

**Forschungsgesellschaft
für angewandte
Systemsicherheit und
Arbeitsmedizin**



Explosionsübertragung durch dünne Rohrleitungen

F-05-9903

Dr. Albrecht Vogl
Prof. Dr. Siegfried Radandt

Explosionsübertragung durch dünne Rohrleitungen

Dr. Albrecht Vogl, Mannheim
Prof. Dr. Siegfried Radandt, Mannheim

Zusammenfassung

Um die Fortpflanzung von Staubexplosionen durch Rohrleitungen zu verhindern, müssen zur Schadensbegrenzung explosionstechnische Entkopplungsmaßnahmen ergriffen werden.

Für die richtige Auslegung solcher konstruktiven Schutzmaßnahmen werden gute Kenntnisse über die zu erwartende Geschwindigkeit der Flammenfortpflanzung benötigt.

Trotz umfangreicher Forschungsarbeit auf diesem Gebiet konnte jedoch weder auf empirischer noch auf theoretischer Basis die Frage beantwortet werden, ob unterhalb bestimmter Rohrdurchmesser eine Staubexplosionsübertragung nicht mehr erfolgt und somit auf kostspielige Entkopplungsmaßnahmen verzichtet werden kann.

Es wurden daher zahlreiche Explosionsversuche durchgeführt, in denen Betriebsparameter sowie staubspezifische Eigenschaften Berücksichtigung fanden. Die Untersuchungen begannen mit Rohrdurchmessern von 82 mm und wurden schließlich bis auf 27 mm reduziert.

Die Forschungsergebnisse geben Auskunft über die zu erwartende zeitliche Flammenfortpflanzung in Abhängigkeit des reduzierten Explosionsüberdrucks in einem vorgeschalteten Apparat oder Behälter, in dem die Staubexplosion entzündet wird. Es wurde zusätzlich der zeitliche Explosionsüberdruck in den Rohrleitungen gemessen.

Mit den experimentellen Untersuchungen wurde festgestellt, dass die Expansionsströmung der heißen Verbrennungsgase aus dem angeschlossenen Zündbehälter in die Rohrleitung hinein als die dominierende Einflussgröße auf die Flammengeschwindigkeit zu betrachten ist. Sie spielt in den untersuchten Rohrleitungslängen und Durchmessern eine größere Rolle als die staubspezifische Explosionskenngröße K_{St} und als die Strömungsverhältnisse in der Rohrleitung vor der Entzündung des Staub/Luft-Gemisches.

Es war schließlich ein überraschendes Ergebnis, dass selbst beim engsten Rohrdurchmesser von nur 27 mm und sogar in Verbindung mit Weizenmehl ($K_{St} \approx 100$ bar.m/s) als Versuchsstaub noch Flammenübertragung über eine Rohrleitungslänge von zumindest 12 m auftrat.

Mit den Untersuchungsergebnissen wurde somit nachgewiesen, dass der Möglichkeit der Staubexplosionsübertragung auch durch Rohrleitungen mit kleinem Durchmesser ($d = 27$ mm bis 82 mm) hohe Beachtung geschenkt werden muss.

Abstract

In order to avoid the propagation of dust explosions through pipes, explosion disengagement measures must be taken to limit the effects of an explosion.

An adequate design of these protection measures requires good knowledge of the expected velocity of the flame propagation.

Despite extensive research in this field there has neither been an empirical nor a theoretical answer yet to the question whether a propagation of the dust explosion will or will not occur below a certain pipe diameter and thus expensive disengagement measures could be avoided.

A large amount of explosion tests was carried out considering both operating parameters and dust specific characteristics. The tests began with pipe diameters of 82 mm and were reduced to 27 mm.

The research results give information about the expected flame propagation as a function of time depending on the reduced explosion overpressure in connected vessels and equipment. In addition, the pressure-time-history in the pipe was measured.

When testing pipes of different length we found that the expansion flow of the hot combustion gases from the connected ignition vessel must be seen as the dominant influencing characteristic upon the flame velocity. It is more important in this case than the dust specific explosion characteristic K_{st} and the flow conditions inside the pipe before the dust/air mixture is ignited.

However, it was surprising that even with a small pipe diameter of 27 mm and even in connection with wheat flour ($K_{st} \approx 100 \text{ bar.m/s}$) used as test dust, there was a flame propagation through a pipe length of at least 12 m.

The experimental results have shown that the possibility of dust explosion propagation even through pipes of small diameters must be paid high attention.

1 Einleitung

In industriellen Anlagen sind Apparate, Behälter und Silos vielfach durch Rohrleitungen miteinander verbunden. Im Falle einer Staubexplosion besteht aus diesem Grund die Gefahr der Explosionsübertragung auch in entfernte Anlagenbereiche. Schwerwiegende Sekundärexplosionen können die Folge sein.

Zur Schadensbegrenzung müssen daher explosionstechnische Entkopplungsmaßnahmen ergriffen werden [1,2,3]. Um weiterführende Erkenntnisse für die sichere Auslegung solcher Schutzmaßnahmen zu erhalten, wurden im Großmaßstab Explosionsversuche in Rohrleitungen einer pneumatischen Saug-Flug-Förderanlage mit Rohrdurchmessern von 100 bis 200 mm durchgeführt [4,5,6].

Der Zündort befand sich entweder in der Rohrleitung selbst oder aber in einem angeschlossenen druckentlasteten Behälter.

Die Explosionsdrücke und die Flammenlaufzeiten wurden in Abhängigkeit von Betriebsparametern wie Staubbeladung des Förderluftstroms und Fördergeschwindigkeit gemessen sowie im Falle des angeschlossenen druckentlasteten Behälters zusätzlich in Abhängigkeit des reduzierten Explosionsüberdruckes im Behälter.

Im Falle der Staubexplosionsübertragung aus einem Apparat, Behälter oder Silo in eine Rohrleitung hinein hat sich gezeigt, dass die Expansionsströmung der heißen Verbrennungsgase des angeschlossenen Explosionsraums als die dominierende Einflussgröße auf die Flammenlaufzeit bzw. Flammengeschwindigkeit anzusehen ist. Dies gilt insbesondere bei der Betrachtung des Rohranfangs bis etwa zum 15. Meter der Rohrleitung.

Aus den oben genannten Untersuchungen mit Rohrdurchmessern von 100 bis 200 mm konnten für die Industriepraxis die folgenden wesentlichen Erkenntnisse gewonnen werden:

- In Förderleitungen mit Staubbeladungen $> 1000 \text{ g/m}^3$ treten nur relativ langsame Flammenfrontgeschwindigkeiten auf mit $v_{F,max} < 100 \text{ m/s}$
- Im Falle hoher Staubbeladungen $> 10 \text{ kg/m}^3$ wird die Flamme erstickt (die Übertragung von glimmendem Produkt bzw. von Glimmnestern kann jedoch nicht ausgeschlossen werden!)
- Unter günstigen Bedingungen (Staubkonzentration im Bereich von 150 g/m^3 bis 300 g/m^3 , $K_{St} > 150 \text{ bar.m/s}$) können in Rohrdurchmessern $> 100 \text{ mm}$ nach einer Rohrlänge von ca. 15 m detonationsähnliche Verbrennungsabläufe auftreten mit maximalen Flammengeschwindigkeiten $v_{F,max} > 1000 \text{ m/s}$ und mit Explosionsdrücken $p_{max} > 30 \text{ bar}$
- Selbst im Falle eines nur geringen reduzierten Explosionsüberdrucks im Behälter

($p_{red} < 0.2 \text{ bar}$) kann eine Explosionsübertragung durch angeschlossene Rohrleitungen erfolgen

- Die Bedingungen für eine Flammenfortpflanzung werden vielfach auch dann erfüllt, wenn die Rohrleitung vor der Explosion staubfrei ist. Der Vorschub von noch unverbranntem Staub aufgrund der Primärexplosion in einem Behälter oder Apparat ist in der Regel ausreichend, um eine Flammenübertragung über weite Strecken zu ermöglichen
- In [6] wird innerhalb bestimmter Anwendungsgrenzen eine empirische Gleichung zur Berechnung des Flammenlaufweges als Funktion der Flammenlaufzeit für Rohrdurchmesser $d \geq 100 \text{ mm}$ angegeben

Weder auf der Grundlage experimenteller Untersuchungen noch auf theoretischer Basis konnte jedoch die Frage beantwortet werden, ob unterhalb eines bestimmten Rohrdurchmessers nicht mehr mit einer Staubexplosionsübertragung gerechnet werden muss und somit auf kostspielige Entkopplungsmaßnahmen verzichtet werden kann.

Es war daher die Zielsetzung eines Forschungsprojekts der Forschungsgesellschaft für angewandte Systemsicherheit und Arbeitsmedizin (FSA), diese Fragestellung auf der Grundlage experimenteller Untersuchungen zu klären. Die wesentlichen Ergebnisse werden im vorliegenden Bericht vorgestellt.

2 Versuchsaufbau

Um die Übertragung von Staubexplosionen durch dünne Rohrleitungen zu untersuchen, wurden zwei explosionsdruckentlastete 1 m^3 -Behälter über eine Rohrleitung entsprechend Abbildung 1 miteinander verbunden. Einer der beiden Behälter (Behälter 2) wurde an ein Saug-Gebläse angeschlossen, so dass in der verbindenden Rohrleitung eine Strömungsgeschwindigkeit von bis zu 30 m/s erzeugt werden konnte. Die Luftansaugung erfolgte am offenen Ende einer zweiten Rohrleitung, die am Behälter 1 angeschlossen war.

Die Entzündung der Staub-/Luft-Gemische erfolgte stets im Behälter 1. Die Explosionsfortpflanzung konnte mit dieser Versuchsanordnung sowohl in Strömungsrichtung (Rohrleitung in Richtung Behälter 2) als auch entgegen die Strömungsrichtung (Luftansaugrohr) beobachtet werden.

Es wurde zunächst mit Rohrleitungen von 82 mm Innendurchmesser gearbeitet. Im weiteren Fortschritt der Untersuchungen wurden Rohrleitungen mit 42 mm und schließlich mit 27 mm Innendurchmesser verwendet. Hierbei sei bemerkt, dass die engsten in der pneumatischen Fördertechnik verwendeten Rohrdurchmesser i.A. im Bereich von 40 bis 60 mm zu finden sind.

Die maximale Rohrleitungslänge zwischen Behälter 1 und Behälter 2 betrug 12 m , die Länge der Ansaugleitung wurde zu 6 m gewählt.

Die Erstellung der Staub-/Luft-Gemische im Zündbehälter (Behälter 1) erfolgte durch Einblasen des Staubes aus einem unter 20 bar Überdruck stehenden Staubvorratsbehälter, der mit einem Schnellöffnungsventil ausgestattet war. Im Innern des Behälters wurde der Staub mit Hilfe einer Düsenanordnung dispergiert, so dass näherungsweise ein homogenes Staub/Luft-Gemisch entstand. Bei eingeschalteter Pneumatik wurde zwangsläufig Staub aus dem Behälter 1 in die Rohrleitung in Richtung Behälter 2 eingesaugt.

Bei einem Teil der Versuche wurde nach der gleichen Methode wie im Behälter 1 auch im Behälter 2 ein Staub/Luft-Gemisch erzeugt um die Zündwirksamkeit übertragener Flammen zu untersuchen. Im Behälter 2 erfolgte die Gemischerstellung gegenüber dem Behälter 1 jedoch um 150 ms zeitlich verzögert.

Als Zündquelle dienten zwei pyrotechnische Zünder mit einer Zündenergie von insgesamt $E_z = 10 \text{ kJ}$. Der Zündort befand sich mittig auf der Längsachse von Behälter 1. Die Aktivierung der Zündquelle erfolgte nach einer konstanten Zündverzögerungszeit von $t_v = 0.6 \text{ s}$ ab dem Beginn des Staubeinblasens.

P0 – P9 Druckaufnehmer
 F1 – F10 Flammenmelder
 Rohrdurchmesser $d = 82 \text{ mm}, 42 \text{ mm}, 27 \text{ mm}$

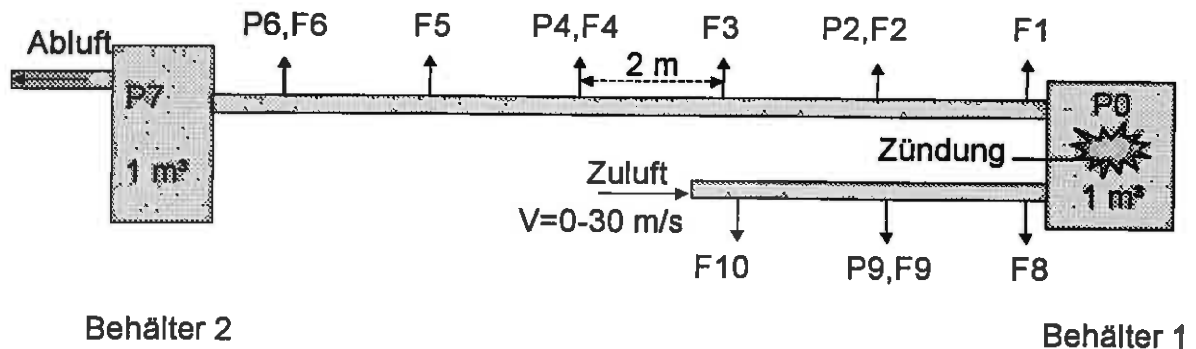


Abbildung 1: Prinzipbild des Versuchsaufbaus

Die beiden 1 m^3 - Behälter wurden auf der Oberseite jeweils mit einer runden Druckentlastungsfläche ausgerüstet. Für den Verschluss der Druckentlastungsfläche wurde eine Berstmembrane verwendet mit einem statischen Ansprechüberdruck von $p_{\text{stat}} = 0.1 \text{ bar}$. Die gewählten Druckentlastungsflächen betragen auf dem Behälter 1 wahlweise $A = 0.031, 0.07$ oder 0.125 m^2 (Durchmesser $d = 0.2, 0.3$ und 0.4 m), so dass mit den verwendeten Versuchsstäuben reduzierte Explosionsüberdrücke p_{red} im Bereich von $p_{\text{red}} = 0.1 \text{ bar}$ bis 2.8 bar erzielt werden konnten. Die Entlastungsfläche auf Behälter 2 wurde konstant zu $A = 0.07 \text{ m}^2$ gewählt.

Die zeitlichen Explosionsdrücke in den Behältern und in den Rohrleitungen wurden mit piezoelektrischen Druckaufnehmern der Fa. Kistler (P0 bis P9) und die Flammenfront in den Rohrleitungen mit Hilfe infrarotempfindlicher Flammenmelder gemessen (F1 bis F10) [4]. Die Signalaufzeichnung erfolgte mit Transientenrekordern. Die Anordnung der Messstellen kann aus dem Prinzipbild (Abbildung 1) entnommen werden.

3 Versuchsstäube

Die Versuche wurden sowohl mit Maisstärke als auch mit Weizenmehl (Typ 550) durchgeführt, die sich insbesondere hinsichtlich des K_{St} - Wertes und der Mindestzündenergie (MZE) voneinander unterscheiden. Prinzipiell erfolgte eine Trocknung der verwendeten Stäube auf einen Restfeuchtegehalt von $rF < 3 \text{ Gew.-%}$.

Die relevanten sicherheitstechnischen Kenngrößen sind in Tabelle 1 angegeben. Ihre Bestimmung erfolgte nach VDI 2263, Blatt 1 und ISO 6184/1.

Tabelle 1: Sicherheitstechnische Kenngrößen der Versuchsstäube

Produkt	UEG [g/m ³]	p _{max} [bar]	K _{St} [bar.m.s ⁻¹]	MZE [mJ]	T _Z [°C]
Maisstärke	60	9	200	5	400
Weizenmehl Typ 550	60	8.5	120	20	390

UEG untere Explosionsgrenze
 p_{max} maximaler Explosionsüberdruck
 K_{St} spezifische Explosionskenngröße
 MZE Mindestzündenergie
 T_Z Zündtemperatur (BAM-Ofen)

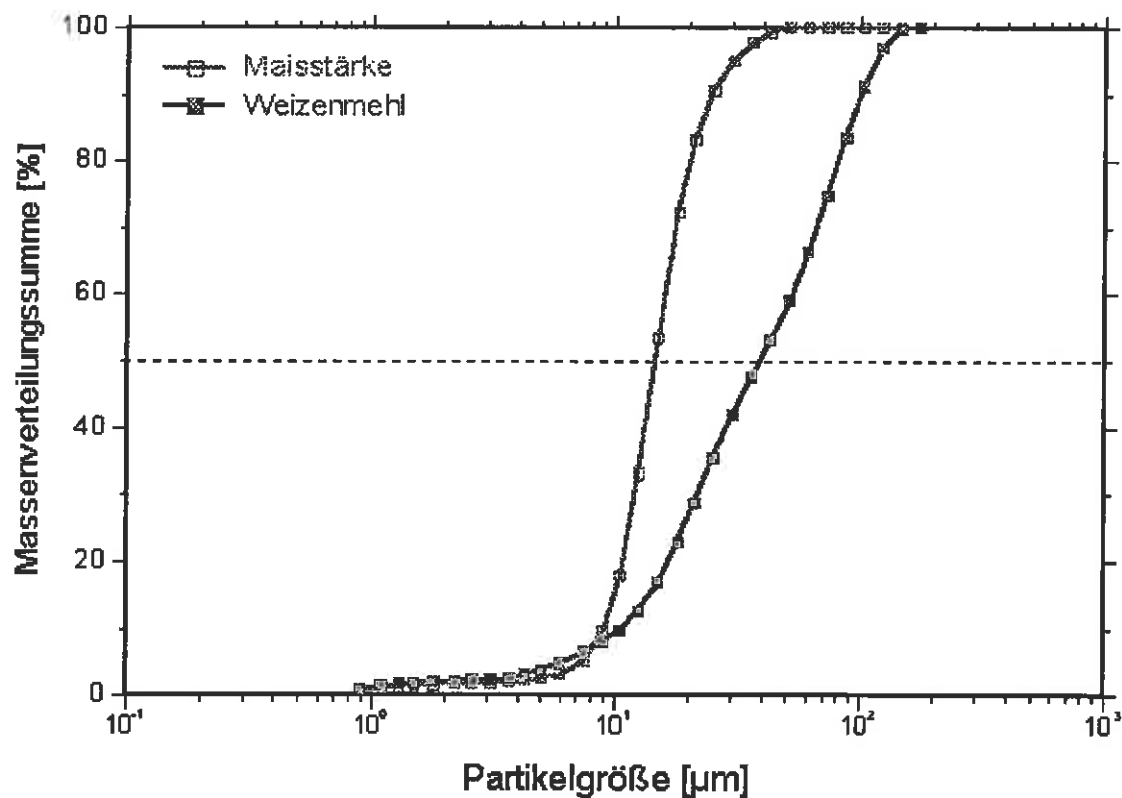


Abbildung 2: Korngrößenverteilung der für die Versuche verwendeten Maisstärke und Weizenmehl Typ 550

In Abbildung 2 wird die Korngrößenverteilung der beiden Stäube gegenübergestellt. Der Medianwert der verwendeten Maisstärke betrug ca. 13 μm und ist damit deutlich kleiner als der von Weizenmehl Typ 550 mit ca. 38 μm . Nähere Angaben speziell zu den Verbrennungseigenschaften von Maisstärke sind in [7] zu finden.

4 Ergebnisse

4.1 Explosionsübertragung durch Rohrleitungen mit 82 mm Innendurchmesser

Die Untersuchungen wurden mit einer Rohrleitung von 82 mm Innendurchmesser begonnen. Die Entzündung der Staub/Luft-Gemische erfolgte im Behälter 1, der zunächst mit einer Entlastungsfläche von 0.07 m^2 ausgerüstet war. Die mittlere Staubkonzentration von Maisstärke wurde für die Explosionsversuche systematisch im Bereich von 250 g/m^3 bis 1000 g/m^3 variiert. Der maximale reduzierte Explosionsüberdruck $p_{\text{red,max}}$ wurde schließlich mit einer Staubkonzentration von 750 g/m^3 erzielt ($p_{\text{red,max}} = 0.95 \text{ bar}$), die auch in den weiteren Versuchen mit veränderter Entlastungsfläche beibehalten wurde.

Explosionsübertragung von Behälter 1 nach Behälter 2 in Verbindung mit Höchstwerten der Flammenfrontgeschwindigkeit ($v_F = 400 \text{ m/s}$ bis 500 m/s) in der angeschlossenen Rohrleitung konnte sowohl mit einer Staubkonzentration von 500 g/m^3 als auch mit 750 g/m^3 im Explosionsbehälter gemessen werden. Mit einer mittleren Staubkonzentration von 1000 g/m^3 im Explosionsbehälter ergab sich ein deutlicher Abfall der Flammenfrontgeschwindigkeit. Im letztgenannten Fall lief die Flamme maximal 6 m bis 8 m in die Rohrleitung hinein bis es auf Grund zu hoher Staubkonzentration in der Rohrleitung stets zum Abbruch der Flammenfortpflanzung kam. Die Reduzierung der mittleren Staubkonzentration auf lediglich 250 g/m^3 im Explosionsbehälter sorgte zwar für eine deutliche Abnahme des reduzierten Explosionsüberdrucks im Behälter, die Flammenfortpflanzung durch die Rohrleitung erfolgte jedoch nur wenig langsamer als unter optimalen Bedingungen. Wie schon in den Untersuchungen mit größeren Rohrdurchmessern [6] bestätigte sich hier erneut, dass der Vorschub von noch unverbranntem Staub aus dem Explosionsbehälter in die Rohrleitung hinein stets ausreichend ist, um eine Flammenübertragung über lange Rohrstrecken zu ermöglichen, auch wenn die Rohrleitung vor dem Explosionsereignis staubfrei ist.

Die Luftströmung in den Rohrleitungen, die im Bereich von 0 m/s bis 30 m/s variiert wurde, besaß keinen relevanten Einfluss auf das Explosionsgeschehen, weder auf den zeitlichen Explosionsdruck im Behälter noch auf die Flammenfortpflanzung in den angeschlossenen Rohrleitungen. Nach der Entzündung der Staub/Luft-Gemische im Behälter besitzt die Expansionsströmung der heißen Verbrennungsgase den dominierenden Einfluss auf die Flammenfortpflanzung in den angeschlossenen Rohrleitungen. Der Betrag dieser Expansionsströmung ist sehr viel größer als der der ursprünglichen Luftströmung auf Grund der Saugpneumatik, weshalb in der Luftansaugleitung sehr rasch eine Strömungsumkehr hervorgerufen wird. Es wurde im Rahmen der Streuung der Messergebnisse kein zeitlich relevanter Unterschied zwischen der Flammenfortpflanzung in und gegen die ursprüngliche Luftströmung festgestellt.

In Abbildung 3 ist der Flammenlaufweg L als Funktion der Flammenlaufzeit t_L in Abhängigkeit des reduzierten Explosionsüberdrucks p_{red} im druckentlasteten Explosionsbehälter (Behälter 1) am Beispiel von Maisstärke aufgetragen.

Um eine bessere Vergleichbarkeit der Messergebnisse zu ermöglichen, ist in Abbildung 3 ebenso wie in den folgenden Weg-Zeit-Diagrammen der Nullpunkt stets auf die erste Messstelle in der Rohrleitung (0.2 m nach Behälter 1) bezogen. Tatsächlich treten die Flammen,

bezogen auf den Zündzeitpunkt im Behälter, mit zeitlichen Differenzen von bis zu 30 ms in die Rohrleitung ein, selbst bei vergleichbarem zeitlichem Explosionsdruck im Behälter.

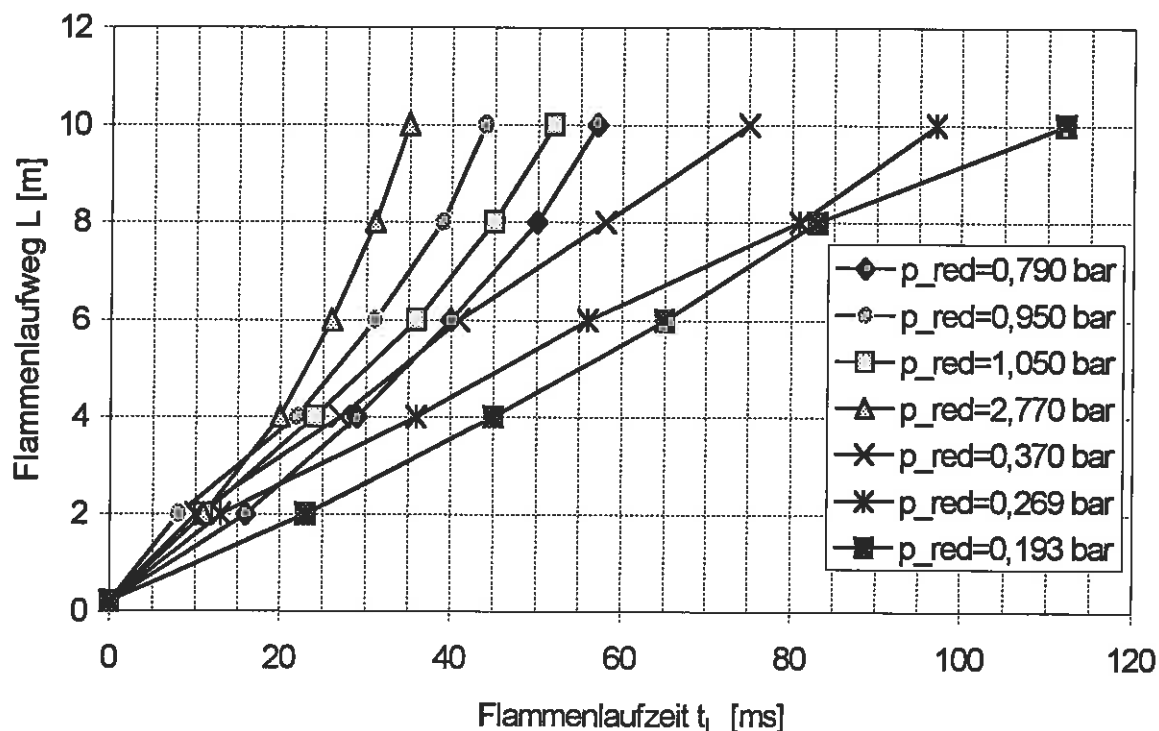


Abbildung 3: Flammenlaufweg L als Funktion der Flammenlaufzeit t_L in Abhängigkeit des reduzierten Explosionsüberdrucks p_{red} im druckentlasteten Behälter
Staub: Maisstärke; Innendurchmesser der Rohrleitung: $d = 82$ mm

Bei den in Abbildung 3 beispielhaft aufgetragenen Ergebnissen handelt es sich um solche Versuche, bei denen bezogen auf gleiche oder kleinere reduzierte Explosionsdrücke im Behälter 1 die jeweils kürzesten Flammenlaufzeiten in der Rohrleitung gemessen wurden.

Man erkennt, dass mit zunehmendem reduziertem Explosionsüberdruck p_{red} im Behälter 1 die gemessene Flammenlaufzeit deutlich kürzer wird. Die kürzeste Flammenlaufzeit wurde bei einem reduzierten Explosionsüberdruck von $p_{red} = 2.77$ bar gemessen. In diesem Fall betrug die maximale Flammenfrontgeschwindigkeit im letzten Messabschnitt $v_F = 500$ m/s. Im Falle der Messergebnisse mit exponentiellem Anstieg ($p_{red} = 0.79$ bar bis 2.77 bar) durchläuft die Flammenfront die gesamte Rohrleitungslänge von 12 m noch bevor das Druckmaximum im Behälter 1 überschritten ist. Dagegen war am Beispiel des Versuchs mit $p_{red} = 0.37$ bar das Druckmaximum in Behälter 1 nach $t_L = 40$ ms bereits überschritten. Die Flammenfrontgeschwindigkeit erreichte in diesem Beispiel lediglich $v_F = 117$ m/s.

Zusätzlich zu den reduzierten Explosionsüberdrücken in den Behältern 1 und 2 wurde an den Messstellen P2, P4, P6 und P9 der zeitliche Explosionsüberdruck in den Rohrleitungen gemessen (siehe Abbildung 1).

Als „worst case“ wurde bei einem reduzierten Explosionsüberdruck $p_{red} = 0.95$ bar im Behälter 1 ein maximaler Explosionsüberdruck an der Messstelle P6 in der Rohrleitung von 2.18 bar ermittelt. In allen anderen Fällen überstieg der höchste in der Rohrleitung gemessene Explosionsüberdruck den reduzierten Explosionsüberdruck von Behälter 1 um maximal 60 %.

In 4 Versuchen wurde im ebenfalls druckentlasteten Behälter 2 zusätzlich ein Staub/Luft-Gemisch mit 750 g/m^3 Maisstärke erstellt. Dabei kam es in zwei Fällen zu einer heftigen Sekundärexplosion, die den nach VDI 3673, Blatt 1 zu erwartenden maximalen reduzierten Explosionsüberdruck auf Grund der Flammenstrahlzündung um ca. 100 % überstieg.

Entsprechende Versuche wie zuvor beschrieben wurden mit Weizenmehl Typ 550 durchgeführt, das einen deutlich geringeren K_{St} -Wert als Maisstärke besitzt (siehe Tabelle 1). Die entsprechenden Ergebnisse sind in Abbildung 4 aufgetragen.

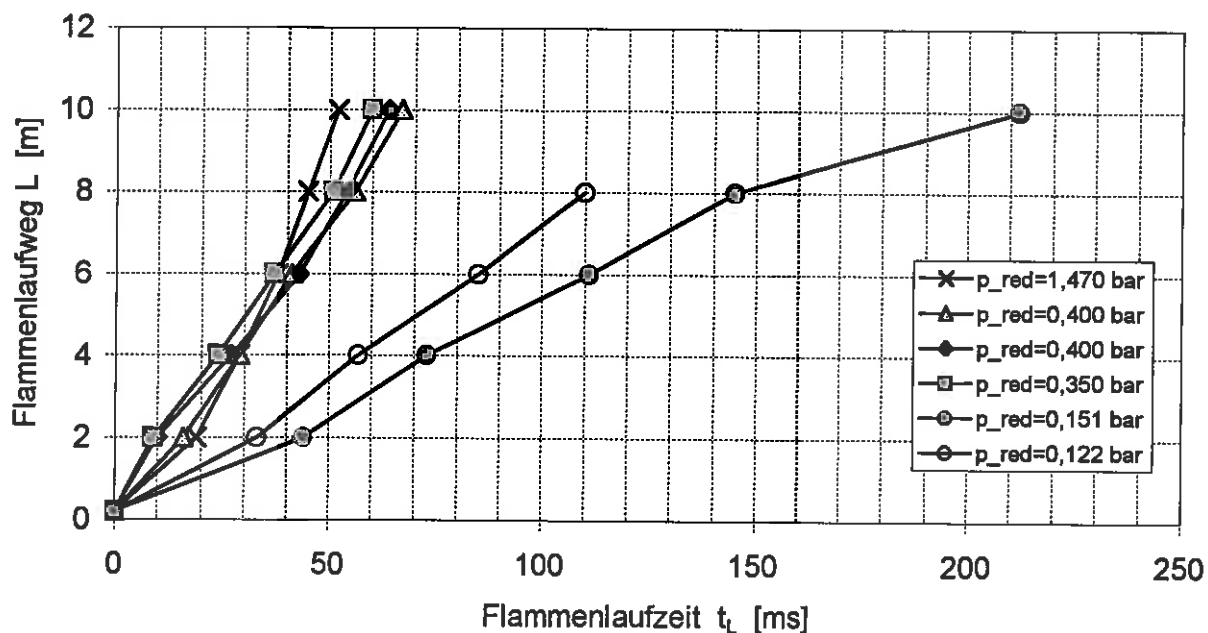


Abbildung 4: Flammenlaufweg L als Funktion der Flammenlaufzeit t_L in Abhängigkeit des reduzierten Explosionsüberdrucks p_{red} im druckentlasteten Behälter
Staub: Weizenmehl Typ 550; Innendurchmesser der Rohrleitung: $d = 82$ mm

Auf Grund des geringeren K_{St} - Wertes von Weizenmehl sind die maximalen reduzierten Explosionsüberdrücke im druckentlasteten Behälter bei gleicher Entlastungsfläche zwangsläufig geringer als im Falle von Maisstärke. Doch andererseits ist zu erkennen, dass selbst mit der Erhöhung des reduzierten Explosionsüberdrucks von $p_{red} = 0.4$ bar auf $p_{red} = 1.47$ bar mit Weizenmehl kaum noch eine Verkürzung der Flammenlaufzeit, bezogen auf eine Rohrleitungslänge von 12 m, erreicht werden konnte.

4.2 Explosionsübertragung durch Rohrleitungen mit 42 mm Innendurchmesser

Die Explosionsversuche wurden unter Beibehaltung der Vorgehensweise mit dünneren Rohrleitungen mit einem Innendurchmesser von 42 mm weitergeführt. Die Querschnittsfläche wurde somit von 52.8 cm² auf 13.85 cm² reduziert.

Sowohl mit Maisstärke als auch mit Weizenmehl wurde mit einer mittleren Staubkonzentration von 750 g/m³ im Zündbehälter (Behälter 1) gearbeitet.

Wie schon in den Versuchen mit größerem Rohrdurchmesser festgestellt wurde, besaß die Strömungsgeschwindigkeit v_L der Luft ($v_{L,max} = 30$ m/s) keinen relevanten Einfluss auf die Flammenfortpflanzung. Der Flammeneintritt gegen die Strömungsrichtung (Ansaugrohr) erfolgte zwar mit einem zeitlichen Verzug von 20 bis 40 ms, die weitere Flammenfortpflanzung erfolgte jedoch in und gegen die ursprüngliche Strömungsrichtung nahezu synchron.

In Abbildung A1 (siehe Anhang) sind die zeitlichen Druckverläufe der Messstellen P0 (Primärexplosion im Behälter 1), P7 (Sekundärexplosion im Behälter 2) und die Druckverläufe in der Rohrleitung (gepunktete Linien) der Messstellen P2, P4 und P6 dargestellt. Ferner können die Signale der Flammenmelder entlang der Rohrleitung an den Messstellen F1 bis F6 betrachtet werden. Es handelt sich beispielhaft um einen Versuch mit einem Maisstärke/Luft-Gemisch von 750 g/m³ sowohl in Behälter 1 als auch in Behälter 2, die jeweils mit einer Fläche von 0.07 m² (Durchmesser $d = 0.3$ m) und einem statischen Ansprechüberdruck von $p_{stat} = 0.1$ bar druckentlastet waren.

Das erste Flammenmeldersignal der Messstelle F1 wird durch den pyrotechnischen Zünder im Behälter 1 hervorgerufen. Nach einer Zeitspanne von 60 ms erreicht die Flammenfront die Messstelle F1, die sich in der Rohrleitung 0.2 m nach Behälter 1 befindet.

Die Flammenfront pflanzt sich mit nahezu konstanter Geschwindigkeit bis zur Messstelle F4 fort (6. Rohrleitungsmeter). Danach wird die Flammenfortpflanzung langsamer, weil zu diesem Zeitpunkt das Druckmaximum in Behälter 1 erreicht ist und die Expansionsströmung (Verdrängungsströmung) nachlässt. Dieses Abknicken der Flammenfrontgeschwindigkeit ist auch im Flammenaufweg-Flammenlaufzeit-Diagramm (Abbildung 5) für $p_{red} = 0.41$ bar deutlich zu erkennen.

Ein anderes Beispiel zeigt das Explosionsgeschehen in Verbindung mit Weizenmehl und einer Entlastungsfläche von 0.031 m² ($d = 0.2$ m) in Abbildung A2. In diesem Falle konnte das Weizenmehl/Luft-Gemisch von ebenfalls 750 g/m³ im Behälter 2 nicht entzündet werden, weshalb die Druckkurve der entsprechenden Messstelle P7 weggelassen wurde.

In diesem Beispiel mit Weizenmehl wird das Druckmaximum im Behälter erst nach ca. 150 ms erreicht. Zu dieser Zeit hat die Flammenfront bereits die gesamte Messstrecke mit nahezu konstanter Flammenfrontgeschwindigkeit durchlaufen.

In Abbildung 5 ist am Beispiel von Maisstärke der Flammenaufweg als Funktion der Flammenlaufzeit aufgetragen. Man erkennt eine deutliche Abnahme der Flammenlaufzeit und damit eine Zunahme der Flammenfrontgeschwindigkeit mit steigendem reduziertem Explosionsüberdruck im Explosionsbehälter (Behälter 1). Im Bereich höherer reduzierter Explosionsüberdrücke ($p_{red} > 0.41$ bar) ist der Einfluß jedoch nur noch gering.

Im Vergleich zu den Ergebnissen, die in der Rohrleitung mit 82 mm Durchmesser ermittelt wurden, erfolgte die Flammenfortpflanzung auch in Verbindung mit einem hohen reduzierten Explosionsüberdruck mit nahezu konstanter Flammenfrontgeschwindigkeit. Sie betrug maximal $v_F = 180$ m/s gegenüber $v_F = 500$ m/s in der Rohrleitung mit 82 mm Durchmesser.

Ein weiterer Unterschied gegenüber den Versuchen mit größerem Rohrdurchmesser bestand darin, dass die maximalen in der Rohrleitung gemessenen Explosionsdrücke stets kleiner oder gleich dem reduzierten Explosionsüberdruck im Behälter waren und mit zunehmender Entfernung vom Zündbehälter stets abnahmen.

In ergänzenden Versuchen wurde zusätzlich ein Staub/Luft-Gemisch von 750 g/m^3 Maisstärke im Behälter 2 erstellt. In zwei von vier Fällen war die übertragene Flamme tatsächlich zündfähig und löste eine Sekundärexplosion aus. Die gemessenen reduzierten Explosionsüberdrücke in Behälter 2 waren in diesen Fällen ähnlich denen in Behälter 1.

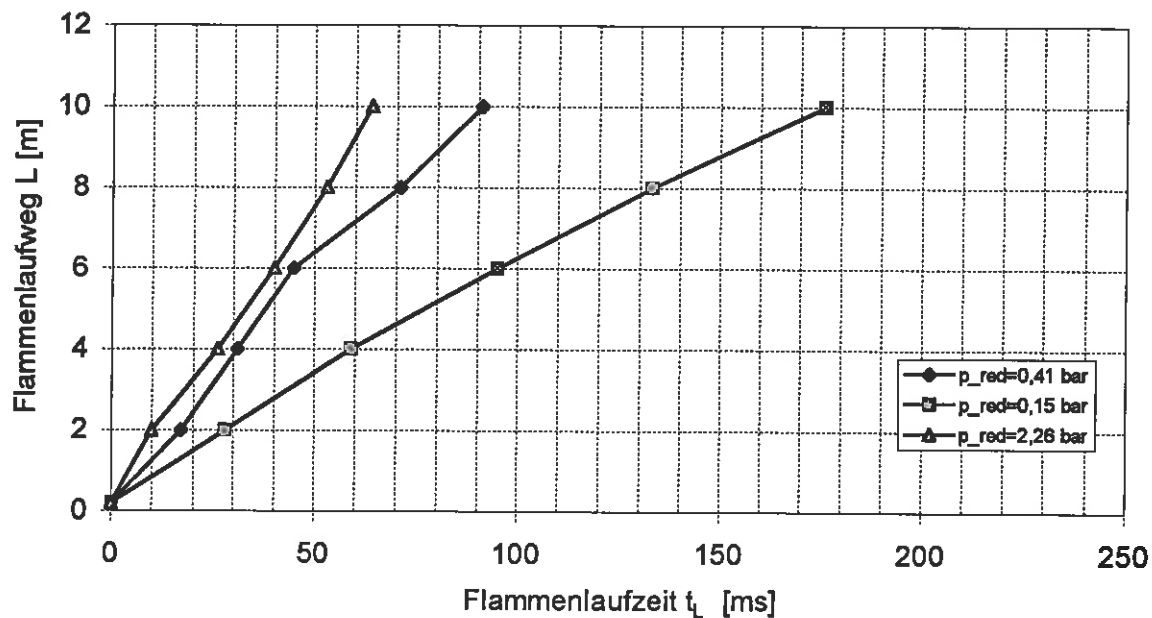


Abbildung 5: Flammenlaufweg L als Funktion der Flammenlaufzeit t_L in Abhängigkeit des reduzierten Explosionsüberdrucks p_{red} im druckentlasteten Behälter
Staub: Maisstärke; Innendurchmesser der Rohrleitung: $d = 42 \text{ mm}$

Die Verkürzung der Rohrleitung zwischen Behälter 1 und Behälter 2 von 12 m auf 6 m erbrachte keine wesentlichen neuen Erkenntnisse. Auf Grund des geringeren Strömungswiderstandes in der verkürzten Rohrleitung stieg die maximale Flammenfrontgeschwindigkeit jedoch von $v_F = 180 \text{ m/s}$ auf $v_F = 220 \text{ m/s}$ an.

In Abbildung 6 werden die Ergebnisse dargestellt, die mit Staub/Luft-Gemischen aus Weizenmehl erzielt wurden. Die Flammenlaufzeiten unterscheiden sich kaum von den Ergebnissen mit Maisstärke. Dies verdeutlicht erneut, dass innerhalb solcher dünnen Rohrleitungen weniger die Verbrennungseigenschaften des Staubes für die Geschwindigkeit der Flammenfortpflanzung verantwortlich sind, sondern vielmehr die Expansionsströmung auf Grund der Primärexplosion im angeschlossenen Behälter.

Interessant waren die Versuche, in denen zusätzlich ein explosionsfähiges Staub/Luft-Gemisch von 750 g/m^3 Weizenmehl im Behälter 2 erstellt wurde: nur in einem von sieben Fällen konnte durch die übertragene Flamme eine Sekundärexplosion im Behälter 2

entzündet werden, d.h. die Zündwahrscheinlichkeit war im Vergleich zur Maisstärke deutlich geringer.

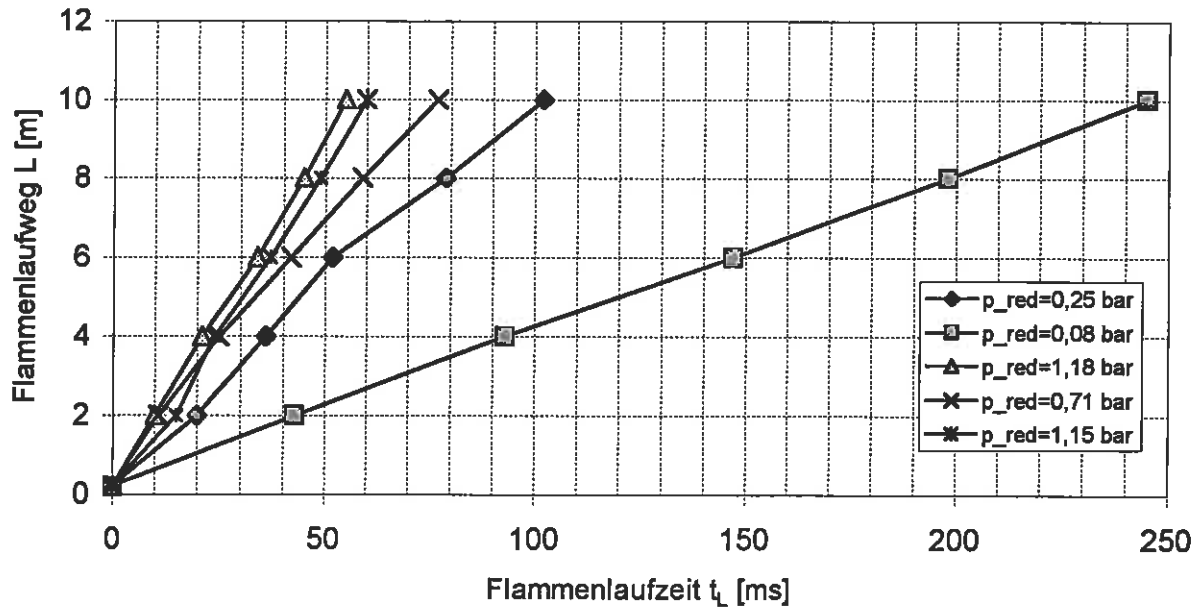


Abbildung: 6: Flammenlaufweg L als Funktion der Flammenlaufzeit t_L in Abhängigkeit des reduzierten Explosionsüberdrucks p_{red} im druckentlasteten Behälter
Staub: Weizenmehl Typ 550; Innendurchmesser der Rohrleitung: $d = 42$ mm

4.3 Explosionsübertragung durch Rohrleitungen mit 27 mm Innendurchmesser

Die Untersuchungen zur Übertragung von Staubexplosionen wurden mit Rohrleitungsdurchmessern von 27 mm, entsprechend einer Querschnittsfläche von 5.7 cm^2 , fortgesetzt.

Eine Flammenübertragung über die gesamte Rohrleitungslänge von 12 m wurde in Verbindung mit Maisstärke nur noch in ca. 30 % aller Fälle festgestellt, vielfach erlosch die Flamme zwischen dem 4. und 8. Rohrleitungsmeter.

Mit Weizenmehl als Versuchsstaub konnte nur in einem von sechs Versuchen eine Flammenübertragung über 12 m bis zum Behälter 2 erzielt werden. In allen anderen Fällen erreichte die Flammenfront maximal den 6. Rohrleitungsmeter.

In Abbildung 7 wird wiederum der Flammenlaufweg als Funktion der Flammenlaufzeit für unterschiedliche reduzierte Explosionsüberdrücke im Explosionsbehälter dargestellt.

In diesem Diagramm ist der einzige Versuch mit Weizenmehl, bei dem die Flamme über die gesamte Rohrlänge übertragen wurde, gemeinsam mit den Ergebnissen der Maisstärke aufgetragen. Die mittlere Flammenfrontgeschwindigkeit beträgt mit Maisstärke maximal $v_F = 180 \text{ m/s}$ und mit Weizenmehl bis zum 4. Rohrleitungsmeter $v_F = 140 \text{ m/s}$ und fällt schließlich auf $v_F = 100 \text{ m/s}$ ab.

Auch in den Fällen, in denen eine Flammenübertragung bis zum Behälter 2 nachgewiesen werden konnte, erfolgte weder mit Maisstärke noch mit Weizenmehl eine Entzündung der in Behälter 2 erstellten Staub/Luft-Gemische. Die Oberfläche der aus dieser dünnen Rohrleitung in Behälter 2 eingetretenen Flamme war als wirksame Zündquelle, bezogen auf die verwendeten Stäube, offenbar zu gering.

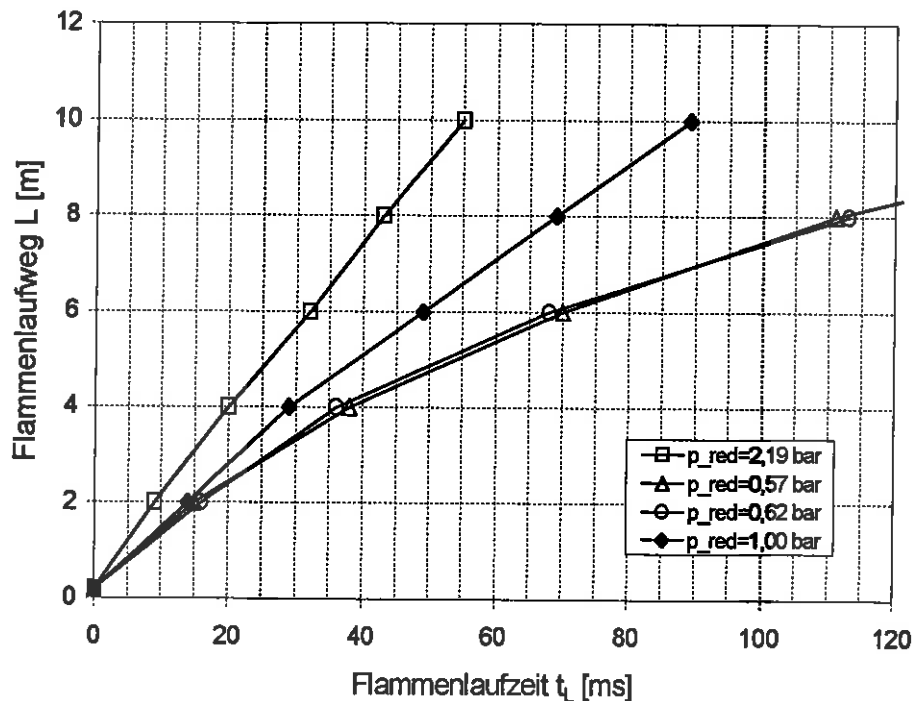


Abbildung 7: Flammenlaufweg L als Funktion der Flammenlaufzeit t_L in Abhängigkeit des reduzierten Explosionsüberdrucks p_{red} im druckentlasteten Behälter; Staub: Maisstärke (offene Symbole) und Weizenmehl Typ 550 (geschlossene Symbole); Innendurchmesser der Rohrleitung: $d = 27$ mm

5 Zusammenfassung und Diskussion der Ergebnisse

Mit Maisstärke ($K_{St} \approx 200 \text{ bar}\cdot\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$) und mit Weizenmehl Typ 550 ($K_{St} \approx 100 \text{ bar}\cdot\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$) wurden experimentelle Untersuchungen durchgeführt, um im Falle einer Staubexplosion in einem Behälter oder Apparat die Flammenfortpflanzung und damit die Explosionsübertragung durch dünne Rohrleitungen näher zu betrachten. Es wurde mit Rohrdurchmessern von 82 mm bis 27 mm gearbeitet.

In Abbildung 8 wird für Maisstärke der Flammenlaufweg als Funktion der Flammenlaufzeit in Abhängigkeit des verwendeten Rohrdurchmessers dargestellt. Es werden die Versuchsergebnisse gezeigt, bei denen die kürzesten Flammenlaufzeiten gemessen wurden, wobei jeweils die gleiche Druckentlastungsfläche auf dem vorgeschalteten 1 m^3 - Behälter vorhanden war. Im Falle der 27 mm - Rohrleitung kam bei zwei weiteren Versuchen mit

reduzierten Explosionsüberdrücken von $p_{red} = 2.84$ bar bzw. 2.44 bar keine Flammenfortpflanzung über mehr als 4 m zustande.

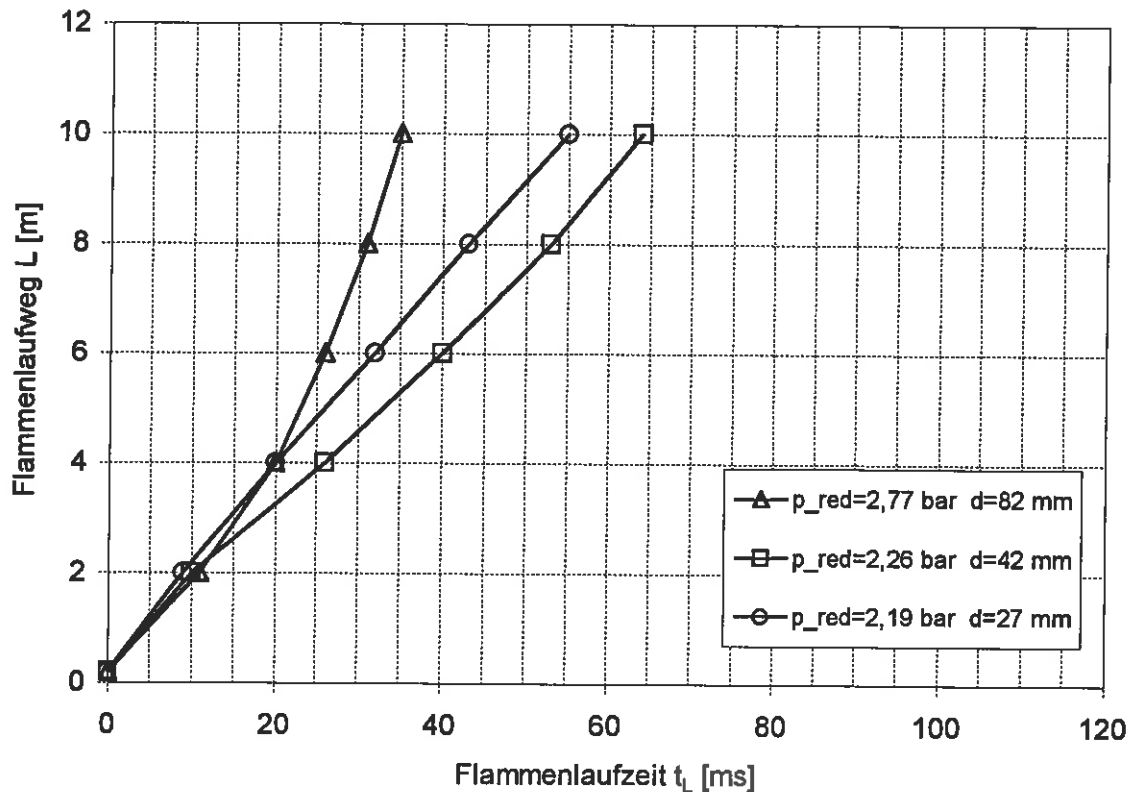


Abbildung 8: Flammenlaufweg L als Funktion der Flammenlaufzeit t_f in Abhängigkeit des Rohrdurchmessers; Staub: Maisstärke

Während die Flammenfrontgeschwindigkeit in der Rohrleitung mit 82 mm Durchmesser ansteigt und zwischen dem 8. und 10. Rohrleitungsmeter bereits 500 m/s erreicht, bleibt sie in den dünneren Rohrleitungen mit ca. 160 m/s bis 180 m/s nahezu konstant.

Im letztgenannten Fall scheint ausschließlich die Expansionsströmung der Verbrennungsgase aus dem vorgeschalteten Behälter für die Flammenfortpflanzung relevant zu sein. In größeren Rohrdurchmessern dagegen führen die Verbrennungsmechanismen innerhalb der Rohrleitung zu einem zusätzlichen Anstieg der Flammenfrontgeschwindigkeit. Dies ist u.a. darauf zurückzuführen, dass sich auf Grund der zunehmenden turbulenten Strömungsverhältnisse die Oberfläche der Flamme vergrößert (Flammenfaltung) und dadurch die Flammengeschwindigkeit ebenfalls zunimmt [4,8,9].

Dagegen überwiegen bei abnehmendem Rohrdurchmesser und somit zunehmendem Oberflächen/Volumen-Verhältnis des Rohres die ansteigenden Wärmeverluste, die sich wiederum mindernd auf die Flammengeschwindigkeit auswirken.

In Abbildung 9 ist die entsprechende zeitliche Flammenfortpflanzung des träger reagierenden Weizenmehls zu sehen.

In diesem Falle ist zu beobachten, dass sich die Expansionsströmung am stärksten in der Rohrleitung mit 42 mm Durchmesser auf die Flammenfrontgeschwindigkeit auswirkt.

Die oben beschriebenen Effekte kommen in der Rohrleitung mit 82 mm Durchmesser auf Grund der geringeren Verbrennungsgeschwindigkeit von Weizenmehl erst nach 2 m Flammenlaufweg zur Geltung und sind in ähnlicher Stärke wie am Beispiel der Maisstärke erst in Rohrdurchmessern größer als 82 mm zu erwarten.

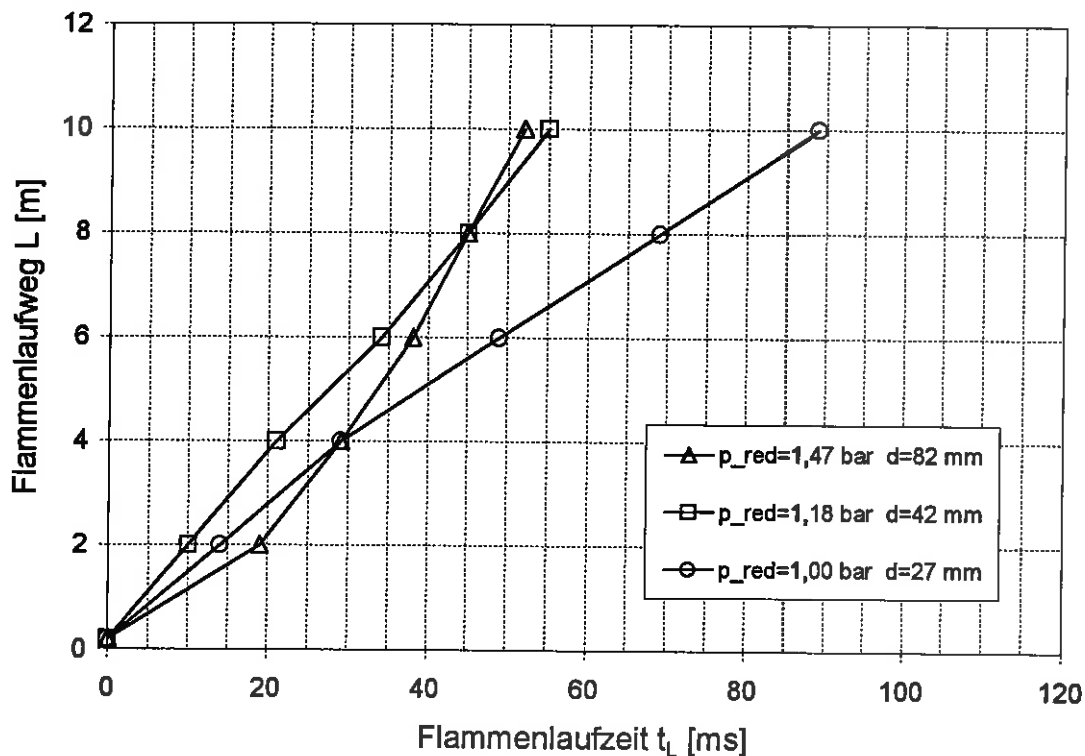


Abbildung 9: Flammenlaufweg L als Funktion der Flammenlaufzeit t_L in Abhängigkeit des Rohrdurchmessers; Staub: Weizenmehl Typ 550

Die in den Rohrleitungen herrschenden Strömungsverhältnisse vor der Entzündung der Staub/Luft-Gemische, die durch den Anschluss der Versuchsanlage an ein Saug-Gebläse bis zu einem Betrag von maximal 30 m/s erzeugt wurden, haben keinen relevanten Einfluss auf die Flammenfortpflanzung gezeigt.

In Abbildung 10 sind abschließend alle an den Messstellen F1 bis F6 gemessenen Flammenlaufzeiten für Maisstärke und Weizenmehl sowie für alle drei Rohrdurchmesser gemeinsam in einem Diagramm aufgetragen.

Für sicherheitstechnische Betrachtungen zur Problematik der Explosionsübertragung durch dünne Rohrleitungen sollte die Einhüllende der in Abbildung 10 angegebenen Messwerte herangezogen werden.

Sie lässt sich unter Berücksichtigung der experimentell verifizierten Anwendungsgrenzen mit

- Explosionskennwert des Staubes: $K_{St} \leq 200 \text{ bar}\cdot\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ (St 1-Stäube)
- Rohrdurchmesser $d \leq 82 \text{ mm}$
- Luftströmung in der Rohrleitung $v_F \leq 30 \text{ m/s}$
- Volumen des Behälters bzw. Apparates, in dem die Entzündung erfolgt: $V \geq 1 \text{ m}^3$
- Maximaler reduzierter Explosionsüberdruck $p_{red, max} \leq 2.8 \text{ bar}$
- Maximaler Flammenlaufweg: $L = 12 \text{ m}$

durch die folgende Exponentialfunktion mathematisch approximieren:

$$L = 2.9 \cdot e^{(0.043 \cdot t_L)} - 2.6$$

mit

L Flammenlaufweg in [m]

t_L Flammenlaufzeit in [ms]

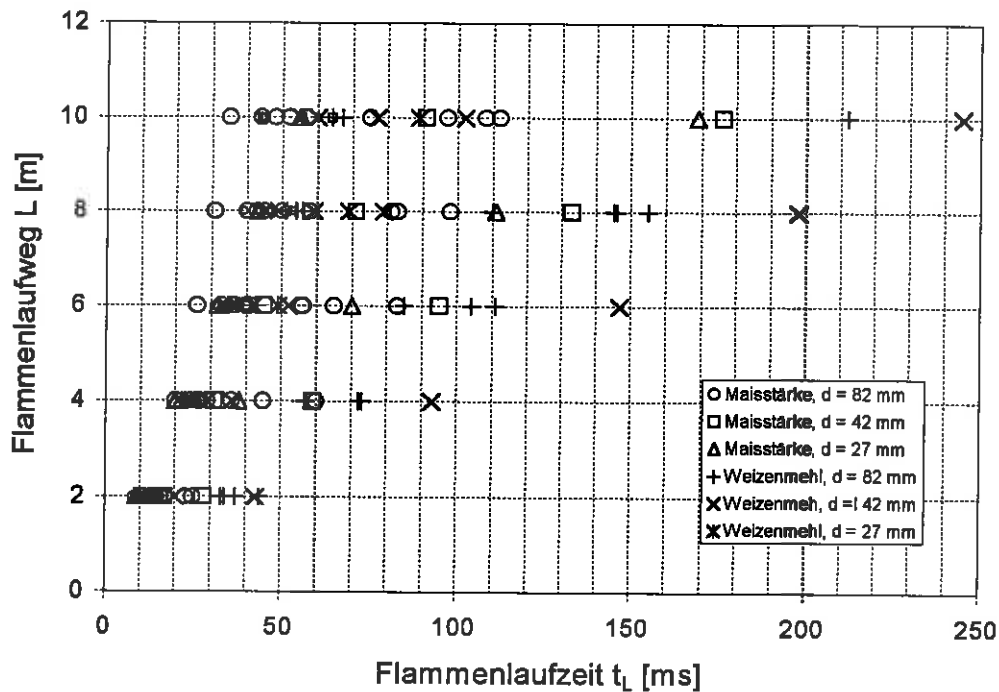


Abbildung 10: Flammenlaufweg L als Funktion der Flammenlaufzeit t_L ; Darstellung der Messergebnisse (Messstellen F1 bis F6) für Rohrdurchmesser von 27 mm, 42 mm und 82 mm sowie für reduzierte Explosionsüberdrücke im vorgeschalteten druckentlasteten Behälter von $p_{red} = 0.1 \text{ bar}$ bis 2.84 bar ; Stäube: Maisstärke und Weizenmehl

Die Untersuchungen haben ferner gezeigt, dass durch Rohrleitungen mit Durchmessern von $d \geq 42$ mm mit hoher Wahrscheinlichkeit eine Flammenfortpflanzung und damit eine Explosionsübertragung erfolgen kann. In Rohrdurchmessern $d < 42$ mm nimmt die Wahrscheinlichkeit der Flammenfortpflanzung mit zunehmender Rohrleitungslänge ebenso wie die Zündwirksamkeit der aus dem Rohrende austretenden Flamme deutlich ab.

Hinsichtlich der in den Rohrleitungen auftretenden Explosionsdrücke ist zu bemerken, dass in der Rohrleitung mit 82 mm Durchmesser und nach einer Rohrleitungslänge von 10 m mehr als der doppelte Explosionsüberdruck als im druckentlasteten Zündbehälter gemessen wurde. Bei Verlängerung der Rohrleitung muss mit weiterem Druckanstieg gerechnet werden [3-6].

In den Rohrleitungen mit 42 mm und mit 27 mm Durchmesser fiel der maximale Explosionsüberdruck vom Maximalwert im vorgeschalteten Behälter mit zunehmender Rohrleitungslänge kontinuierlich ab. In diesem Falle kann die Explosionsfestigkeit des vorgeschalteten Behälters oder Apparates als ausreichend für die Festigkeit der Rohrleitung angesehen werden.

6 Literaturhinweise

[1] En 1127-1 Explosive atmospheres - Explosion prevention and protection - Part 1: Basic concepts and methodology: 1997

[2] Verein Deutscher Ingenieure: Staubbrände und Staubexplosionen - Gefahren - Beurteilung - Schutzmaßnahmen, VDI-Richtlinie 2263, Beuth-Verlag GmbH, Berlin, Ausgabe Mai 1992

[3] W. Bartknecht: Explosionsschutz, Grundlagen und Anwendung, Springer Verlag, Seiten 267-289 und 664-758, 1993

[4] A. Vogl: Ablauf von Staubexplosionen in pneumatischen Saug-Flug-Förderanlagen, D 82 (Diss. RWTH Aachen), Roland Asanger Verlag Heidelberg, 1995

[5] A. Vogl: Flame propagation in pipes of pneumatic conveying systems and exhaust equipment, American Institute of Chemical Engineers, Process Safety Progress, Vol 15, No.4, Page 219-226, 1996

[6] A. Vogl: Explosionsübertragung aus Behältern in Rohrleitungen pneumatischer Anlagen, VDI Berichte 1272, Seite:215 bis 236, VDI-Verlag Düsseldorf, 1996

[7] K.-P. Scheuermann: Untersuchungen des Einflusses der Turbulenz auf den Ablauf von Staubexplosionen im geschlossenen und teilentlasteten Behälter, D 82 (Diss. RWTH Aachen), 1993

[8] Henrikus Steen: Handbuch des Explosionsschutzes, Seite 605-606, WILEY-VCH Verlag Weinheim, Februar 2000

[9] Rudolf Günther: Verbrennung und Feuerungen, Seite 82-90, Springer Verlag Berlin Heidelberg New York Tokyo, 1984

7 Anhang

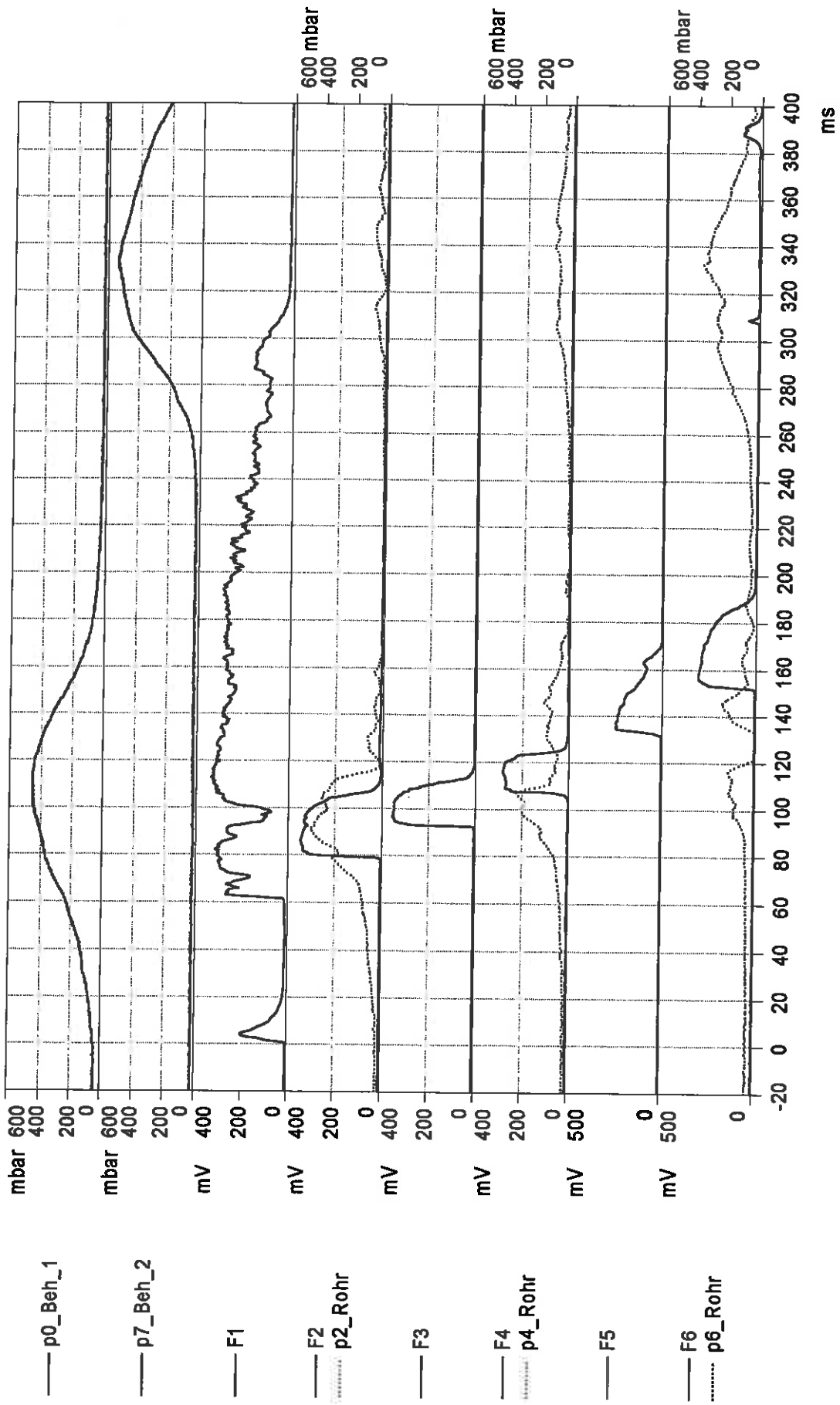
- Messergebnisse der in den Abbildungen 3 bis 7 dargestellten Versuche
- Abbildung A1: Zeitliche Druckverläufe und Messsignale der Flammenmelder am Beispiel der Rohrleitung mit Durchmesser $d = 42$ mm und Maisstärke als Versuchsstaub
- Abbildung A2: Zeitliche Druckverläufe und Messsignale der Flammenmelder am Beispiel der Rohrleitung mit Durchmesser $d = 42$ mm und Weizenmehl als Versuchsstaub

Messergebnisse der in den Abbildungen 3 bis 7 dargestellten Versuche

Abb. Nr.	D [m]	St	d [mm]	p _{red} [bar]	p ₂ [bar]	p ₄ [bar]	p ₆ [bar]	F1 [ms]	F2 [ms]	F3 [ms]	F4 [ms]	F5 [ms]	F6 [ms]
3*	0.4	Mais	82	0.19	0.13	0.23	0.14	78	101	123	143	162	190
3	0.4	Mais	82	0.27	0.18	0.16	0.15	64	77	100	120	145	161
3*	0.3	Mais	82	0.37	0.23	0.48	0.16	68	78	95	109	126	143
3	0.3	Mais	82	0.79	0.95	1.02	0.78	34	50	63	74	84	91
3	0.3	Mais	82	0.95	1.17	1.48	2.18	52	60	74	83	91	96
3*	0.2	Mais	82	1.05	1.17	1.18	0.86	79	90	103	115	124	131
3	0.2	Mais	82	2.77	2.40	3.29	2.73	47	58	67	73	78	82
4	0.4	Weiz	82	0.12	0.17	0.22	0.15	73	106	130	158	183	-
4	0.4	Weiz	82	0.15	0.14	0.09	0.06	72	116	145	183	217	284
4	0.3	Weiz	82	0.35	0.47	0.49	0.28	70	79	94	107	121	130
4	0.3	Weiz	82	0.40	0.42	0.39	0.23	68	78	95	111	122	132
4	0.3	Weiz	82	0.40	0.31	0.37	0.26	88	104	117	129	144	155
4	0.2	Weiz	82	1.47	1.49	1.52	1.42	74	93	103	112	119	126
5	0.4	Mais	42	0.15	0.15	0.14	0.15	73	101	132	168	206	249
5	0.3	Mais	42	0.41	0.41	0.31	0.32	62	79	93	107	133	153
5	0.2	Mais	42	2.26	1.18	1.11	0.61	58	68	84	98	111	122
6	0.4	Weiz	42	0.08	0.05	0.05	0.10	179	222	272	326	377	424
6	0.3	Weiz	42	0.25	0.27	0.20	0.11	58	78	94	110	137	160
6	0.2	Weiz	42	0.71	0.64	0.59	0.20	144	155	169	186	203	221
6	0.2	Weiz	42	1.15	1.34	1.17	0.60	122	137	146	159	171	182
6	0.2	Weiz	42	1.18	1.07	1.14	0.71	97	107	118	131	142	152
7	0.3	Mais	27	0.57	0.55	0.46	0.23	67	82	105	137	178	236
7	0.3	Mais	27	0.62	0.67	0.48	0.22	79	95	115	147	192	-
7	0.2	Mais	27	2.19	2.18	1.63	1.22	74	83	94	106	117	129
7	0.2	Weiz	27	1.00	0.78	0.57	0.28	101	115	130	150	170	190

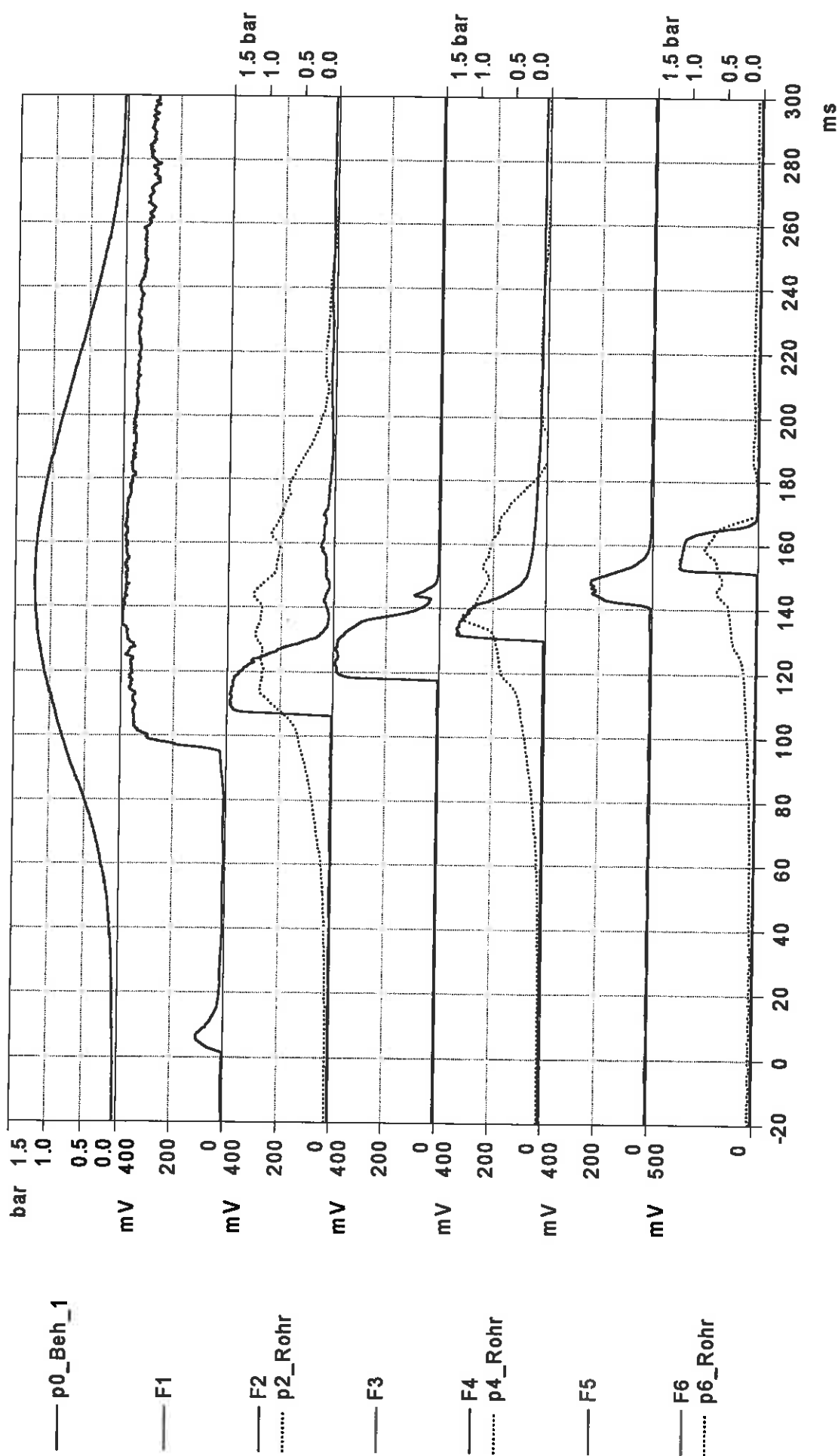
D Durchmesser der Druckentlastungsöffnung auf dem Behälter 1
d Innendurchmesser der Rohrleitung
p_{red} reduzierter Explosionsüberdruck im Behälter 1
p₂ - p₆ Explosionsüberdrücke in der Rohrleitung
F1 - F6 Signale der Flammenmelder in Millisekunden ab der Zündung in Behälter 1
(in den Abbildungen sind die angegebenen Flammenlaufzeiten auf die Messstelle F1 normiert ($F_N - F_1$), die sich 0.2 m nach Behälter 1 befindet)

Die in der Tabelle aufgeführten Versuchsergebnisse wurden mit Staub/Luft-Gemischen der Konzentration 750 g/m³ durchgeführt, die mit * gekennzeichneten Versuche dagegen mit einer Konzentration von 500 g/m³.



04.07.00 14:44:37 Variante F, Versuch 1

Abbildung A 1: Zeitlicher Explosionsdruck p0 von Behälter 1 und p7 von Behälter 2 sowie zeitliche Explosionsdrücke (p2, p4, p6) und Signale der Flammenmelder F1 bis F6 entlang der Rohrleitung am Beispiel mit Durchmesser d = 42 mm, Maisstärke, Entlastungsfläche A = 0.07 m²



13.07.00 09:27:24 Variante E, Versuch 5

Abbildung A 2: Zeitliche Explosionsdrücke und Signale der Flammenmelder; Weizenmehl; Durchmesser $d = 42 \text{ mm}$; Entlastungsfläche $A = 0.031 \text{ m}^2$