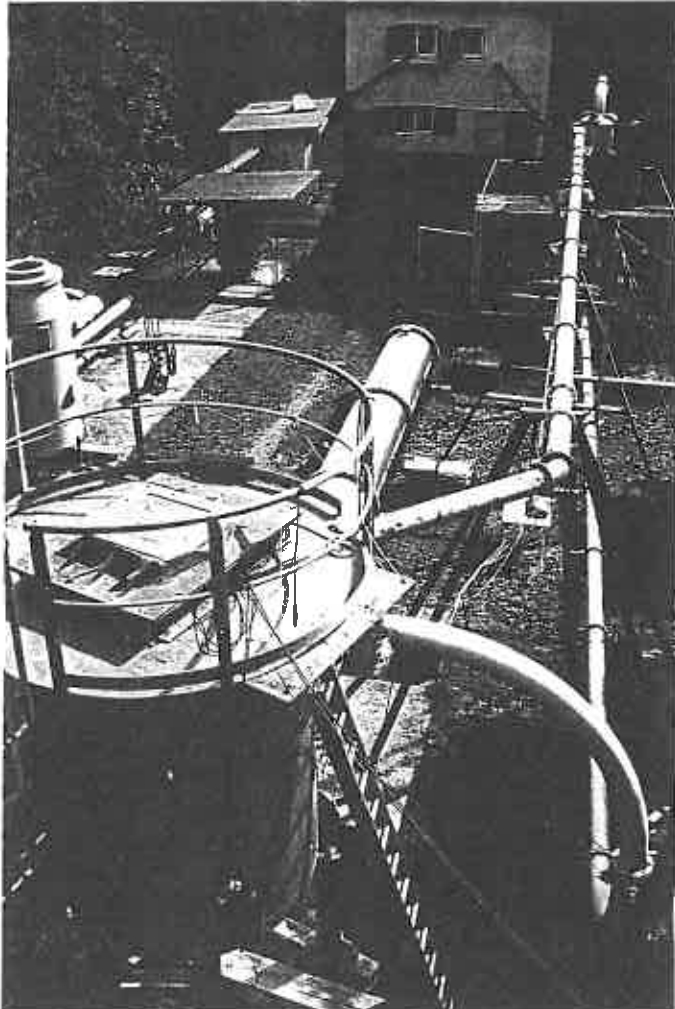


Abb.3: Praktische Realisierung des Versuchsaufbaus

Technische Daten zum Versuchsaufbau:

Länge der unteren Rohrleitung bis zum Behälter: 25.5 m
 Länge der oberen Rohrleitung zwischen Behälter und Zyklon: 20.5 m
 Rohrdurchmesser: 100 mm und 200 mm
 Fördergeschwindigkeit: 0, 20, 30 m/s
 Produktaufgabe in die Rohrleitung: Differentialdosierwaage mit Doppelförderschnecke
 Volumen Zyklon: 0.7 m³
 Volumen Behälter: 9.4 m³
 Höhen/Durchmesser-Verhältnis des Behälters: 1.5
 Druckentlastungsflächen des Behälters: 0.3, 0.5 und 0.75 m²
 Statischer Ansprechüberdruck der Berstmembrane: 0.1 bar
 Erstellung des Staub/Luft-Gemisches im Behälter: 4 x 12.4 l - Druckbehälter (20 bar Vor-
 druck) in Verbindung mit halbringförmigen Düsenanordnungen und Schnellöffnungsventilen
 Zündmittel: pyrotechnische Zünder
 Zündenergie: 2 x 5 kJ

Explosionskenngrößen der für die Versuche verwendeten Stäube:

Maisstärke: $p_{\max} = 9.1 \text{ bar}$, $K_{St} = 200 \text{ bar}\cdot\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$
 Weizenmehl: $p_{\max} = 8.3 \text{ bar}$, $K_{St} = 80 \text{ bar}\cdot\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$

Die Bestimmung der Explosionskenngrößen erfolgte nach VDI 2263, Blatt1 [17].

Meßtechnik:

Druck: Piezoelektrische Quarz-Druckaufnehmer (Typ 6031, Fa. Kistler) mit Ladungsverstärkern (Typ 5007, Fa. Kistler)

Flammenfront: Silicium Photodioden (Typ BPW 34, Fa. Siemens)

Staubkonzentration: Transmissionsmessung mit Hilfe eines gepulsten Infrarot-Meßlichtstrahls (Meßgerät Typ SKG V 4 [16,18], Fa. PAGG, Schweiz)

Die Anordnung der Meßstellen ist aus der schematischen Darstellung in Abbildung 2 ersichtlich.

3. Versuchsdurchführung

Die Erstellung der Staub/Luft-Gemische im 9.4 m³-Behälter erfolgte durch 4 unter jeweils 20 bar Überdruck stehende Staubvorratsbehälter (12.4 l) in Verbindung mit Schnellöffnungsventilen und perforierten Halbringdüsen. Es wurde in allen Versuchen mit einer Staubkonzentration im Behälter von 500 g/m³ gearbeitet. Die Versuchsstäube wurden zuvor getrocknet (Restfeuchte < 3 %) und gesiebt.

Die Erzeugung des gewünschten reduzierten Explosionsüberdrucks [19] im Behälter konnte durch Variation der Druckentlastungsfläche und der Zündverzögerungszeit, d.h. der Zeit zwischen dem Beginn des Staubeintrags und dem Aktivieren der Zünder, erfolgen.

Die RMS-Turbulenzgeschwindigkeit des Staub/Luft-Gemisches betrug zum Zündzeitpunkt $\leq 2 \text{ m/s}$ [20].

In Voruntersuchungen wurde der Einfluß der Zündortlage im Behälter auf die Flammenfortpflanzung in den angeschlossenen Rohrleitungen untersucht. Dabei hat sich herausgestellt, daß bei konstantem reduziertem Explosionsüberdruck im Behälter die maximalen Flammengeschwindigkeiten in den Rohrleitungen dann gemessen werden, wenn sich der Zündort in Höhe der Rohreinmündungen befindet. In diesem Falle tritt die Flamme bereits im Anfangsstadium der Behälterexplosion in die Rohrleitungen ein und die entstehenden Expansionsströmungen der Verbrennungsgase aus dem Behälter haben maximale Flammengeschwindigkeiten zur Folge. Auf Grund dieser Erkenntnisse wurde diese Zündortlage bei den Hauptuntersuchungen beibehalten.

Die Untersuchungen wurden sowohl mit ausgeschalteter Pneumatik (Fördergeschwindigkeit $v_F = 0 \text{ m/s}$) als auch mit Fördergeschwindigkeiten von $v_F = 20 \text{ m/s}$ und 30 m/s durchgeführt, was dem Bereich der Saug-Flug-Förderung entspricht. Die Reynoldszahl der Rohrströmung liegt damit je nach Rohrdurchmesser im Bereich von $Re = 1.1 - 4.1 \times 10^5$, d.h. deutlich oberhalb der kritischen Reynoldszahl $Re_{\text{krit}} = 2300$, die den Umschlag der laminaren in die turbulente Strömung charakterisiert. Abbildung 4 zeigt die Strömungsprofile in der Rohrleitung am

Beispiel des Durchmessers $D = 200$ mm und mittlerer Fördergeschwindigkeiten von $v_F = 15$, 25 und 30 m/s, die mit Hilfe der Laser-Doppler-Anemometrie gemessen wurden [15]. Die über den Rohrquerschnitt gemittelte RMS-Geschwindigkeit, die u.a. als Maß der Turbulenz herangezogen werden kann, wurde bei der maximalen Fördergeschwindigkeit von 30 m/s zu ca. 1.9 m/s bestimmt. Örtlich wurden jedoch RMS-Werte bis zu 8 m/s gemessen. Der gemittelte Wert ist damit vergleichbar der RMS-Geschwindigkeit im 1 m³-Behälter zur Bestimmung der Explosionskenngrößen, gemessen nach der Standardzündverzögerungszeit von $t_v = 0.6$ s [15,21]. Die örtlichen Spitzenwerte liegen dagegen deutlich höher.

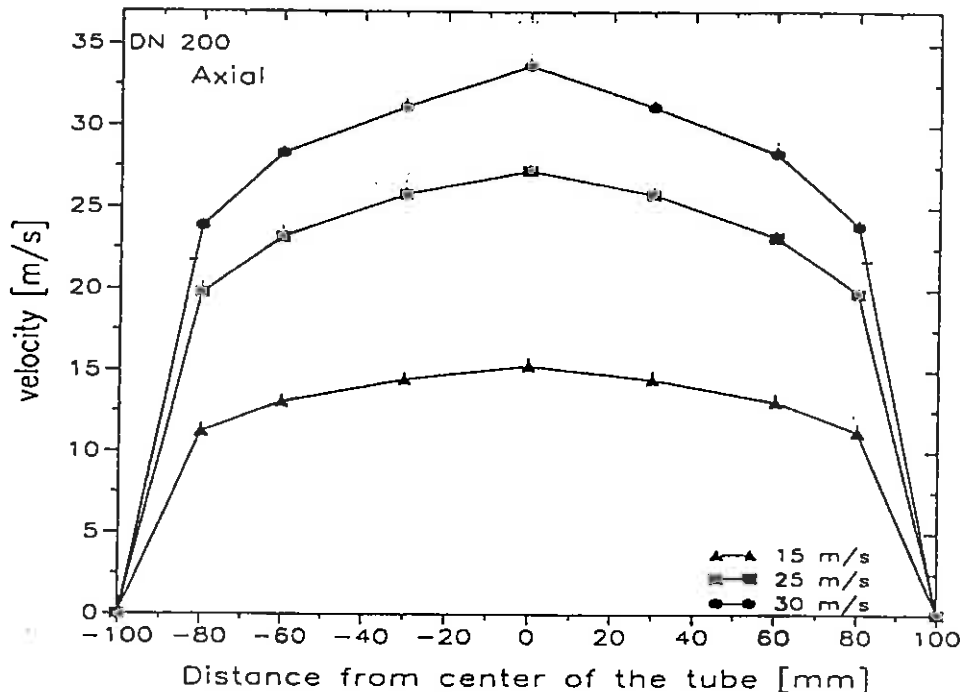


Abb.4: Strömungsprofil in der Rohrleitung mit Durchmesser $D = 200$ mm in Abhängigkeit der Fördergeschwindigkeit [15]

Im Gegensatz zu den Untersuchungen in [16], bei denen sich der Zündort stets innerhalb der Rohrleitung befand, kann auf Grund der neuen Versuchsanordnung die Staubkonzentration in der Rohrleitung nicht mit gleicher Präzision eingestellt werden. Der Grund liegt darin, daß selbst bei abgeschalteter Pneumatik (Fördergeschwindigkeit $v_F = 0$ m/s) nach der Entzündung des Staub/Luft-Gemisches im Behälter prinzipiell ein Vorschub von unverbranntem Staub in die angeschlossenen Rohrleitungen erfolgt.

Im Falle eingeschalteter Pneumatik wird bereits mit Beginn der Staubwolkenerstellung im Behälter Staub in die Rohrleitung in Richtung Zyklon eingesaugt. Um auch im unteren Rohrstrang, d.h. vom Behälter aus betrachtet entgegen der Strömungsrichtung, eine entsprechende Staubkonzentration erstellen zu können, wurde unmittelbar nach der Luftansaugöffnung der Rohrleitung eine Differentialdosierwaage mit Doppelförderschnecke zur Produkteinschleusung installiert (siehe Abb. 2).

Die Staubkonzentration in der Rohrleitung wurde auf optoelektronischer Basis nach dem Prinzip der Transmissionsmessung kontinuierlich gemessen [16,18].

Prinzipiell wurden alle Versuche mit abgeschalteter Pneumatik sowie mit Fördergeschwindigkeiten von $v_F = 20$ m/s und 30 m/s gefahren.

4. Ergebnisse

4.1 Explosionsablauf in Rohrleitungen mit Durchmesser $D = 200$ mm

Am Beispiel von Maisstärke - und Weizenmehlexplosionen konnte die interessante Feststellung gemacht werden, daß unabhängig vom reduzierten Explosionsdruck im Behälter und unabhängig von der Fördergeschwindigkeit in den angeschlossenen Rohrleitungen, die im Bereich von 0 bis 30 m/s variiert wurde, die Flammenfortpflanzung in und gegen die Förderrichtung erfolgen kann. Dabei spielt es keine Rolle, ob zusätzlich Staub in die Rohrleitungen eingebracht wird. Der Vorschub von unverbranntem Staub aus dem vorgeschalteten Behälter ist stets ausreichend, um eine Flammenfortpflanzung zumindest über die im Versuch verwendete Rohrlänge von 25.5 m auch gegen die ursprüngliche Strömungsrichtung zu erhalten. Für genauere Aussagen hinsichtlich der Anordnung von Entkopplungseinrichtungen war es jedoch erforderlich, die Bedingungen zu ermitteln, die zu den kürzesten Flammenlaufzeiten führen.

Zunächst wurde die Staubkonzentration gemessen, die durch das Radial-Saug-Gebläse in die obere Rohrleitung zwischen Behälter und Zyklon eingesaugt wird, sobald im Behälter die Erstellung des Staub/Luft-Gemisches mittels Ringdüsen erfolgt. So wurden bei einer Fördergeschwindigkeit von 20 m/s Staubkonzentrationen im Bereich von 240 - 330 g/m³ gemessen und bei Anhebung der Fördergeschwindigkeit auf 30 m/s stiegen die Meßergebnisse in den Bereich von 330 - 390 g/m³ an. In der unteren Rohrleitung, vom Behälter aus betrachtet entgegen der Strömungsrichtung, konnte mit Hilfe der Differentialdosierwaage und Doppelförderschnecke die gewünschte Staubkonzentration realisiert werden.

Abbildung 5 zeigt den Flammenlaufweg als Funktion der Flammenlaufzeit, die am Beispiel einer Maisstärkeexplosion und einem reduzierten Explosionsüberdruck im Behälter von $p_{red} = 1.5$ bar in Abhängigkeit verschiedener Fördergeschwindigkeiten in Förderrichtung gemessen wurde. Abbildung 6 zeigt die bei den gleichen Versuchen gemessenen Werte gegen die Förderrichtung, d.h. im unteren Rohrarm in Richtung Produktaufgabe bzw. Luftansaugöffnung.

Bei den in den folgenden Abbildungen aufgetragenen Meßwerten handelt es sich um die Ergebnisse des jeweils heftigsten von mehreren Vergleichsversuchen. Die Streubreite der Meßergebnisse betrug bei den Flammenlaufzeiten ca. ± 10 % und bei den Drücken ca. ± 20 %.

Aus Abbildung 5 kann entnommen werden, daß die kürzesten Flammenlaufzeiten mit einer Fördergeschwindigkeit von $v_F = 30$ m/s gemessen wurden, wenngleich die Unterschiede gegenüber dem Betriebszustand "Pneumatik Aus" ($v_F = 0$ m/s) relativ gering sind. Die Ursache ist auf die primäre Explosion im Behälter und die hierdurch hervorgerufene Expansionsströmung in den angeschlossenen Rohrleitungen zurückzuführen, die sehr viel höhere Strömungsgeschwindigkeiten erreicht als die ursprüngliche Fördergeschwindigkeit der Pneumatik beträgt.

Auch entgegen der Förderrichtung (Abbildung 6) kann unter Berücksichtigung der unterschiedlichen Zeitpunkte des Flammeneintritts in die Rohrleitung festgestellt werden, daß die kürzesten Flammenlaufzeiten mit einer Fördergeschwindigkeit von 30 m/s und damit bei maximaler Turbulenz des Staub/Luft-Gemisches erzielt werden. In diesem Zweig der Rohrleitung war es erforderlich, durch zusätzliche Staubeinschleusung eine Staubkonzentration von ca. 250 g/m³ zu erstellen, um die maximalen Flammengeschwindigkeiten zu erhalten.

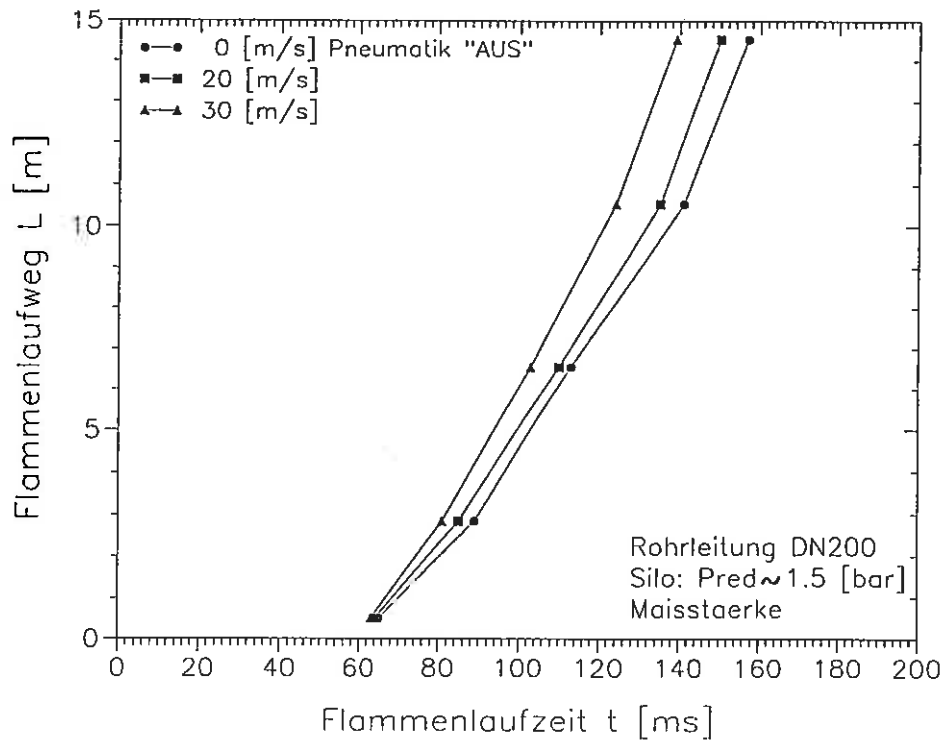


Abb.5: Flammenlaufweg als Funktion der Flammenlaufzeit in Förderrichtung - Rohrdurchmesser $D = 200$ mm, reduzierter Explosionsüberdruck im Behälter $p_{red} = 1.5$ bar, Maisstärke -

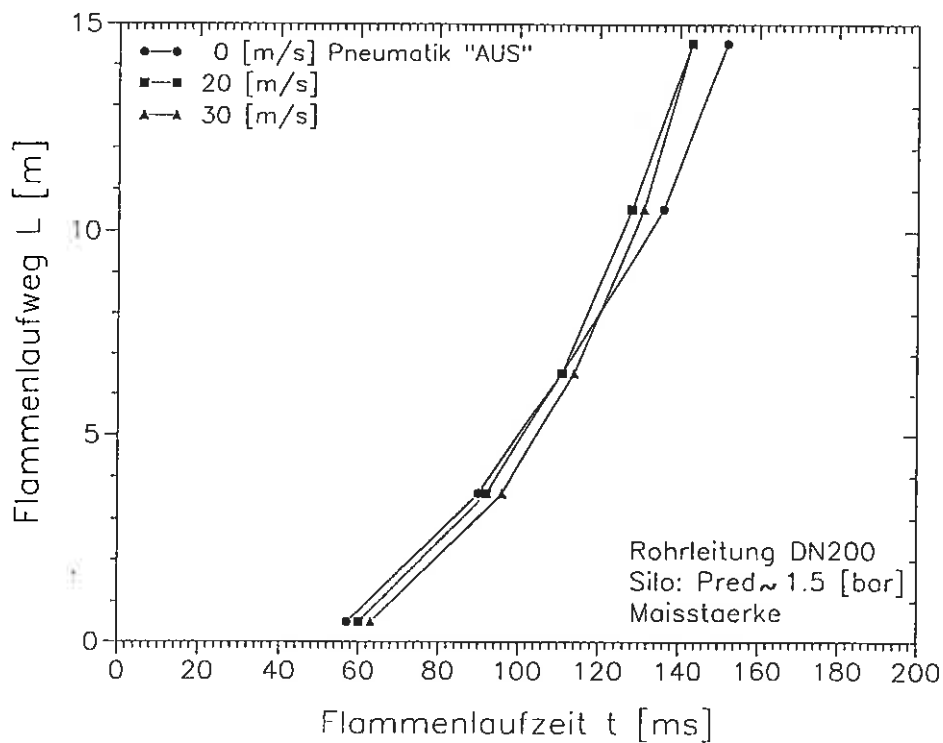


Abb.6: Flammenlaufweg als Funktion der Flammenlaufzeit gegen die Förderrichtung - Rohrdurchmesser $D = 200$ mm, reduzierter Explosionsüberdruck $p_{red} = 1.5$ bar, Maisstärke -

Zielsetzung der weiteren Versuche war es, den Einfluß des Explosionsablaufs im druckentlasteten Behälter auf die Flammenfortpflanzung in den Rohrleitungen näher zu untersuchen. Hierzu wurden durch Variation der Druckentlastungsflächen von 0.3 m^2 bis 0.75 m^2 unterschiedliche zeitliche Explosionsdrücke im Behälter erzeugt.

Um eine bessere Vergleichbarkeit der Meßergebnisse zu ermöglichen, werden bei den folgenden Betrachtungen die Weg-Zeit-Diagramme der Flammenfront auf die erste Meßstelle der Rohrleitung bezogen (0.5 m nach dem Behälter), d.h. Flammenlaufweg und Flammenlaufzeit ab dieser Meßstelle aufgetragen.

In Abbildung 7 ist in Förderrichtung gemessen der Flammenlaufweg als Funktion der Flammenlaufzeit in Abhängigkeit des reduzierten Explosionsüberdrucks im Behälter aufgetragen. Die abschnittsweise ermittelten mittleren Flammenfrontgeschwindigkeiten sind ebenfalls angegeben. Mit zunehmendem reduziertem Explosionsüberdruck p_{red} wird die Flammenlaufzeit kürzer und zwischen dem 10. und 15. Rohrleitungsmeter erreicht die Flammenfrontgeschwindigkeit bis zu 267 m/s .

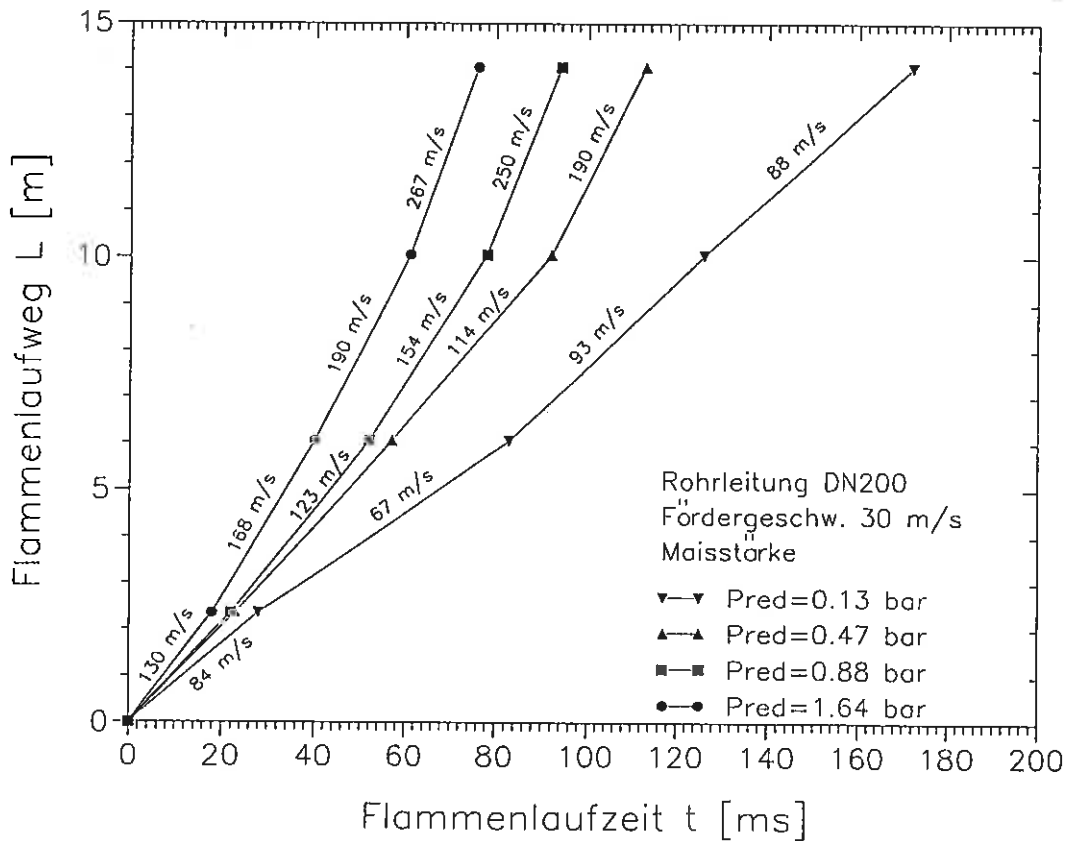


Abb.7: Flammenlaufweg als Funktion der Flammenlaufzeit in Förderrichtung in Abhängigkeit des reduzierten Explosionsüberdrucks im 9.4 m^3 -Behälter - Rohrlungsdurchmesser $D = 200 \text{ mm}$, Fördergeschwindigkeit $v_f = 30 \text{ m/s}$, Maisstärke -

Abbildung 8 zeigt am Beispiel des Versuchs mit einem reduzierten Explosionsüberdruck $p_{\text{red}} = 1.64 \text{ bar}$ im Behälter die zeitlichen Druckverläufe an verschiedenen Meßorten der Rohrleitung, die gegen die Förderrichtung gemessen wurden. Zusätzlich ist die zeitliche Lage der Flammenfront in den Oszillogrammen angegeben, die im vorliegenden Beispiel nach einem

Laufweg von ca. 16 m eine maximale Flammenfrontgeschwindigkeit von ca. 600 m/s erreicht. Man erkennt, daß sich die Flammenfront in ein Gebiet zunehmender Vorkompression bewegt und in Folge der Verbrennung ein neues Druckmaximum auftritt. Mit zunehmender Flammenfrontgeschwindigkeit steilt sich die Druckwelle auf und am Meßort nach 18,55 m ist das Druckmaximum mit 4 bar deutlich höher als im druckentlasteten Behälter.

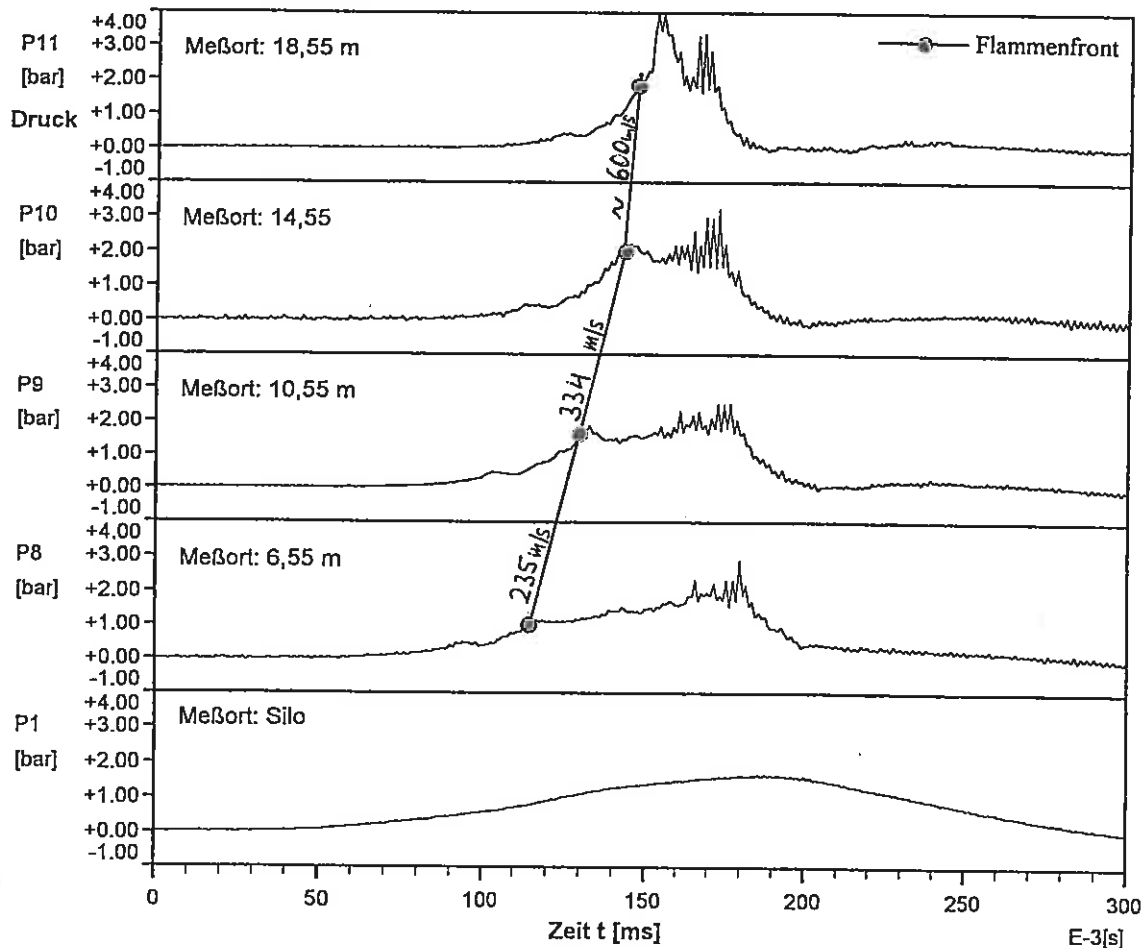


Abb.8: Zeitliche Drücke und Lage der Flammenfront an verschiedenen Meßorten entlang der Rohrleitung bei einem reduzierten Explosionsüberdruck $p_{\text{red}} = 1.64$ bar im vorgeschalteten Behälter - Rohrleitungsdurchmesser $D = 200$ mm, Fördergeschwindigkeit $v_F = 30$ m/s, Meßwerte gegen die Förderrichtung, Maisstärke (Versuch Nr.15) -

Wesentlich andere Verhältnisse hinsichtlich Flammenfortpflanzung und zeitlichem Druck in der Rohrleitung ergeben sich bei einem schwachen Explosionsablauf im Behälter, wie beispielhaft mit einem reduzierten Explosionsüberdruck von $p_{\text{red}} = 0.13$ bar in Abbildung 9 gezeigt werden kann.

Auf Grund des niedrigen Explosionsdrucks im Behälter ist die Expansionsströmung in der Rohrleitung erheblich geringer als im Beispiel zuvor. In der Rohrleitung bilden sich Druckschwingungen aus, wie sie bei Zündortlage an einem offenen Rohrende in [16] beschrieben wurden.

Der maximale Explosionsüberdruck in der Rohrleitung erreicht lediglich ca. 0.2 bar und ist damit niedriger als die Druckwelle, die auf Grund der Sekundärexplosion im nachfolgenden druckentlasteten Zyklon verursacht wird und ein Maximum von ca. 0.35 bar aufweist.

In Abbildung 9 ist diese Druckwelle nach ca. 340 - 360 ms an allen Meßorten zu sehen und durchläuft die Rohrleitung auf Grund der heißen Verbrennungsgase mit überhöhter Schallgeschwindigkeit von ca. 700 m/s zurück in Richtung 9.4 m³-Behälter.

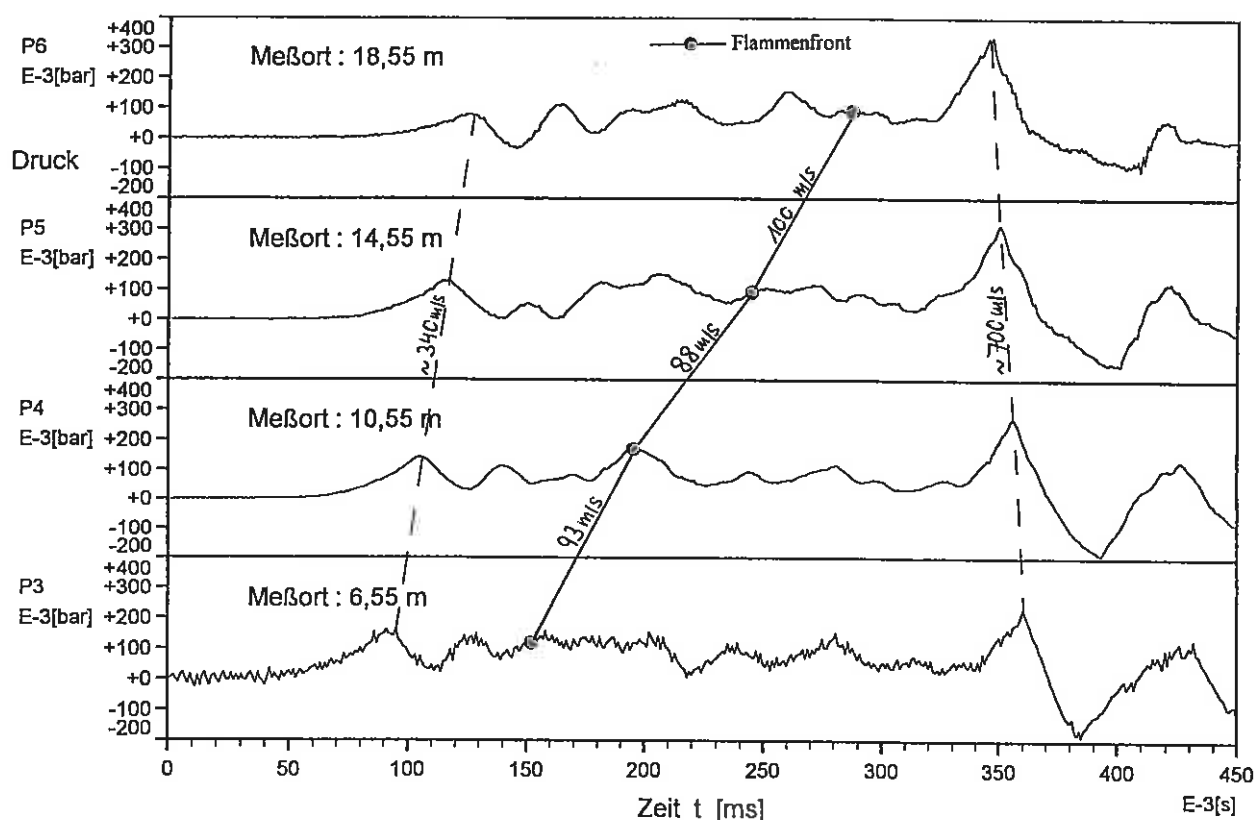


Abb.9: Zeitliche Drücke und Lage der Flammenfront an verschiedenen Meßorten entlang der Rohrleitung bei einem reduzierten Explosionsüberdruck $p_{\text{red}} = 0.13$ bar im vorgeschalteten Behälter - Rohrlungsdurchmesser $D = 200$ mm, Fördergeschwindigkeit $v_F = 30$ m/s, Meßwerte in Förderrichtung, Maisstärke (Versuch Nr.22) -

Interessant ist der Vergleich der Flammenfortpflanzung in und gegen die Förderrichtung, was Abbildung 10 entnommen werden kann. Im Falle eines relativ hohen reduzierten Explosionsüberdrucks von 0.88 bar bzw. 1.64 bar, der mit einem erheblich steileren Druckanstieg verknüpft ist als ein schwacher Explosionsverlauf mit 0.13 bar, sind die Unterschiede zwischen den Flammenlaufzeiten nur gering, da rasche Strömungsumkehr in der Rohrleitung gegen die ursprüngliche Förderrichtung zur Produktaufgabe hin erfolgt. Bei nur geringem reduzierten Explosionsüberdruck im Behälter von $p_{\text{red}} = 0.13$ bar erfolgt die Flammenfortpflanzung gegen die Förderrichtung gegenüber der Ausbreitung in Förderrichtung dagegen zeitlich stark verzögert, was sich speziell in der Anlaufphase zeigt.

Nach einem Flammenlaufweg von 3 bis 4 m erfolgt die Flammenfortpflanzung jedoch auch hier ähnlich derjenigen in Förderrichtung.

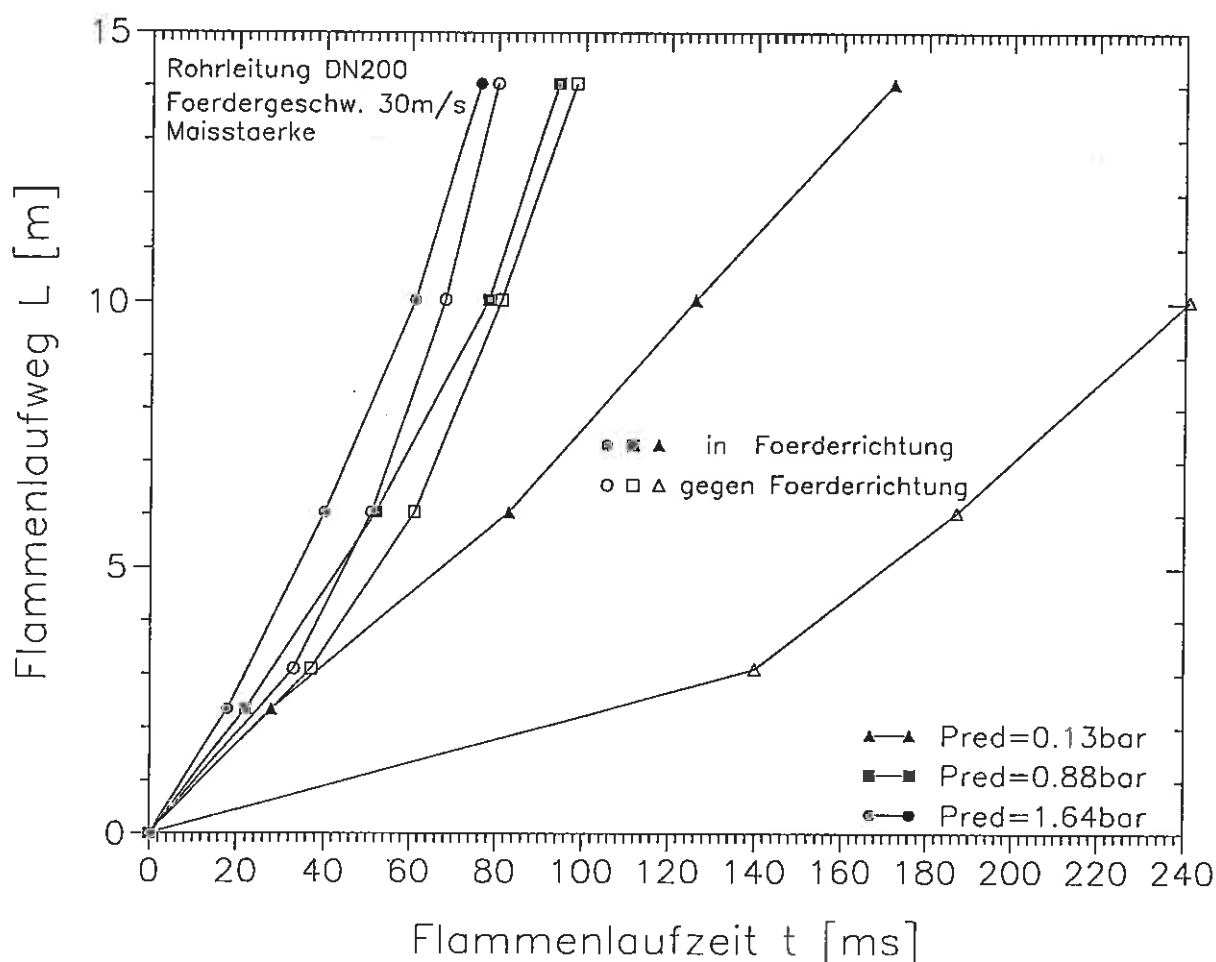


Abb.10: Flammenlaufweg als Funktion der Flammenlaufzeit in und gegen die Förderrichtung in Abhängigkeit des reduzierten Explosionsdruckes im 9.4 m³-Behälter - Rohrlängendurchmesser D = 200 mm, Fördergeschwindigkeit $v_F = 30$ m/s, Maisstärke -

In den Abbildungen 8 und 9 wurden typische zeitliche Druckverläufe aus der Rohrleitung am Beispiel einer schwachen und einer heftigen Explosion im vorgeschalteten Behälter gezeigt. Mit Ausnahme schwacher Behälterexplosionen ($p_{red} < 0.2$ bar) und somit geringer Expansionsströmung in den angeschlossenen Rohrleitungen konnte prinzipiell festgestellt werden, daß die örtlichen Drücke mit fortschreitender Flammenfront ansteigen und die maximalen Drücke am Ende der Rohrleitung auftreten.

In Abbildung 11 wird das örtliche Druckmaximum in der Rohrleitung als Funktion des Flammenlaufwegs am Beispiel verschiedener reduzierter Explosionsdrücke im Behälter und für die Fälle $v_F = 0$ m/s (Pneumatik "Aus") und Fördergeschwindigkeit $v_F = 30$ m/s dargestellt.

Die maximalen Drücke zum Rohrleitungsende hin sind nahezu unabhängig von der Fördergeschwindigkeit und Förderrichtung. Bis zum ca. 14. Rohrleitungsmeter treten jedoch gegen die Förderrichtung höhere Drücke auf als in Förderrichtung bzw. wie dies bei abgeschalteter Pneumatik der Fall ist, was u. a. durch den höheren dynamischen Druck zum Beginn der Flammenfortpflanzung gegen die ursprüngliche Rohrströmung erklärt werden kann.

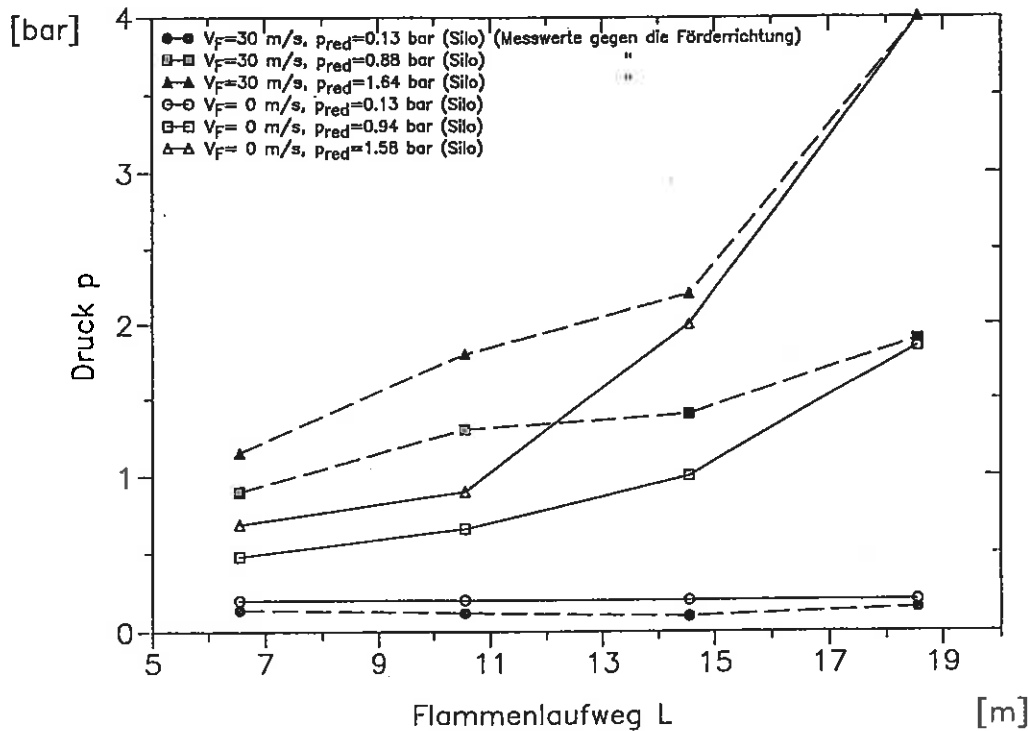


Abb.11: Druck p als Funktion des Flammenlaufwegs L in der Rohrleitung in Abhängigkeit des reduzierten Explosionsdrucks im Behälter mit Fördergeschwindigkeit $v_F = 30$ m/s gegen die Förderrichtung und $v_F = 0$ m/s - Rohrdurchmesser $D = 200$ mm, Maisstärke -

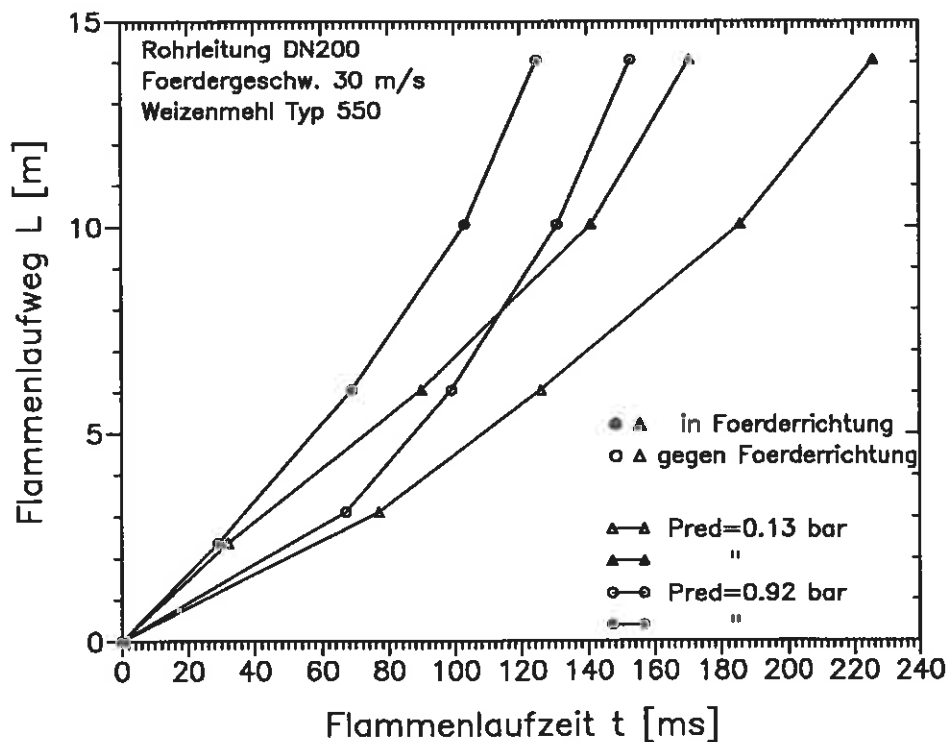


Abb.12: Flammenlaufweg L als Funktion der Flammenlaufzeit t in und gegen die Förderrichtung für verschiedene reduzierte Explosionsdrücke im 9.4 m³-Behälter - Rohrleitungsdurchmesser $D = 200$ mm, Fördergeschwindigkeit $v_F = 30$ m/s, Weizenmehl -

Die bisherigen Ergebnisse beziehen sich auf Maisstärke als Brennstaub, deren K_{St} -Wert mit $K_{St} = 200 \text{ bar}\cdot\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ den Grenzbereich zwischen den sogenannten St1-Stäuben und St2-Stäuben darstellt. Da der Einfluß dieser staubspezifischen Kenngröße auf Flammenlaufzeit und Druck von Interesse ist, wurden die zuvor beschriebenen Untersuchungen auf Weizenmehl mit einer staubspezifischen Kenngröße von $K_{St} = 80 \text{ bar}\cdot\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ erweitert.

Abbildung 12 zeigt wiederum den Flammenaufweg als Funktion der Flammenlaufzeit sowohl in als auch gegen die Förderrichtung für unterschiedliche reduzierte Explosionsdrücke im Behälter.

Im Falle des reduzierten Explosionsdruckes von $p_{red} = 0.92 \text{ bar}$ erfolgt die Flammenfortpflanzung wie erwartet langsamer als unter vergleichbaren Verhältnissen mit Maisstärke (siehe Abb.10).

Mit $p_{red} = 0.13 \text{ bar}$ wurden in Förderrichtung dagegen ähnliche und gegen die Förderrichtung sogar kürzere Flammenlaufzeiten als mit Maisstärke gemessen.

Bei solch schwachen Explosionsabläufen wie im letztgenannten Beispiel wird die Flammenfortpflanzung in der Rohrleitung in starkem Maße von Druckschwingungen beeinflusst.

Wenn ausgeprägte Druckschwingungen wie in Verbindung mit Maisstärke als Brennstaub beobachtet werden, können diese eine oszillatorische Flammenfortpflanzung hervorrufen [16], was zu einer insgesamt längeren Flammenlaufzeit durch die Rohrleitung führen kann.

Der maximale Explosionsdruck erreichte auf Grund der deflagrativen Verbrennung des Weizenmehl/Luft-Gemisches in der Rohrleitung lediglich $p_{max} = 1 \text{ bar}$, so daß im Falle heftiger Behälterexplosionen mit $p_{red} > 1 \text{ bar}$ die maximalen Belastungen in der Rohrleitung durch die Druckwellen der Behälterexplosion verursacht wurden.

4.2 Explosionsablauf in Rohrleitungen mit Durchmesser $D = 100 \text{ mm}$

Aus früheren Untersuchungen mit Zündortlage innerhalb der Rohrleitung [16] ist bekannt, daß mit abnehmendem Durchmesser die maximale Flammengeschwindigkeit und der maximale Druck abnimmt. Als Ursache werden u.a. zunehmende Wärmeverluste auf Grund des ungünstigeren Oberflächen / Volumen - Verhältnisses angesehen.

Im Hinblick auf die Anordnung explosionstechnischer Entkopplungseinrichtungen erschien es daher sinnvoll, die experimentellen Untersuchungen mit an Behälter angekoppelten Rohrleitungen auf Durchmesser $D = 100 \text{ mm}$ zu erweitern. Die zuvor beschriebenen Versuche wurden daher auch mit diesem Rohrdurchmesser durchgeführt.

In der 100 mm - Rohrleitung unterschieden sich die Flammenlaufzeiten und Drücke in Abhängigkeit der Fördergeschwindigkeit von $v_f = 0, 20$ und 30 m/s nur gering. Tendenziell wurden die kürzesten Flammenlaufzeiten, d.h. die maximalen Flammenfrontgeschwindigkeiten, mit einer Fördergeschwindigkeit von $v_f = 30 \text{ m/s}$ gemessen. Dabei wurde im unteren Rohrsegment (siehe Abbildung 2) mit Strömungsrichtung zum Behälter eine Staubbelastung des Förderstromes von 150 g/m^3 erstellt, um die Maximalwerte zu erzielen.

Abbildung 13 zeigt die Flammenlaufzeit als Funktion des Flammenlaufwegs in Abhängigkeit des reduzierten Explosionsdruckes im vorgeschalteten 9.4 m³-Behälter, die in Verbindung mit Maisstärke in der 100 mm - Rohrleitung in und gegen die Förderrichtung gemessen wurde.

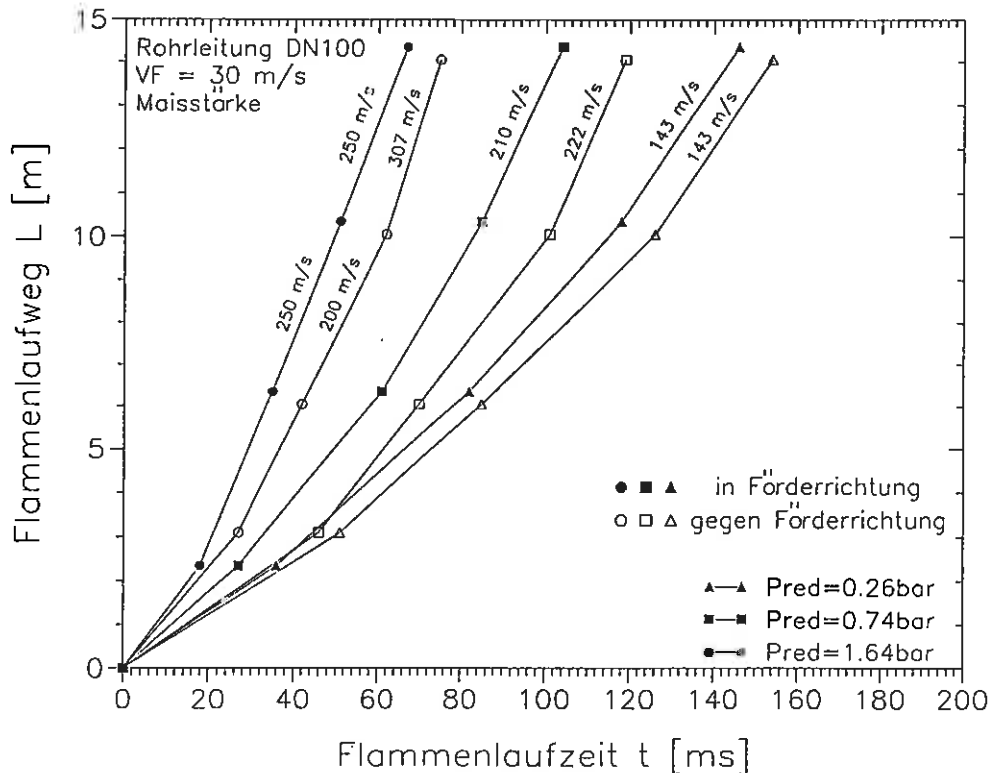


Abb. 13: Flammenlaufweg als Funktion der Flammenlaufzeit in und gegen die Förderrichtung in Abhängigkeit des reduzierten Explosionsdruckes im 9.4 m³-Behälter - Rohrdurchmesser $D = 100$ mm, Fördergeschwindigkeit $v_f = 30$ m/s, Maisstärke -

Die in Abbildung 13 dargestellten Messergebnisse waren zunächst überraschend, denn bezogen auf gleichen Flammenlaufweg in der Rohrleitung sind die Flammenlaufzeiten mit Rohrdurchmesser $D = 100$ mm ähnlich oder sogar kürzer als die mit Rohrdurchmesser $D = 200$ mm erhaltenen Messwerte. Die Ergebnisse schienen im Widerspruch zu den Untersuchungen, bei denen die Staub/Luft-Gemische innerhalb der Rohrleitung entzündet wurden [16]. Die Ursache für die rasche Flammenfortpflanzung in diesem engen Rohrquerschnitt ist jedoch in der starken Expansionsströmung zu finden, die auf Grund der Primärexplosion im Behälter in der Rohrleitung hervorgerufen wird.

Diese Expansionsströmung ist zumindest im Bereich von Rohrlängen bis zu 15 m, der für den Einbau explosionstechnischer Entkopplungseinrichtungen von Interesse ist, von entscheidendem Einfluß auf die Flammenlaufzeit bzw. die Flammengeschwindigkeit. Dies verdeutlicht auch der relativ geringe Unterschied zwischen den Flammenlaufzeiten in und gegen die Förderrichtung in Abbildung 13.

Wird die Explosion aus dem Behälter in die Rohrleitung übertragen, so ist erst nach einem Flammenlaufweg von $L > 15$ m davon auszugehen, daß mit zunehmendem Rohrdurchmesser die maximale Flammengeschwindigkeit ansteigt.

Abbildung 14 zeigt den Druck als Funktion des Flammenlaufwegs in der 100 mm - Rohrleitung in Abhängigkeit des reduzierten Explosionsdrucks im vorgeschalteten 9.4 m³-Behälter. Als "worst case" sind die Meßergebnisse entgegen der Förderrichtung dargestellt, da unter diesen Bedingungen entsprechend den Ausführungen in Kapitel 4.1 die höheren Drücke auftraten.

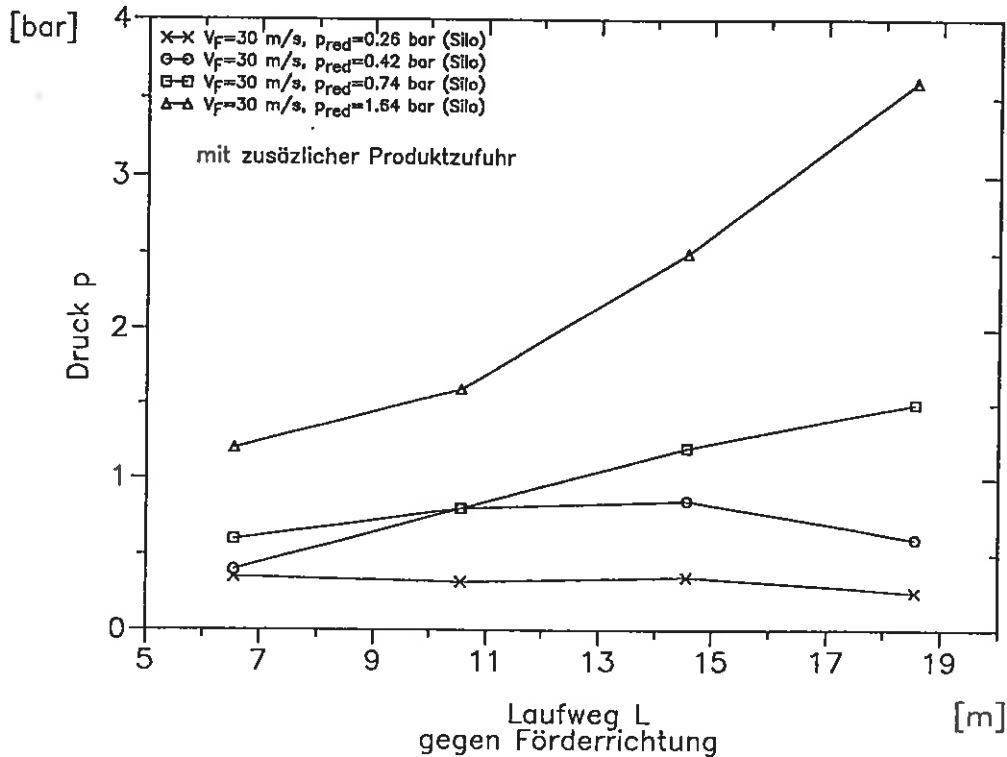


Abb.14: Druck p als Funktion des Flammenlaufwegs L in der Rohrleitung am Beispiel unterschiedlicher reduzierter Explosionsdrücke im Behälter - Meßwerte gegen die Förderrichtung, Fördergeschwindigkeit $v_F = 30$ m/s, Rohrdurchmesser $D = 100$ mm, Maisstärke -

Weitere Versuche wurden mit Weizenmehl ($K_{St} = 80$ bar.m.s⁻¹) durchgeführt. In Abbildung 15 wird wiederum der Flammenlaufweg als Funktion der Flammenlaufzeit am Beispiel reduzierter Explosionsüberdrücke von $p_{red} = 0.5$ bar und 0.8 bar im 9.4 m³-Behälter gezeigt.

Die Unterschiede zwischen den Flammenlaufzeiten in und gegen die Förderrichtung sind relativ gering und im Falle des Versuchs mit $p_{red} = 0.8$ bar traten entgegen der Förderrichtung sogar die geringfügig kürzeren Flammenlaufzeiten auf.

Sehr interessant war die Feststellung, daß auch in Verbindung mit schwachen Behälterexplosionen ($p_{red} = 0.1 - 0.2$ bar) und mit Fördergeschwindigkeiten von $v_F = 30$ m/s stets Flammenfortpflanzung gegen die Förderrichtung auftrat, was im Gegensatz zu den experimentellen Untersuchungen mit Zündort innerhalb der Rohrleitung stand [16].

Diese Beobachtung verdeutlicht erneut den dominierenden Einfluß der Expansionsströmung aus dem vorgeschalteten druckentlasteten Behälter auf die Flammenfortpflanzung in den angeschlossenen Rohrleitungen.

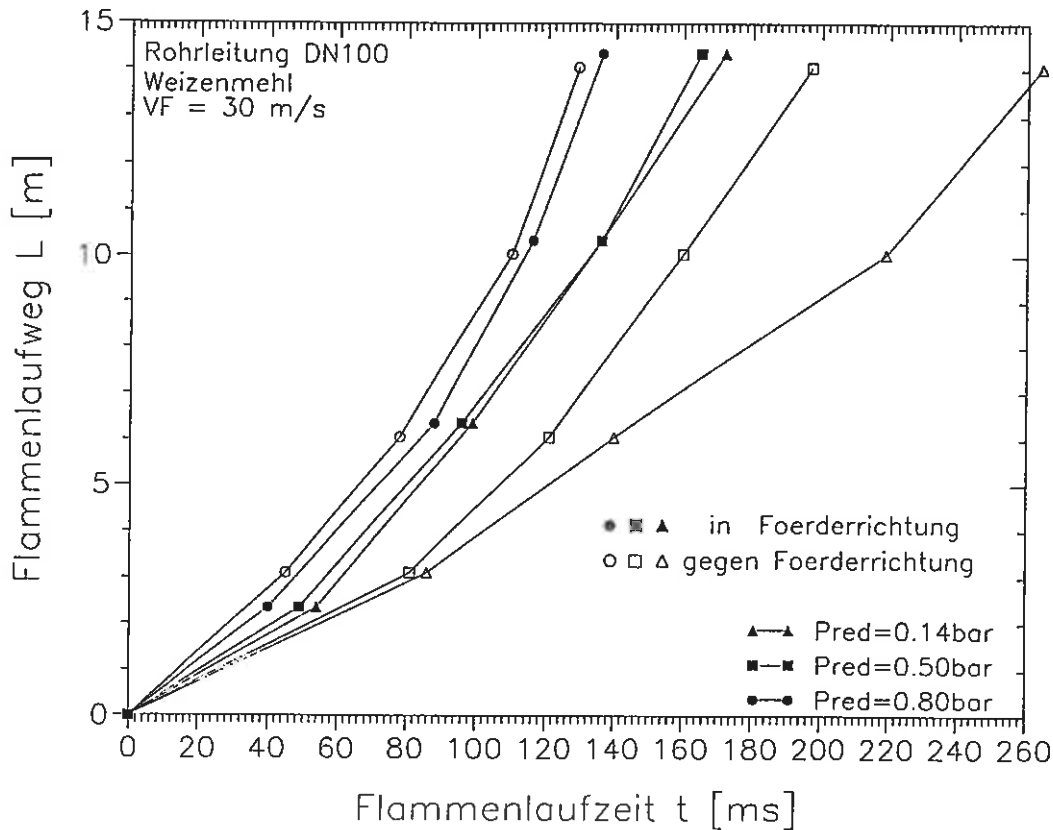


Abb.15: Flammenlaufweg L als Funktion der Flammenlaufzeit t in und gegen die Förderrichtung für verschiedene reduzierte Explosionsdrücke im 9.4 m³-Behälter - Rohrlängendurchmesser D = 100 mm, Fördergeschwindigkeit $v_F = 30$ m/s, Weizenmehl -

5. Diskussion der Ergebnisse und Schlußfolgerungen für die praktische Anwendung

Die Versuchsergebnisse über den Ablauf von Staubexplosionen, die von Behältern oder Apparaten ausgehen und durch Rohrleitungen übertragen werden können, haben interessante Erkenntnisse zu Fragen der explosionstechnischen Entkopplung von Anlagenkomponenten erbracht.

Die Untersuchungen haben eindeutig gezeigt, daß selbst in leeren Rohrleitungen ohne relevante Staubablagerungen mit einer Flammenfortpflanzung über mehr als 25 m gerechnet werden muß, da der Vorschub von unverbranntem Staub aufgrund einer primären Staubexplosion in einem angeschlossenen Behälter hierfür ausreichen kann.

Im Gegensatz zu den Untersuchungen, bei denen die Entzündung der Staub/Luft-Gemische direkt in der Rohrleitung erfolgte [16], besitzen bei der Explosionsübertragung in die Rohrleitung Rohrströmungen mit Strömungsgeschwindigkeiten ≤ 30 m/s sowie die Strömungsrichtung nur einen geringen Einfluß auf die Flammenfortpflanzung. Die Ursache ist im dominierenden Einfluß der Expansionsströmung zu finden, die trotz Druckentlastung durch die heißen Verbrennungsgase der Primärexplosion im Behälter hervorgerufen wird.

Selbst bei Verwendung des engeren Rohrdurchmessers von $D = 100$ mm, einer Fördergeschwindigkeit $v_F = 30$ m/s, Weizenmehl als Brennstaub ($K_{St} = 80$ bar.m.s⁻¹) und einem nur geringen reduzierten Explosionsüberdruck von $p_{red} < 0.2$ bar im Behälter, konnte

Flammenfortpflanzung in der Rohrleitung auch gegen die Strömungsrichtung festgestellt werden.

Dies wurde unter vergleichbaren Bedingungen, jedoch bei Zündortlage innerhalb der Rohrleitung, in keinem Falle beobachtet.

Einfluß des Rohrdurchmessers

Ein wesentlicher Unterschied zwischen den Ergebnissen, die bei Zündortlage innerhalb der Rohrleitung und bei Zündortlage in einem vorgeschalteten Behälter erzielt wurden, besteht in der Abhängigkeit der Flammenlaufzeit vom Durchmesser der Rohrleitung:

Bei Zündortlage im Behälter sind die Flammenlaufzeiten in der 100 mm - Rohrleitung zumindest bis zum 15. Rohrleitungsmeter ähnlich oder sogar geringfügig kürzer, d.h. die Flammenfrontgeschwindigkeit relativ zur Rohrwandung gesehen teilweise höher, als in der Rohrleitung mit 200 mm Durchmesser. Auch hier ist die Ursache wiederum in der Expansionsströmung zu sehen, deren Geschwindigkeit im engeren Rohrdurchmesser höhere Werte erreichen kann. Die aufgrund geringerer Wärmeverluste im größeren Rohrdurchmesser zu erwartende höhere Flammengeschwindigkeit innerhalb des Staub/Luft-Gemisches kann dadurch offenbar mehr als kompensiert werden.

Nach den festgestellten Tendenzen der experimentellen Untersuchungen mit Zündortlage im Behälter kann davon ausgegangen werden, daß sich die Flammenlaufzeiten bei Betrachtung eines maximalen Flammenlaufwegs von $L_{\max} = 15$ m mit zunehmendem Rohrdurchmesser verlängern. Erst nach einem längeren Flammenlaufweg von $L > 15$ m, d.h. bei größerem Längen/Durchmesser - Verhältnis der Rohrleitung, muß mit höheren Flammengeschwindigkeiten gerechnet werden.

Es kann daher die Annahme getroffen werden, daß die gemessenen Flammenlaufzeiten bis zu einem maximalen Flammenlaufweg $L_{\max} = 15$ m allgemein für Rohrdurchmesser $D \geq 100$ mm verwendet werden können, um bei der Bemessung von Mindestabständen bei explosionstechnischen Entkopplungsmaßnahmen auf der sicheren Seite zu liegen.

Einfluß des Behältervolumens

Aus den zeitlichen Drücken und der örtlichen Lage der Flammenfront in Abbildung 8 ist ersichtlich, daß das Druckmaximum im vorgeschalteten Behälter erst deutlich nach dem Flammendurchlauf durch die gesamte Rohrleitung erreicht wird. Diese Beobachtung konnte bei allen Versuchen gemacht werden.

Die durch den Explosionsablauf im 9.4 m³ - Behälter induzierte Expansionsströmung steht somit während des gesamten Zeitraums der Flammenfortpflanzung in der Rohrleitung an.

Wird der maximale reduzierte Explosionsüberdruck $p_{\text{red,max}} = 2$ bar sowie die maximale RMS - Turbulenzgeschwindigkeit des Staub/Luft - Gemisches von 2 m/s zum Zündzeitpunkt [15] nicht überschritten und handelt es sich um St1 - Stäube mit $K_{\text{St}} \leq 200$ bar.m.s⁻¹, so nimmt der zeitliche Druckanstieg dp/dt im Behälter und damit die Geschwindigkeit der Expansionsströmung in der Rohrleitung mit zunehmendem Behältervolumen ab. Die bisher angegebenen Flammenlaufzeiten können daher für Behältervolumina von $V > 9$ m³ angewandt werden.

Die Reduzierung des Behältervolumens auf $V \ll 9 \text{ m}^3$, so daß im Grenzfall die Entzündung des Staub/Luft - Gemisches in der Rohrleitung erfolgt, führt zu den in [16] beschriebenen Verhältnissen und in Abbildung 1 beispielhaft gezeigten Flammenlaufzeiten.

Es ist jedoch nicht auszuschließen, daß mit Volumina im Bereich von $0.1 \text{ m}^3 < V < 9 \text{ m}^3$ und den damit verbundenen steileren zeitlichen Druckanstiegen dp/dt kürzere Flammenlaufzeiten auftreten können, als in der vorliegenden Versuchsanordnung gemessen wurden.

Es kann dennoch die Prognose gewagt werden, daß weitere Verkürzungen der Flammenlaufzeiten gering sind und damit keine Praxisrelevanz mehr besitzen, was zur Absicherung jedoch noch genaueren Untersuchungen bedarf.

Mindestabstände bei explosionstechnischen Entkopplungsmaßnahmen

Da sich die Flammenlaufzeiten bei den untersuchten Rohrdurchmessern nur gering unterscheiden und auch der Einfluß von Fördergeschwindigkeit und Förderrichtung relativ gering ist (siehe Abbildung 5 und 6), erscheint es sinnvoll, für die praktische Anwendung zur Festlegung der Mindestabstände zwischen Detektions - und Entkopplungseinrichtungen solche Flammenlaufweg / Flammenlaufzeit - Diagramme zugrunde zu legen, bei denen lediglich zwischen unterschiedlichen reduzierten Explosionsüberdrücken im vorgeschalteten Behälter differenziert wird.

Unter Berücksichtigung aller Versuchsergebnisse erhält man als "worst case" die in Abbildung 16 gezeigten Diagramme, die den Flammenlaufweg als Funktion der Flammenlaufzeit für unterschiedliche reduzierte Explosionsüberdrücke im vorgeschalteten 9.4 m^3 -Behälter beschreiben. Die gemessenen Flammenlaufzeiten (Abbildung 16) lassen sich durch eine Exponentialfunktion folgender Form mathematisch approximieren:

$$L = A \exp(B \cdot t) + C$$

mit

L Flammenlaufweg in [m]

t Flammenlaufzeit in [s]

B Koeffizient in [s^{-1}]

A, C Konstante [m]

Folgende Werte wurden für die Diagramme in Abbildung 16 ermittelt:

$$p_{\text{red}} \leq 0.2 \text{ bar} : A = 8.5, C = -8.5, B = 6.8$$

$$p_{\text{red}} \leq 1.0 \text{ bar} : A = 8.5, C = -8.5, B = 10.4$$

$$p_{\text{red}} \leq 2.0 \text{ bar} : A = 8.5, C = -8.5, B = 15.7$$

Gültigkeitsbereich der Flammenlaufweg/Flammenlaufzeit - Diagramme aus Abbildung 16:

- Brennstaub: $K_{\text{St}} \leq 200 \text{ bar} \cdot \text{m} \cdot \text{s}^{-1}$ (St1-Stäube)
- Rohrdurchmesser $D \geq 100 \text{ mm}$
- Fördergeschwindigkeit $v_F \leq 30 \text{ m/s}$ (in und gegen die Förderrichtung)
- Volumen des vorgeschalteten Behälters: $V > 9 \text{ m}^3$
- maximaler reduzierter Explosionsüberdruck $p_{\text{red,max}} \leq 2 \text{ bar}$

- RMS-Turbulenzgeschwindigkeit des Staub/Luft-Gemisches zum Zündzeitpunkt: $RMS < 2$ m/s (bei pneumatischer und mechanischer Befüllung erfüllt [15,20])

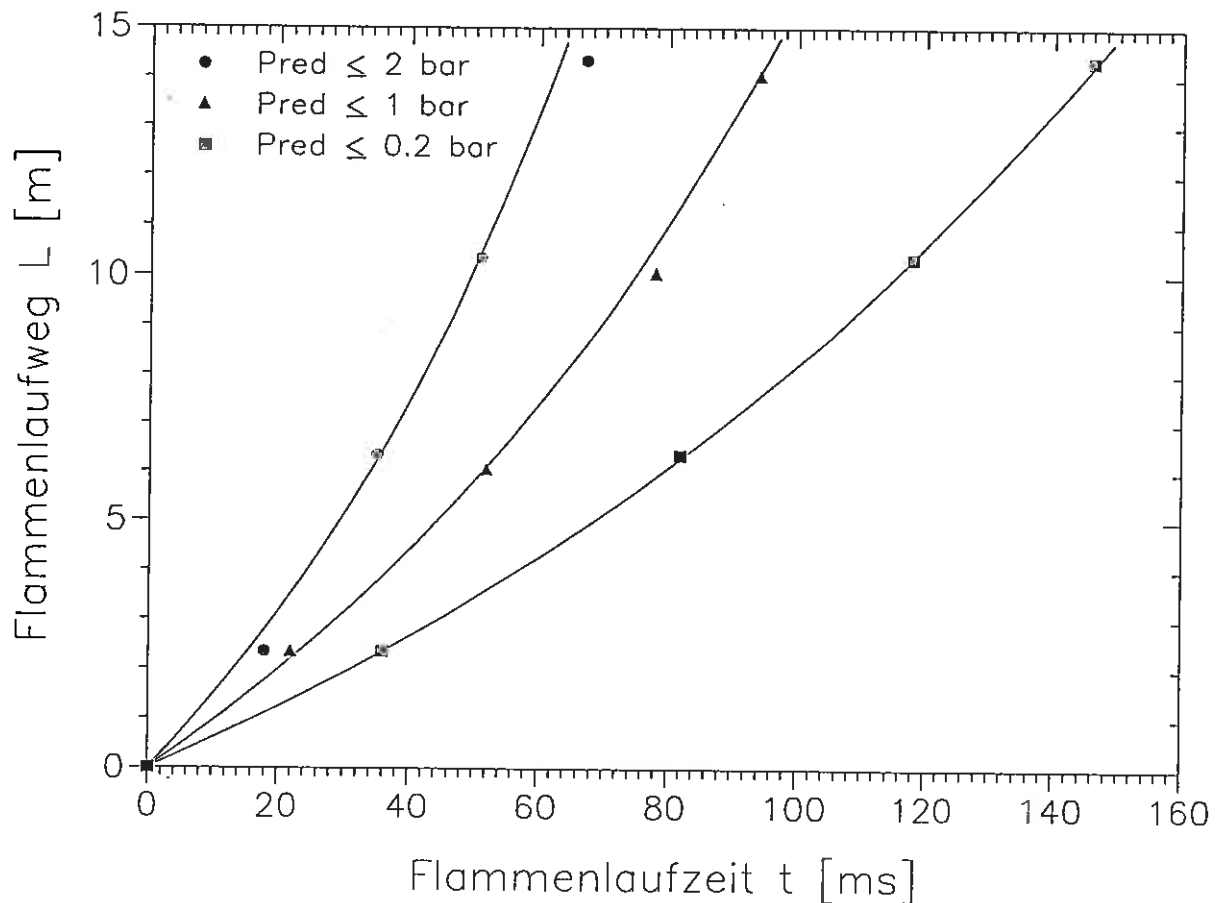


Abb.16: Flammenlaufweg L als Funktion der Flammenlaufzeit t in der Rohrleitung in Abhängigkeit des reduzierten Explosionsüberdrucks im vorgeschalteten druckentlasteten Behälter - die Meßwerte wurden mit Exponentialfunktionen approximiert (siehe Seite 19) -

Danksagung

Mein Dank für die erfolgreiche Durchführung der umfangreichen Versuchsreihen gilt den Mitarbeitern des BGN - Versuchsteams aus Mannheim und Kappelrodeck. Besonders sei Herrn Hans Wolf und Herrn Bernhard Schmäzle der Versuchsstelle Kappelrodeck für Ihr hohes Engagement gedankt.

6. Literaturangaben

- [1] Verein Deutscher Ingenieure: Staubbrände und Staubexplosionen - Gefahren - Beurteilung - Schutzmaßnahmen, VDI-Richtlinie 2263, Beuth-Verlag GmbH, Berlin, Ausgabe Mai 1992
- [2] W. Bartknecht: Explosionsschutz, Grundlagen und Anwendung, Springer-Verlag, Seite 623-758, 1993
- [3] S.Radandt: Ablauf und Auswirkungen von Staubexplosionen in der Praxis, VDI-Berichte 701, Seite 67-91, 1989
- [4] J.P.Pineau, M.Giltair, J. Dangreaux: Propagation d'explosions de poussières dans les canalisations, Centre d'études et recherches des Charbonnages de France, N° 98, 1^{er} Trimestre 1980
- [5] J.P.Pineau, G.Ronchail: Propagation of Coal Dust Explosions in Pipes, Industrial Dust Explosions, American Society for Testing and Materials, Philadelphia, Seite 74-89, 1987
- [6] W.Bartknecht: Explosionstechnische Kenndaten brennbarer Stäube in Rohren mit engen Querschnitten, Internationales Symposium über Staubexplosionsgefahren in Bergbau und Industrie, Karlovy Vary (Karlsbad), 11.-13.10.1972
- [7] W. Bartknecht: Explosionsschutz, Grundlagen und Anwendung, Springer-Verlag, Seite 267-279, 1993
- [8] S.R.Srinath, C.W.Kauffmann, J.A.Nicholls and M.Sichel: Secondary Dust Explosions, ASTM STP 958, American Society for Testing and Materials, Philadelphia, Seite 90-106, 1987
- [9] F.Zhang, H.Grönig: Transition to Detonation in Corn Starch Dust-Oxygen and Air Mixtures, Combustion and Flame No 86, Seite 21-32, 1991
- [10] R.K.Eckhoff: Dust Explosions in the Process Industries, Butterworth-Heinemann, Seite 339-353, 1991
- [11] P.R.Amyotte, S.Chippett, M.J.Pegg: Effects of Turbulence on Dust Explosions, Prog.Energy Combust.Sci., Vol:14, Seite 293-310, 1988
- [12] M.Christill, W.Nastoll, W.Leuckel, N.Zarzal: Der Einfluß von Strömungsturbulenz auf den Explosionsablauf in Staub/Luft-Gemischen, VDI-Berichte 701, Seite 123-141, 1989
- [13] K.-P.Scheuermann: Untersuchung des Einflusses der Turbulenz auf den Explosionsablauf im geschlossenen und teilentlasteten Behälter, D 82 Dissertation RWTH Aachen, 1993
- [14] F.I.Tezok, C.W.Kauffmann, M.Sichel, J.A.Nicholls: Turbulent Burning Velocity Measurements for Dust/Air Mixtures in a Constant Volume Spherical Bomb, 10. ICDERS, Prog. in Astronaut and Aeronaut, Vol. 105, Seite 184-195, 1986

- [15] F.Hauert, A.Vogl, S.Radandt: Measurement of Dust Cloud Characteristics in Industrial Plants, Final Technical Report, Forschungsgesellschaft für angewandte Systemsicherheit und Arbeitsmedizin (FSA), Mannheim, 1995
- [16] A.Vogl: Ablauf von Staubexplosionen in pneumatischen Saug-Flug-Förderanlagen, D 82 Dissertation RWTH Aachen, Asanger Verlag Heidelberg, 1995
- [17] Verein Deutscher Ingenieure: Staubbrände und Staubexplosionen - Gefahren - Beurteilung - Schutzmaßnahmen: Untersuchungsmethoden zur Ermittlung von sicherheitstechnischen Kenngrößen von Stäuben, VDI-Richtlinie 2263, Blatt 1, Beuth-Verlag GmbH, Berlin, Ausgabe Mai 1990
- [18] A. Vogl: Staubmessung, VDS-Fachtagung Staubexplosionsschutz am 18.-19. Oktober 1995, Verband der Schadenversicherer, Köln, 1995
- [19] Verein Deutscher Ingenieure: Druckentlastung von Staubexplosionen, VDI-Richtlinie 3673, Beuth-Verlag GmbH Berlin, Ausgabe Juli 1995
- [20] F.Hauert: Influence of Particle Movement and Dust Concentration on the Explosion Characteristics in Food Industry, 2. EuropEx-Seminar, Explosion Safety Matters, Gent, 1996
- [21] F.Hauert, A.Vogl, S.Radandt: Turbulenz und Staubkonzentration beim Befüllen eines 12 m³-Silos, Staub-Reinhaltung der Luft, 56 (10), 1996