

BAM-BERICHT Nr. 28 DER BUNDESANSTALT FÜR
MATERIALPRÜFUNG (BAM)
BERLIN

**Zum Ablauf von Gasexplosionen in mit
Rohrleitungen verbundenen Behältern**

von Prof. Dr. rer. nat. Hans-Jürgen Heinrich

21 Seiten mit 65 Abbildungen und 23 Tabellen

Herausgegeben von der
Bundesanstalt für Materialprüfung (BAM)
1 Berlin 45, Unter den Eichen 87
Telefon (030) 8104- 1
Telex 01 -83 261 bamb d

Inhaltsverzeichnis	Seite
1. Einleitung	1
2. Zur Experimentaltechnik	2
3. Explosionsablauf in geschlossenen Gefäßen	2
3.1 Kugelförmiges Explosionsgefäß	2
3.2 Würfelförmige Explosionskammer	3
3.3 Durch Rohrleitung verbundene Kammern	3
3.4 Diskussion	7
4. Explosionsablauf bei direkter Druckentlastung einzelner und mehrerer, durch Rohrleitungen verbundener Kammern	8
4.1 Würfelförmige Explosionskammer	8
4.2 Doppelkammer	10
4.3 Durch Rohrleitung verbundene Kammern	11
4.4 Diskussion	16
5. Zweckmäßige Anbringung von Druckentlastungsöffnungen an mit Rohrleitungen verbundenen Behältern	16
5.1 Versuche mit schnellen Flammen	17
5.2 Versuche mit Detonationen	18
5.3 Diskussion	19
6. Druckentlastung über Rohrleitungen	20

1. Einleitung und Problemstellung

Die Wirkung von Gasexplosionen wird im wesentlichen durch den erreichbaren Enddruck und die höchste dabei auftretende Druckanstiegsrate charakterisiert. Diese Kennwerte werden darum vielfach zur Auswahl und Bemessung solcher sicherheitstechnischer Maßnahmen herangezogen, die der Beschränkung der Auswirkungen von Explosionen dienen. Die folgenden Ausführungen befassen sich mit den mannigfaltigen Parametern, die Druck und Druckanstiegsgeschwindigkeit bei Gasexplosionen beeinflussen können, und die deshalb bei sicherheitstechnischen Überlegungen zu berücksichtigen sind.

Die Schnelligkeit, mit welcher der Druck im Verlauf einer Explosion ansteigt, hängt von mehreren Einflußgrößen ab. An erster Stelle steht die Größe der Brennfläche. Da sich die chemische Umsetzung einer Verbrennungsreaktion in der Flammenfront vollzieht, ist die Bruttoumsatzgeschwindigkeit – und damit die Geschwindigkeit des Druckanstiegs – der Ausdehnung der Brennfläche direkt proportional. Der durch das Fortschreiten der chemischen Reaktion bedingten Fortpflanzung der Brennfläche in das unverbrannte Gemisch, deren Translationsgeschwindigkeit ohne Einschluss in der Größenordnung von 30-50 cm/s liegt, überlagert sich in geschlossenen Behältern eine auf dem Expansionsbestreben der heißen Schwaden beruhende, kugelsymmetrische Strömung, welche die Brennfläche mit sehr viel größerer Geschwindigkeit als allein durch die chemische Reaktion bedingt (Größenordnung einige m/s) in das Unverbrannte verschiebt. Bei ruhendem Gemisch und Zündung im geometrischen Mittelpunkt des Behälters erhält man eine kugelförmige Flamme, deren Radius r linear mit der Zeit zunimmt. Da die Flammenoberfläche mit r^2 wächst, nimmt die Geschwindigkeit des Druckanstiegs stetig zu. Der Höchstwert – auch als maximale Druckanstiegsgeschwindigkeit bezeichnet – wird bei kugelförmigem Explosionsgefäß dann erreicht, wenn die Flammenfront die Behälterwand erreicht hat und die Verbrennung abgeschlossen ist. Bekanntlich hat die spezifische Oberfläche F/V bei einer Kugel unter allen geometrischen Körpern ein Minimum. So leuchtet ein, daß jede Verzerrung der zunächst kugelförmigen Flammenfront zu einer Oberflächenvergrößerung und damit zu einer beschleunigten Verbrennung bzw. zu einer Erhöhung der Druckanstiegsgeschwindigkeit beiträgt. Solche Verzerrungen entstehen beispielsweise bei der Beugung der Flamme um in den Brennraum eingebrachte Hindernisse. Tritt insbesondere die Flamme bei ihrem Fortschreiten in Raumabschnitte mit verringertem Querschnitt ein – wie z.B. Rohrleitungen –, so kann sich dort die Strömungsgeschwindigkeit der expandierenden Schwaden so stark erhöhen, daß die kritische Reynoldszahl überschritten wird und Turbulenz einsetzt. Dabei wird die zunächst geschlossene Flammenfront unter enormer Vergrößerung der Brennfläche aufgerissen und als Folge die Flammengeschwindigkeit beträchtlich heraufgesetzt. Ähnliche Aufsteilungen des zeitlichen Druckanstiegs treten auch bei der Einwirkung großflächiger oder schnell bewegter Zündquellen auf ein ruhendes explosives Gemisch auf, wenn nämlich die Explosion von vielen Punkten innerhalb des Gemisches eingeleitet wird.

Unter definierten Bedingungen hinsichtlich Bewegungszustand des Gemisches, Beschaffenheit der Zündquelle und Geometrie des Explosionsgefäßes kann die maximale Druckgeschwindigkeit zur Bewertung und Bemessung von Schutzmaßnahmen wie Druckentlastung oder Explosionsunter-

drückung herangezogen werden. Dabei ist allerdings die Druck- und Volumenabhängigkeit dieser Größe zu berücksichtigen.

Die Theorie der Fortpflanzung von Gasexplosionen in kugelförmigen Gefäßen bei zentraler Zündung haben Lewis und v. Elbe für ruhende Gemische begründet. ¹⁾ Später ist die Theorie von zahlreichen Autoren verfeinert worden. Für unsere Betrachtungen genügt jedoch die elementare Theorie. Die folgende Gleichung gibt die Druckanstiegsgeschwindigkeit einer Kugelexplosion im Kugelgefäß in Abhängigkeit von verschiedenen Parametern wieder, wie sie von Lewis und v. Elbe abgeleitet wurde:

$$\frac{dp_{ex}}{dt} = \frac{3 v_n}{r} (p_E - p_A) \left[1 - \frac{p_E - p_{ex}}{p_E - p_A} \left(\frac{p_A}{p_{ex}} \right)^{1/\kappa} \right]^{2/3} \left(\frac{p_{ex}}{p_A} \right)^{1/\kappa} \quad (1)$$

Ersetzt man den Kugelradius r durch einen aus dem Kugelvolumen abgeleiteten Ausdruck, dann ergibt sich:

$$\frac{dp_{ex}}{dt} = 3 v_n \left(\frac{4\pi}{3V} \right)^{1/3} (p_E - p_A) \left[1 - \frac{p_E - p_{ex}}{p_E - p_A} \left(\frac{p_A}{p_{ex}} \right)^{1/\kappa} \right]^{2/3} \left(\frac{p_{ex}}{p_A} \right)^{1/\kappa} \quad (2)$$

Es bedeuten p_{ex} der gerade herrschende Explosionsdruck, dp_{ex}/dt die Druckanstiegsgeschwindigkeit, v_n die normale Verbrennungsgeschwindigkeit, V das Gefäßvolumen, κ der Adiabatenkoeffizient C_p/C_v , p_E der Enddruck und p_A der Anfangsdruck. Für den Sonderfall $p_{ex} = p_E$ – also für abgeschlossene Verbrennung – geht (6) über in

$$\left(\frac{dp_{ex}}{dt} \right)_{max} = 3 v_n \left(\frac{4\pi}{3V} \right)^{1/3} (p_E - p_A) \left(\frac{p_E}{p_A} \right)^{1/\kappa} \quad (3)$$

Da das Verhältnis p_E/p_A für ein gegebenes Gemisch eine konstante Größe ist

$$\frac{p_E}{p_A} = k$$

gilt auch

$$\left(\frac{dp_{ex}}{dt} \right)_{max} = 3 v_n \left(\frac{4\pi}{3V} \right)^{1/3} p_A (k - 1) k^{1/\kappa} \quad (4)$$

bzw.

$$\left(\frac{dp_{ex}}{dt} \right)_{max} = const \frac{p_A}{V^{1/3}} \quad (5)$$

Für Methan/Luft-Gemische mit $p_A = const$ und Volumina bis zu 250 l hat Heinrich die durch (5) geforderte Volumenabhängigkeit von $(dp_{ex}/dt)_{max}$ schon früher experimentell nachgewiesen. ²⁾ Bartknecht hat die Versuche auf Behälter bis zu 20 m³ Inhalt und andere Gase ausgedehnt und auch Staub/Luft-Gemische mit einbezogen; für alle untersuchten Systeme wurde die Gültigkeit der Volumenbeziehung (5) bestätigt. ³⁾

Der Maximaldruck, der sich bei Gasexplosionen in abgeschlossenen kubischen Volumina einstellt, ist – anders als die maximale Druckanstiegsgeschwindigkeit – unabhängig vom Bewegungszustand des Gemisches eine konstante Größe, die nur vom Anfangsdruck und der Gemischzusammensetzung abhängt und aus den Anfangsbedingungen bere-

chenbar ist. Adiabatisches Verhalten wird dabei vorausgesetzt.

In praxi hängt der Explosionsdruck stark davon ab, wie schnell die Reaktionswärme an die Umgebung abgeführt wird. In einem kugelförmigen Behälter erreicht die Flammenfront bei zentraler Zündung und ungestörter Flammenausbreitung erst am Ende der Verbrennung – wenn nämlich das gesamte Gemisch umgesetzt ist – die Kugelwand. Dort kühlen dann die glühenden Gase sofort ab und der Druck sinkt. Bei dieser Behälterform nimmt der Enddruck den höchsten Wert an. Er liegt in der Nähe des thermodynamisch berechenbaren Maximaldrucks. In jedem andersgeformten Raum gleichen Volumens, etwa einem Kubus oder einem Zylinder berührt die Flammenfront schon vor dem vollständigen Ablauf der Verbrennung an einigen Stellen die abkühlende Wand. Als Folge der Wärmeableitung stellt sich in solchen Gefäßen gegenüber dem Kugelgefäß ein geringerer Enddruck ein. Dieser Effekt wird noch verstärkt, wenn sich das Gemisch im Zustand der Bewegung befindet. Bei turbulent abbrennenden Gemischen geraten Turbulenzbälle schon sehr zeitig in Berührung mit der Wand. Praktisch beginnt bei solchen Gemischen vom Augenblick der Zündung an ein steter Wärmestrom durch die Gefäßwand nach außen zu fließen.

Das Zusammenwirken aller genannten Parameter erklärt Erscheinungen, die bei der Zündung explosibler Gemische in Apparaturen auftreten, deren Gestalt von einfachen kubischen Behältern mehr oder minder stark abweicht. So können bei der Zündung explosibler Gemische, die sich in durch Rohrleitungen verbundenen Behältern befinden, zunächst laminare Flammen bei Querschnittsveränderungen turbulent werden. Sie treffen bei ihrem Übertritt in andere Teile der Apparatur auf explosives Gemisch, das dort nicht mehr unter dem Anfangsdruck, sondern als Folge der Vorkompression durch die anlaufende Flamme unter erhöhtem Druck steht. Erhöhter Anfangsdruck und turbulente Verbrennung lassen jedoch den Druck um ein mehrfaches schneller ansteigen und kurzfristig einen höheren Endwert erreichen als bei Zündung im Ausgangszustand. Als Folge treten in solchen kombinierten Behältern heftige Druckoszillationen, u.U. auch Stoßwellen auf.

Bei der Dimensionierung von Druckentlastungsöffnungen ist zu überdenken, ob solche Vorgänge in den zu schützenden Apparaturen auftreten können. Beim reduzierten Maximaldruck einer druckentlasteten Explosion herrscht Gleichgewicht zwischen der zeitlichen Druckzunahme als Folge der fortschreitenden Explosion und der zeitlichen Druckabnahme infolge des Abströmens durch die Druckentlastungsöffnung. Alle Vorgänge, welche die Druckanstiegsgeschwindigkeit im geschlossenen Behälter hochtreiben, können auch einen Anstieg des reduzierten Maximaldrucks auf Werte bewirken, die u.U. über der vorgegebenen Festigkeit des Behälters liegen. Durch entsprechende Vergrößerung der Druckentlastungsöffnungen und durch zweckmäßige Wahl ihres Anbringungsortes können solche Vorgänge dennoch sicher beherrscht werden.

Die im folgenden geschilderten Modellexperimente in kleinen Volumina wurden in den vergangenen fünf Jahren unternommen, um auf solche Fragen im Rahmen sicherheitstechnischer Beurteilungen und grundsätzlicher Überlegungen Antworten zu finden. Es schien nützlich, die Ergebnisse aus etwa tausend Versuchen einmal zusammenzufassen und einem größeren Kreis zugänglich zu machen.

Die Untersuchungen sind gegliedert in

Versuche in geschlossenen Behältern unter Variation des Anfangsdruckes, der Geometrie der Behälter und des Ortes der Zündung

Druckentlastungsversuche in unterteilten oder durch Rohrleitungen miteinander verbundenen Behältern unter Variation der Geometrie der Behälter und des Ortes der Zündung

Druckentlastungsversuche einfacher Behälter über Rohrleitungen.

2. Zur Experimentaltechnik

Die Versuche wurden mit verschiedenen Versuchsgefäßen vorgenommen. Für Versuche unter Variation des Anfangsdruckes wurde ein kugelförmiges Versuchsgefäß mit einem Durchmesser von 30 cm (Rauminhalt 14,1 l) verwendet. Es ist druckfest bis 100 bar.

Die meisten Versuche wurden in würfelförmigen Stahlkammern von 12 l Inhalt (Seitenlänge 23 cm) ausgeführt. Eine solche Kammer besteht aus einem würfelförmigen Gerüst aus Winkelprofileisen, in das Stahlplatten als Seitenwände eingesetzt werden. Einige Platten waren mit runden Öffnungen versehen, vor die auswechselbare Blenden verschiedenen Querschnitts gesetzt werden konnten. Sie dienten als Druckentlastungsöffnungen und wurden mit Folien verschiedener Stärke verschlossen. Für photographische Aufnahmen konnte eine seitliche Stahlplatte durch eine Plexiglasplatte ersetzt werden. Für einige Versuche wurden zwei Kammern zu einer Doppelkammer zusammengesetzt. Das außerdem verwendete 2 l-Gefäß hat Zylindergestalt.

Die Versuche wurden mit Gemischen aus

- 10 % Methan in Luft,
- 4 % Propan in Luft,
- 3,5 % Benzol in Luft,
- 25 % Wasserstoff in Luft

vorgenommen.

Die Gasgemische wurden durch Mischen von Flaschengas über geeichte Strömungsmesser hergestellt. Das Benzoldampf/Luft-Gemisch wurde durch Sättigen von strömender Luft mit Benzoldampf in einem thermostatisierten, zweistufigen Sättiger erhalten. Die fertigen Gemische wurden im allgemeinen bei Atmosphärendruck durch die Versuchsanordnung geleitet, bis nach zehnfachem Gasaustausch die Behälterluft verdrängt war.

Für Versuche im Kugelgefäß wurden die Gasgemische in einer gesonderten Hochdruckmischanlage über die Partialdrücke hergestellt und anschließend in das zuvor evakuierte Kugelgefäß eingeleitet.

Zündung erfolgte durch einen Kondensatorentladungsfunken. Der zeitliche Druckverlauf wurde im allgemeinen mit einem temperaturkompensierten Druckaufnehmer (Dehnungsmeßstreifengeber in Freidrahtanordnung), bei sehr schnellen Druckanstiegen mit einem Quarzgeber gemessen und auf dem Leuchtschirm eines Kathodenstrahlzillographen abgebildet.

3. Explosionsablauf in geschlossenen Gefäßen

3.1 Kugelförmiges Explosionsgefäß

Zur Ermittlung der Druckabhängigkeit der maximalen

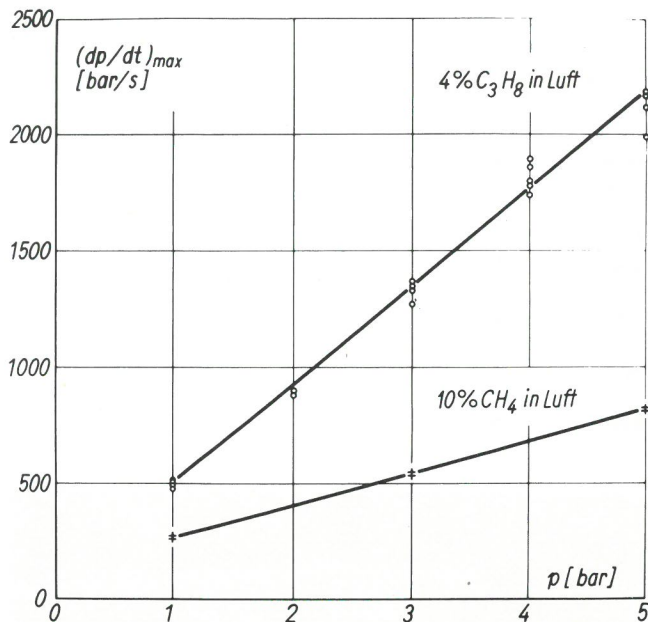


Bild 1
Einfluß des Anfangsdrucks auf die maximale Explosionsdruckanstiegsgeschwindigkeit für verschiedene Brenngas/Luft-Gemische

Druckanstiegsgeschwindigkeit unter möglichst adiabatischen Verhältnissen wurden Versuche mit Methan/Luft- und Propan/Luft-Gemischen in einem Kugelgefäß von 14,1 l Inhalt mit zentraler Zündung vorgenommen. Bild 1 läßt erkennen, daß die gemessene maximale Druckanstiegsgeschwindigkeit in Übereinstimmung mit Gleichung (5) linear mit dem Druck ansteigt. Für 10 % Methan in Luft ergibt sich eine Zunahme von 140 bar/s pro bar Drucksteigerung, für 4 % Propan in Luft beträgt der entsprechende Wert 420 s^{-1} .

Weitere Versuche bei einem Anfangsdruck von 1 bar wurden mit Benzol/Luft- und Wasserstoff/Luft-Gemischen ausgeführt. In Tabelle 1 sind die aus jeweils mehreren Versuchen gebildeten Mittelwerte für p_{\max} und $(dp/dt)_{\max}$ wiedergegeben.

Tabelle 1

Versuchs-Nr.	Gemisch	Anfangsdruck [bar]	p_{\max} [bar]	$(dp/dt)_{\max}$ [bar/s]
1	10 % CH_4 in Luft	1	8,2	270
2		3	23,8	535
3		5	38,2	820
4	4 % C_3H_8 in Luft	1	8,6	500
5		2	16,6	895
6		3	25,5	1 350
7		4	33,8	1 750
8		5	43,5	2 190
9	3,5 % C_6H_6 in Luft	1	9,8	630
10	25 % H_2 in Luft	1	7,0	2 600

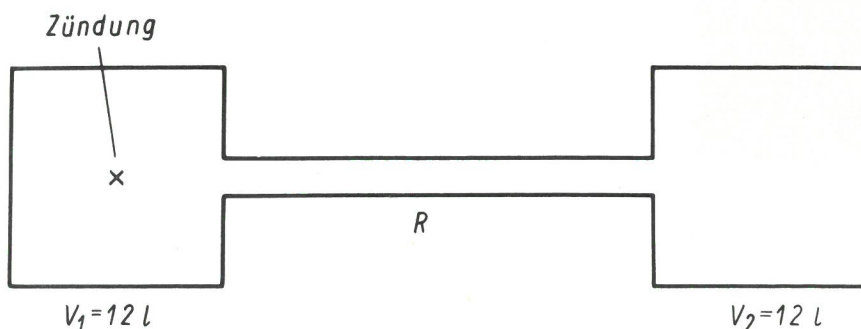


Bild 3
Versuchsanordnung

3.2 Würfelförmige Explosionskammer

In einer würfelförmigen Explosionskammer von 12 l Inhalt wurden Explosionsversuche mit Methan-, Propan- und Wasserstoff-Luftgemischen durchgeführt. Bild 2 zeigt die verwendete Versuchsanordnung, Tabelle 2 die bei zentraler Zündung erhaltenen Mittelwerte für p_{\max} und $(dp/dt)_{\max}$.

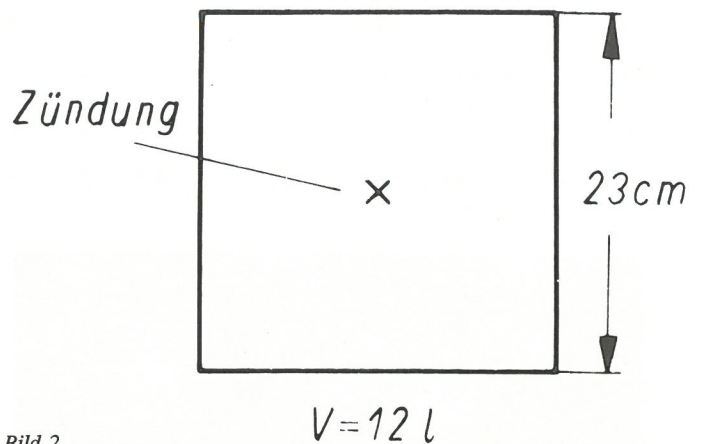


Bild 2
Versuchsanordnung

Tabelle 2

Versuchs-Nr.	Gemisch	Anfangsdruck [bar]	p_{\max} [bar]	$(dp/dt)_{\max}$ [bar/s]
11	10 % CH_4 in Luft	1	7,5	130
12	4 % C_3H_8 in Luft	1	8,5	210
13	25 % H_2 in Luft	1	7,0	1 550

Ein Vergleich der Tabellen 1 und 2 läßt deutlich werden, daß die Enddrücke im Würfelgefäß etwas, die maximalen Druckanstiegsgeschwindigkeiten beträchtlich unter entsprechenden Werten in der Kugel liegen.

3.3 Durch Rohrleitung verbundene Kammern

Die Versuche wurden mit Methan-, Propan- und Wasserstoff-Luft-Gemischen unter einem Anfangsdruck von 1 bar in durch Rohrleitungen verbundenen Kammern gleichen und unterschiedlichen Volumens unter Variation der Rohr-abmessungen und des Zündortes ausgeführt.

3.3.1 Versuchsanordnung:

Zwei Kammern gleichen Volumens ($V_1 = V_2 = 12 \text{ l}$), verbunden durch Rohrleitungen. Zündung zentral in V_1 (Bild 3). Die Versuchsergebnisse (Mittelwerte) sind in Tabelle 3 wiedergegeben, die Bilder 4 bis 8 zeigen zugehörige Oszillogramme des zeitlichen Druckverlaufs in beiden Kammern.

Tabelle 3

Versuchs-Nr.	Gemisch	Rohrabmessung		p_{\max} [bar]		$(dp/dt)_{\max}$ [bar/s]		Bild
		ϕ [cm]	Länge [cm]	in V_1	in V_2	in V_1	in V_2	
14	4 % C_3H_8 in Luft	4,8	25	8,0	8,3	250	250	
15		4,8	50	8,3	8,3	470	470	4
16		2,0	56	7,7	8,0	1 200	650	5
17	25 % H_2 in Luft	4,8	50	6,5	6,9	1 750	1 350	6
18		2,0	56	6,0	6,8	1 300	2 800	7
19	10 % CH_4 in Luft	2,0	56	6,8	7,5	700	900	8

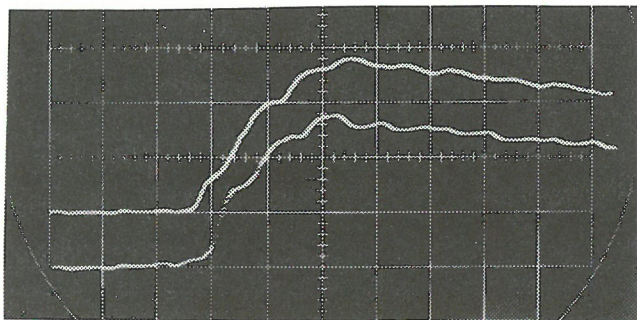


Bild 4
Zeitlicher Druckverlauf bei der Explosion
Versuchsanordnung s. Bild 3 und Tabelle 3
Ordinate: 2,5 bar/cm oberer Strahl: Verlauf in V_2
Abszisse: 10 ms/cm unterer Strahl: Verlauf in V_1

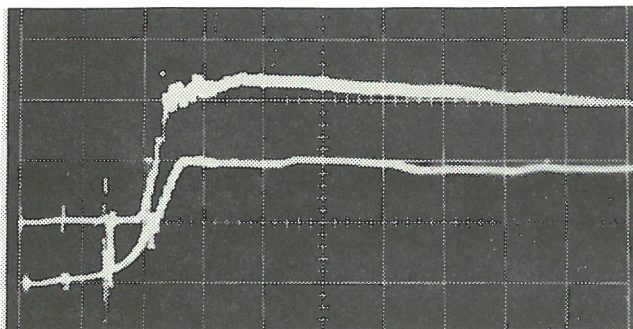


Bild 7
Zeitlicher Druckverlauf bei der Explosion
Versuchsanordnung s. Bild 3 und Tabelle 3
Ordinate: 2,5 bar/cm oberer Strahl: Verlauf in V_2
Abszisse: 5 ms/cm unterer Strahl: Verlauf in V_1

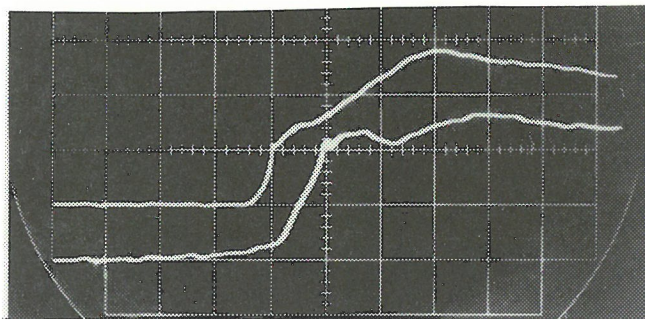


Bild 5
Zeitlicher Druckverlauf bei der Explosion
Versuchsanordnung s. Bild 3 und Tabelle 3
Ordinate: 2,5 bar/cm oberer Strahl: Verlauf in V_2
Abszisse: 10 ms/cm unterer Strahl: Verlauf in V_1

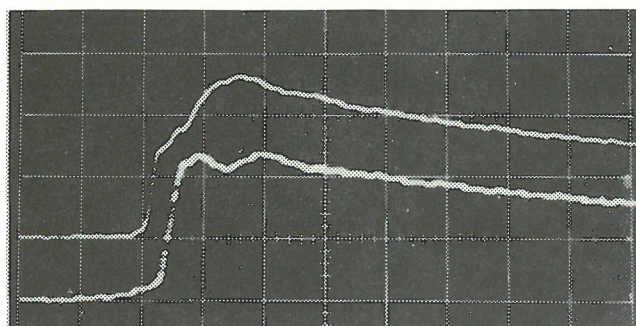


Bild 8
Zeitlicher Druckverlauf bei der Explosion
Versuchsanordnung s. Bild 3 und Tabelle 3
Ordinate: 2,5 bar/cm oberer Strahl: Verlauf in V_2
Abszisse: 20 ms/cm unterer Strahl: Verlauf in V_1

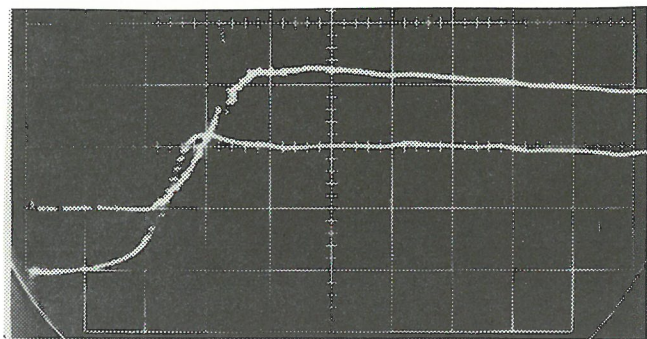


Bild 6
Zeitlicher Druckverlauf bei der Explosion
Versuchsanordnung s. Bild 3 und Tabelle 3
Ordinate: 2,5 bar/cm oberer Strahl: Verlauf in V_2
Abszisse: 5 ms/cm unterer Strahl: Verlauf in V_1

3.3.2 Versuchsanordnung wie in 3.3.1,

aber Zündung in V_1 3 cm von der Kammerrückwand (Bild 9).

Versuchsergebnisse (Mittelwerte) in Tabelle 4.

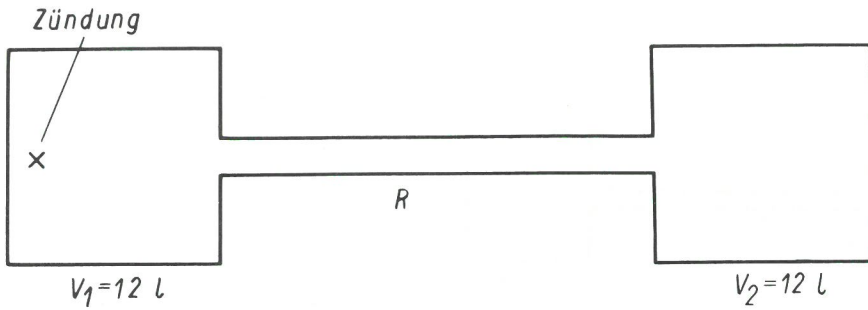


Bild 9
Versuchsanordnung

Tabelle 4

Versuchs-Nr.	Gemisch	Rohrabmessung		p_{\max} [bar]		$(dp/dt)_{\max}$ [bar/s]		Bild
		ϕ [cm]	Länge [cm]	in V_1	in V_2	in V_1	in V_2	
20	4 % C_3H_8 in Luft	4,8	50	8,0	8,4	1 300	1 400	
21	25 % H_2 in Luft	2,0	56	6,3	6,8	1 000	5 000	10
22	10 % CH_4 in Luft	4,8	50	7,8	7,8	1 200	900	
23		2,0	56	4,5 3,5	10,7 3,5	70 50	1 200 50	11 12

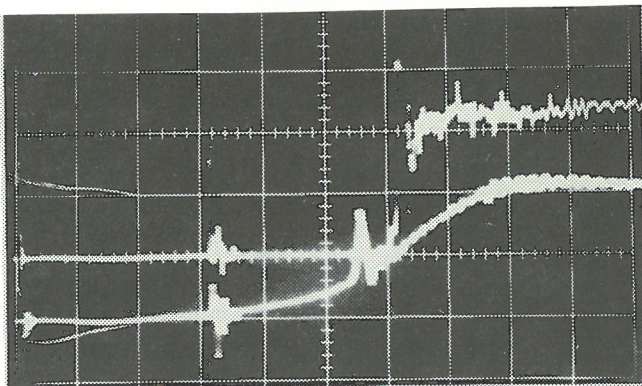


Bild 10
Zeitlicher Druckverlauf bei der Explosion
Versuchsanordnung s. Bild 9 und Tabelle 4
Ordinate: 2,5 bar/cm
Abszisse: 2 ms/cm
oberer Strahl: Verlauf in V_2
unterer Strahl: Verlauf in V_1

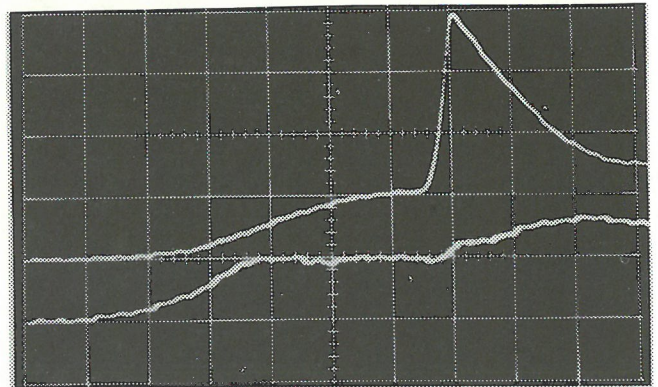
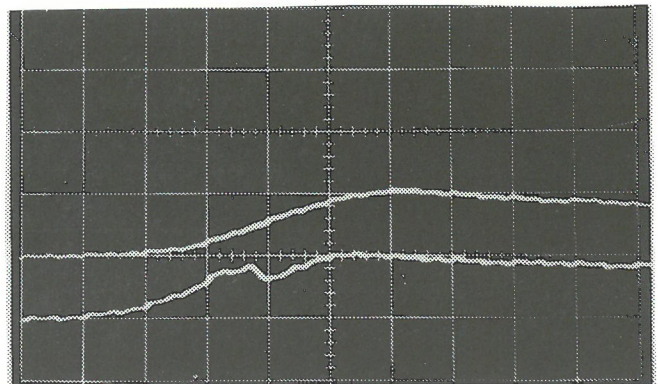


Bild 11
Zeitlicher Druckverlauf bei der Explosion
Versuchsanordnung s. Bild 9 und Tabelle 4
Ordinate: 2,5 bar/cm
Abszisse: 20 ms/cm
oberer Strahl: Verlauf in V_2
unterer Strahl: Verlauf in V_1

Bild 12
Zeitlicher Druckverlauf bei der Explosion
Versuchsanordnung s. Bild 9 und Tabelle 4
Ordinate: 2,5 bar/cm
Abszisse: 20 ms/cm
oberer Strahl: Verlauf in V_2
unterer Strahl: Verlauf in V_1



3.3.3 Versuchsanordnung:

Zwei Kammern mit $V_1 = 12 \text{ l}$ und $V_2 = 2 \text{ l}$, durch Rohrleitungen verbunden, Zündung zentral V_1 (Bild 13).

Versuchsergebnisse (Mittelwerte) in Tabelle 5.

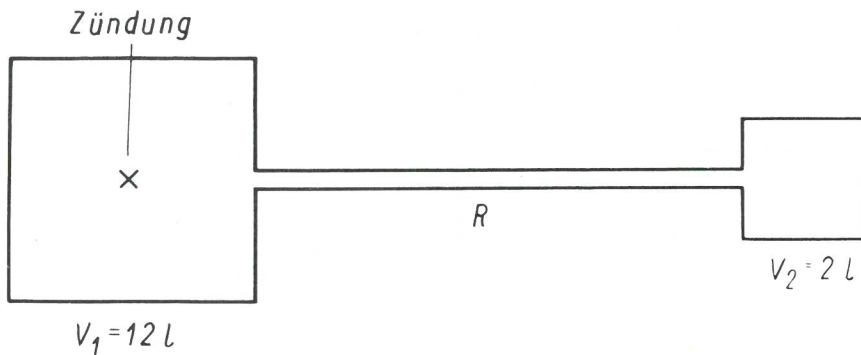


Bild 13
Versuchsanordnung

Tabelle 5

Versuchs-Nr.	Gemisch	Rohrabmessung		p_{\max} [bar]		$(dp/dt)_{\max}$ [bar/s]		Bild
		ϕ [cm]	Länge [cm]	in V_1	in V_2	in V_1	in V_2	
24	4 % C_3H_8 in Luft	2,0	56	7,1	7,3	900	4 400	14
25	10 % CH_4 in Luft	2,0	56	6,7	6,0	750	2 500	

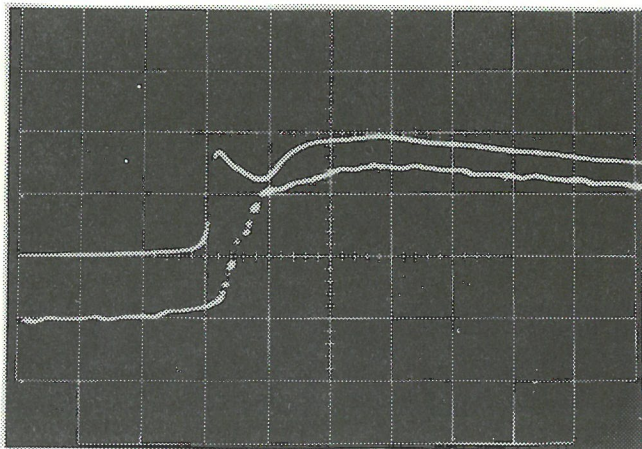


Bild 14
Zeitlicher Druckverlauf bei der Explosion
Versuchsanordnung s. Bild 13 und Tabelle 5
oberer Strahl: Verlauf in V_2 unterer Strahl: Verlauf in V_1
Ordinate: 3,3 bar/cm Ordinate: 2,5 bar/cm
Abszisse: 10 ms/cm Abszisse: 10 ms/cm

3.3.4 Versuchsanordnung wie in 3.3.3,

aber Zündung in V_1 3 cm von der Kammerrückwand (Bild 15).

Versuchsergebnisse (Mittelwerte) in Tabelle 6.

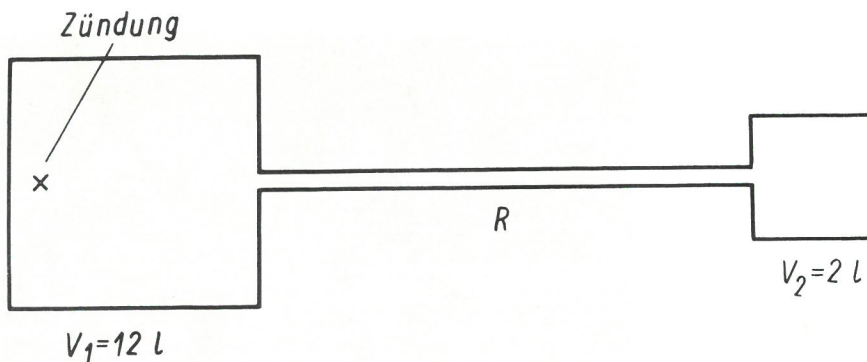


Bild 15
Versuchsanordnung

Tabelle 6

Versuchs-Nr.	Gemisch	Rohrabmessung		p_{\max} [bar]		$(dp/dt)_{\max}$ [bar/s]		Bild
		ϕ [cm]	Länge [cm]	in V_1	in V_2	in V_1	in V_2	
26	4 % C_3H_8 in Luft	2,0	56	7,3	11,2	1 000	7 000	16
27	10 % CH_4	2,0	56	6,7	10,1	1 000	6 000	

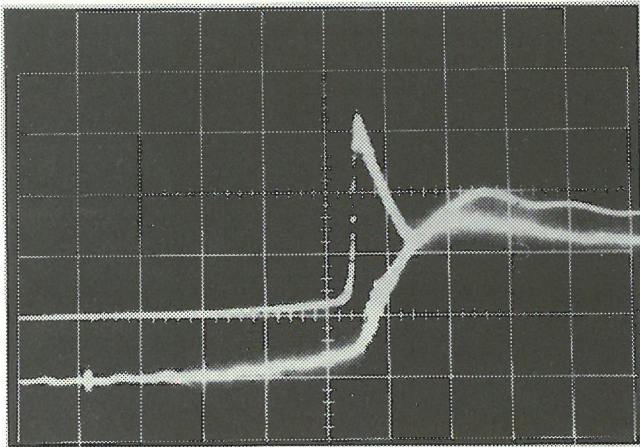


Bild 16

Versuchsanordnung s. Bild 15 und Tabelle 6
 oberer Strahl: Verlauf in V_2 unterer Strahl: Verlauf in V_1
 Ordinate: 3,3 bar/cm Ordinate: 2,5 bar/cm
 Abszisse: 50 ms/cm Abszisse: 50 ms/cm

3.4 Diskussion

Die Versuche machen deutlich, daß der Explosionsablauf in mit Rohrleitungen verbundenen Gefäßen sich beträchtlich vom Explosionsablauf in kubischen Gefäßen unterscheidet. Folgende Phänomene werden beobachtet:

- Mit zunehmender Länge und abnehmendem Querschnitt der verbindenden Rohrleitungen steigen die maximalen Druckanstiegsgeschwindigkeiten in den einzelnen Kammern an. Sie liegen ein Vielfaches höher als in kubischen Gefäßen gleichen Volumens (vgl. z. B. Nr. 12, 14, 15, 16).
- Bei ungleich großen Behältern nimmt unter sonst gleichen Bedingungen bei Zündung im größeren Behälter die maximale Druckanstiegsgeschwindigkeit im kleineren Behälter über alle Maßen zu (vgl. z. B. Nr. 16, 24).
- Liegt der Ort der Zündung weit genug von der Rohrmündung entfernt, so treten im anderen Behälter kurzfristig Drücke auf, die – wie ein Vergleich der Nr. 1 und 4 mit den Nr. 23, 26 und 27 zeigt – höher sind als sich nach thermodynamischer Rechnung (und Experimenten unter fast idealen Bedingungen im Kugelgefäß) ergeben. Der unterschiedliche zeitliche Druckverlauf in V_2 wird auch durch Vergleich der Abb. 8 mit 11 bzw. 14 mit 16 deutlich.
- Die bei Versuchen in kubischen Behältern sehr deutlich ausgeprägten Unterschiede der maximalen Druckanstiegsgeschwindigkeiten von Methan, Propan und Wasserstoff

im Gemisch mit Luft verwischen sich bei mit Rohrleitungen verbundenen Behältern.

Zu a):

In kubischen Behältern findet bei zentraler Zündung eine kugelförmige, laminare Flammenausbreitung statt. Die Gasbewegung ist dabei vor der Flammenfront radialsymmetrisch nach außen gerichtet. Ist an das Gefäß ein Rohr angeschlossen, so wird die Gasströmung unsymmetrisch in Richtung auf die Rohrmündung verzerrt. Die kugelförmige Flammenfront erleidet dabei eine mehr oder minder birnenförmige Ausstülpung in Richtung auf die Rohrmündung unter gleichzeitiger Vergrößerung der Brennfläche. Im Rohr angelangt, wird die Flamme durch die Querschnittsverengung beschleunigt und in Turbulenz versetzt (s. a. Bildfolge 27 a bis e). Beim Eintritt in die zweite Kammer (V_2) findet dort von Anfang an turbulente Verbrennung statt. Das Ausmaß der Turbulenz in der Rohrleitung hängt sowohl vom Rohrquerschnitt als auch von der Rohrlänge ab.

Zu b):

Je kleiner das Volumen V_2 bei ungeändertem Querschnitt der Rohrleitung ist, um so stärker wirkt sich eine Vorkompression (s. zu c)) des Frischgases aus und um so schneller wird der Behälterinhalt von der eintretenden turbulenten Flamme verwirbelt.

Zu c):

Im Verlauf der Explosion wird das vor der Flammenfront befindliche Frischgas komprimiert, während sich die hinter der Flamme befindlichen Verbrennungsgase ausdehnen. Da sich in kubischen Behältern die laminare Flamme mit einigen m/s fortpflanzt, die Druckausbreitung hingegen mit Schallgeschwindigkeit erfolgt, herrscht dort zu einem gegebenen Zeitpunkt überall im Raum praktisch der gleiche Druck. In mit Rohrleitungen kombinierten Gefäßen ist dieses nicht der Fall. Bei einer Behälterkombination wie der in Bild 9 dargestellten steigt – wie die Bilder 11 und 12 ausweisen – der Druck des Frischgases in V_2 wegen der vorgeschalteten Querschnittsverengung zunächst langsamer an als in V_1 . Die Verzögerung wird dabei um so größer anfallen, je länger die Rohrleitung und je kleiner ihr Querschnitt ist. Die Phase des Druckanstiegs durch bloße Kompression endet mit Eintritt der Flamme in V_2 . Der folgende Druckaufbau in V_2 wird – wie die Abb. 11 sehr anschaulich zeigt – ausschließlich von der hier ablaufenden turbulenten Verbrennung gespeist. Die Rohrleitung drosselt dabei die Rückströmung und läßt den Druck in V_2 u. U. über den in V_1 ansteigen. Dies tritt besonders dann ein, wenn der Rohrquerschnitt klein, die Verbrennung in V_2 schnell und der Grad der Vorkompression in V_2 vor Eintritt der Zündflamme hoch war. Eine hohe Vorkompression ergibt sich dann, wenn der Flammenübertritt erst spät erfolgt, z. B.

wenn der Ort der Primärzündung in V_1 von der Rohrmündung weg in Richtung auf die gegenüberliegende Behälterwand verlegt und damit die Wegstrecke für die Flamme verlängert wird. Mitunter erlischt die Flamme in der Rohrleitung. Wie Abb. 12 erkennen läßt, verharret der Druck dann in V_2 eine Zeit auf der durch Kompression erreichten Höhe und fällt schließlich wieder ab. Das dort vorhandene Gemisch bleibt unverbrannt.

Zu d):

Die Erläuterungen zu a) – c) machen verständlich, daß die spezifischen Verbrennungseigenschaften der einzelnen Gase in mit Rohrleitungen verbundenen Behältern den Explosionsablauf nicht in dem Maße bestimmen wie in kubischen Gefäßen.

4. Explosionsablauf bei direkter Druckentlastung einzelner und mehrerer durch Rohrleitungen verbundener Kammern

4.1 Würfelförmige Explosionskammer

Tabelle 7

Versuchs-Nr.	Gemisch	F [cm ²]	p_A [bar]	p_{red} [bar]	Bild
28	10 % CH ₄ in Luft	10,4	1,15	1,6	18
29			1,5	1,7	
30		20,8	1,15	1,15	19
31			1,4	1,4	20
32			1,6	1,6	21
33	4 % C ₃ H ₈ in Luft	10,4	1,2	2,15	
34			1,5	2,4	
35		20,8	1,2	1,35	
36			2,0	4,8	
37	25 % H ₂ in Luft	10,4	1,6	4,55	
38		20,8	1,2	3,8	
39			2,0	4,8	
40		41,5	1,2	2,5	
41			2,0	3,5	

Versuchsordnung:

12 l-Kammer mit variabler Druckentlastungsöffnung. Abschluß der Öffnung mit Papier oder Kunststoffolie. Dadurch Variation des Ansprechdrucks p_A möglich. Zentrale Zündung (Bild 17). Die gemessenen reduzierten Maximaldrücke p_{red} (Mittelwerte) sind in Tabelle 7 aufgeführt.

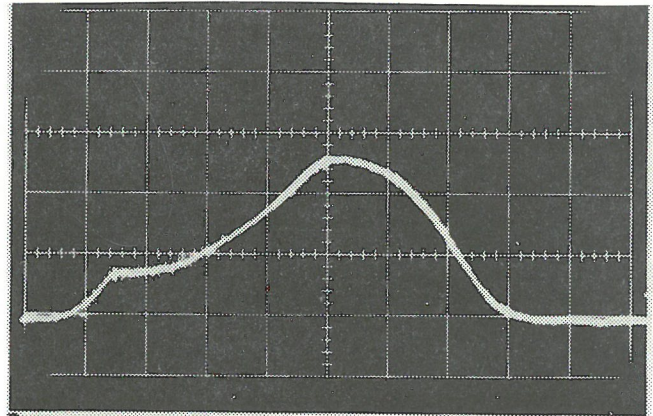


Bild 18
Zeitlicher Druckverlauf bei einer druckentlasteten Explosion
Versuchsordnung s. Bild 17 und Tabelle 7
Ordinate: 0,2 bar/cm Abszisse: 20 ms/cm

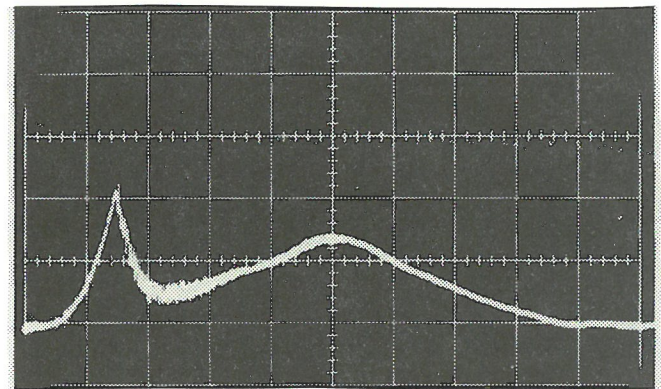


Bild 19
Zeitlicher Druckverlauf bei einer druckentlasteten Explosion
Versuchsordnung s. Bild 17 und Tabelle 7
Ordinate: 0,2 bar/cm Abszisse: 20 ms/cm

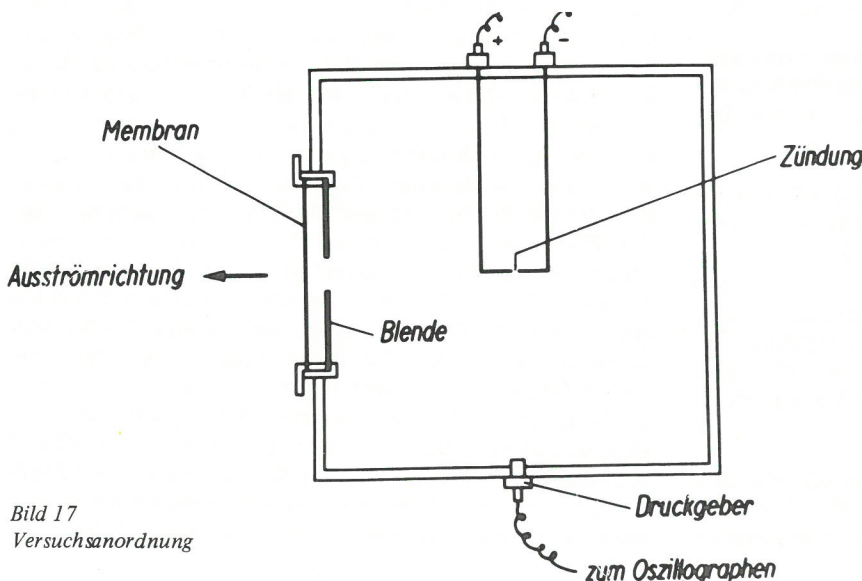


Bild 17
Versuchsordnung

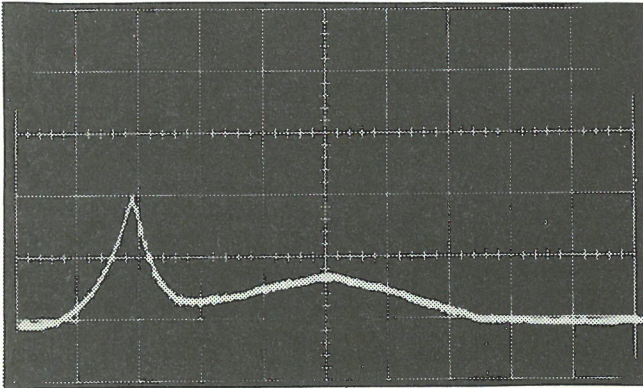


Bild 20
 Zeitlicher Druckverlauf bei einer druckentlasteten Explosion
 Versuchsanordnung s. Bild 17 und Tabelle 7
 Ordinate: 0,2 bar/cm Abszisse: 20 ms/cm

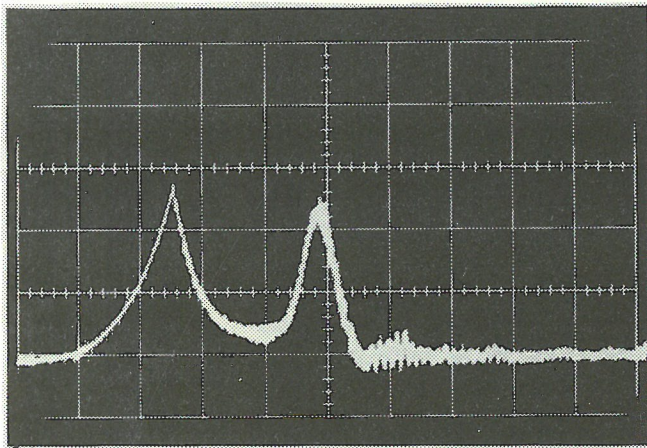


Bild 21
 Zeitlicher Druckverlauf bei einer druckentlasteten Explosion
 Versuchsanordnung s. Bild 17 und Tabelle 7
 Ordinate: 0,4 bar/cm Abszisse: 20 ms/cm

Die Bilder 19 bis 21 lassen erkennen, daß nach Platzen der Membran und Abfallen des Drucks dieser erneut wieder auf einen Wert ansteigt, der etwa beim Ansprechdruck der Membran liegt. Bei noch kleinerer Öffnung (Bild 18) kann die 2. Druckspitze sogar beträchtlich über dem Berstdruck der Membran liegen. Solche Vorgänge sind bekannt und beruhen auf einer induzierten Turbulenz im Gefäßinneren als Folge der Druckentlastung²⁾.

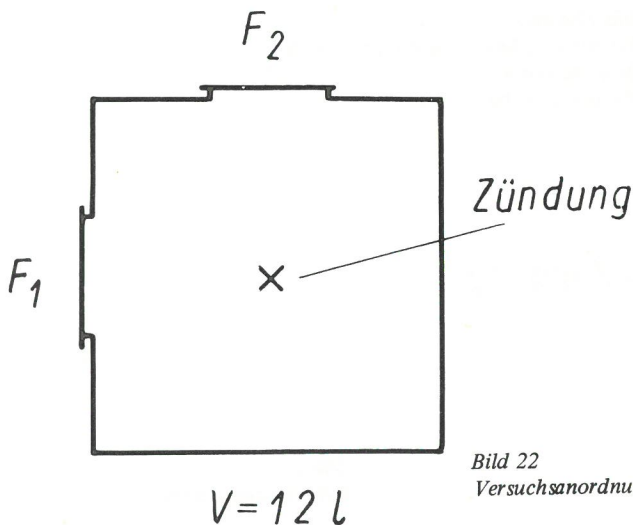


Bild 22
 Versuchsanordnung

Oft ist es aus technischen Gründen nicht möglich, die notwendige Entlastungsfläche in einer Öffnung unterzubringen. Man teilt diese dann auf mehrere Öffnungen auf. Da nicht von der Hand zu weisen war, daß bei einer solchen Aufteilung verstärkte Turbulenzeffekte bei Druckentlastung ins Spiel kommen, wurden entsprechende Modellversuche unternommen. Bild 22 zeigt die Versuchsanordnung, Tabelle 8 gibt die Versuchsergebnisse (Mittelwerte) wieder.

Tabelle 8

Versuchs-Nr.	Gemisch	F [cm ²]	p _A [bar]	p _{red} [bar]	Bild
42	10 % CH ₄ in Luft	2 × 10,4	1,15	1,15	23
43			1,33	1,36	24
44			1,55	1,8	25

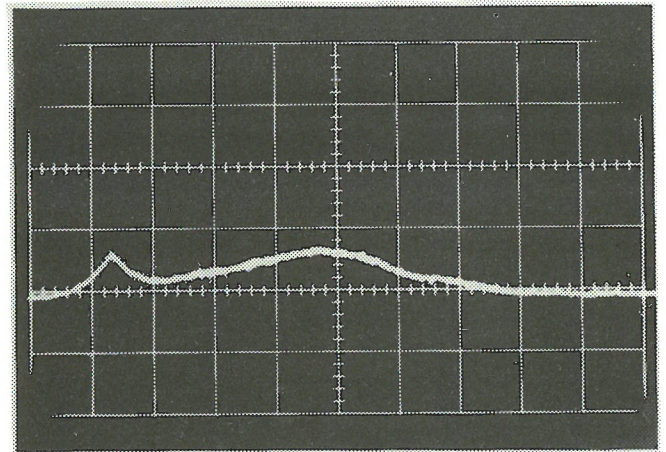


Bild 23
 Zeitlicher Druckverlauf bei einer druckentlasteten Explosion
 Versuchsanordnung s. Bild 22 und Tabelle 8
 Ordinate: 0,2 bar/cm Abszisse: 20 ms/cm

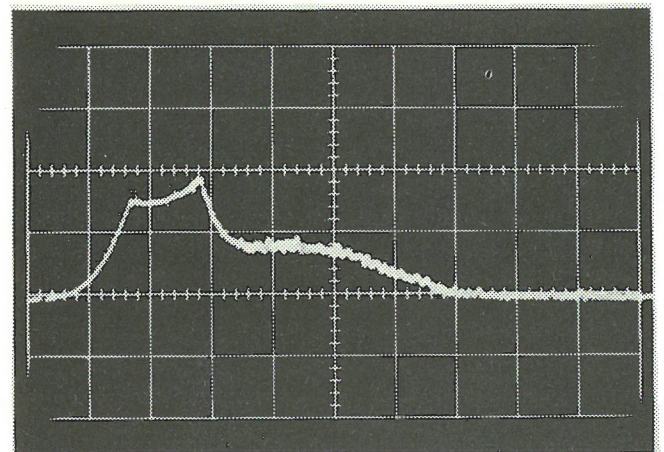


Bild 24
 Zeitlicher Druckverlauf bei einer druckentlasteten Explosion
 Versuchsanordnung s. Bild 22 und Tabelle 8
 Ordinate: 0,2 bar/cm Abszisse: 20 ms/cm

Die Bilder 24 und 25 lassen jeweils deutlich das zeitlich gegeneinander versetzte Ansprechen beider Druckentlastungs-membranen erkennen.

Wie sich durch Vergleich mit den entsprechenden Versuchen

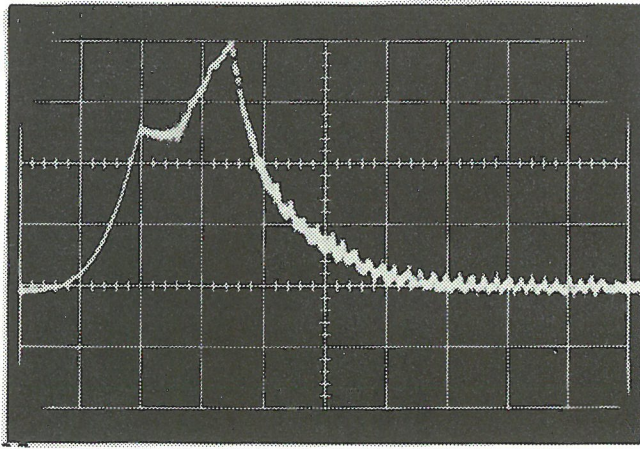


Bild 25
 Zeitlicher Druckverlauf bei einer druckentlasteten Explosion
 Versuchsanordnung s. Bild 22 und Tabelle 8
 Ordinate: 0,2 bar/cm Abszisse: 20 ms/cm

bei nur einer Öffnung doppelten Querschnitts (Vers. Nr. 30 bis 32) ergibt, tritt bei Teilung der Entlastungsfläche auf zwei Öffnungen bei kleinen Ansprechdrücken keine, bei höheren Ansprechdrücken allenfalls eine geringfügige Erhöhung von p_{red} auf.

4.2 Doppelkammer

Ähnliche wie die in 4.1 geschilderten Effekte können in verstärktem Maße bei Änderung der Gefäßgeometrie auftreten. Hierzu wurden zwei Explosionskammern von je 12 l aneinandergesetzt und durch eine Öffnung veränderlichen Querschnitts miteinander verbunden (Bild 26). Es wurde in der rechten Kammer gezündet; die Druckentlastungsfläche befand sich in der linken Kammer gegenüber der Verbindungsöffnung. Die Bildfolge 27 zeigt die Entwicklung der Explosion.

Zunächst pflanzt sich die Flamme kugelförmig und laminar fort. Beim Durchgang durch die verhältnismäßig kleine Öffnung in der gemeinsamen Mittelwand ($F = 10 \text{ cm}^2$) wird das Gas beschleunigt und tritt turbulent mit hoher Geschwindigkeit in die linke Kammer ein (Abb. 27 a). An der noch geschlossenen Entlastungsfläche wird der Flammenstrahl aufgestaut und nach allen Seiten abgelenkt (Abb. 27 b). Die hierdurch bedingte Vergrößerung der Brennfläche läßt die Brutto-Reaktionsgeschwindigkeit in der linken Kammer stark ansteigen. Als Folge des sich dabei aufbauenden Überdrucks werden die brennenden Schwaden mit

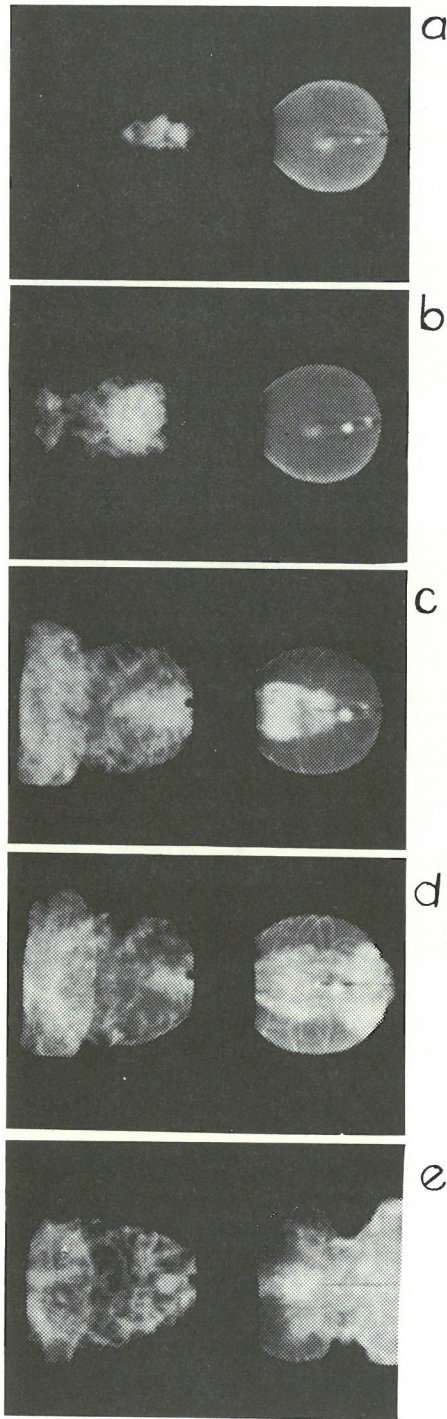


Bild 27 a bis e
 Verlauf der Flammenausbreitung in der
 Doppelkammer
 Versuchsanordnung s. Bild 26

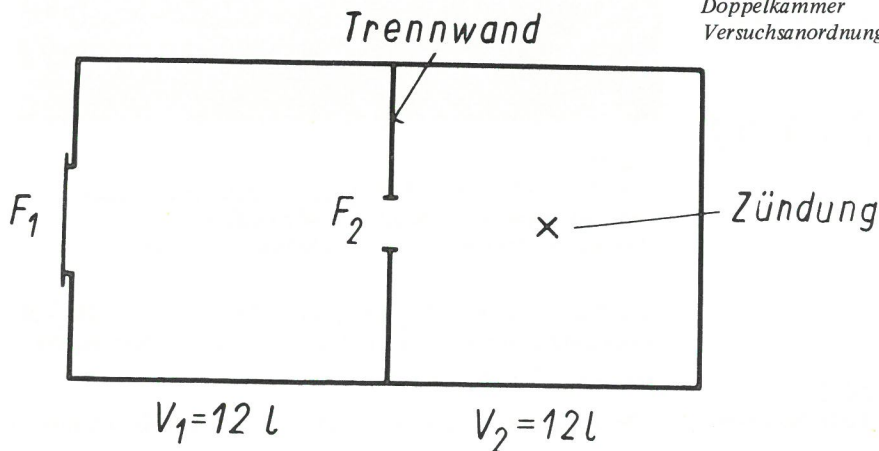


Bild 26
 Versuchsanordnung

sehr großer Geschwindigkeit in die rechte Kammer zurückgetrieben (Abb. 27 c). Abb. 27 d wurde unmittelbar nach dem Platzen der Entlastungsmembran aufgenommen. Links sind die aus der Entlastungsöffnung austretenden Schwaden sichtbar; in der rechten Kammer kehrt der Flammenstrahl nach Erreichen der rechten Kammerwand und unter dem Einfluß des wieder entgegengesetzten Druckgefälles seine Richtung erneut um. Schließlich findet auch in der rechten Kammer eine turbulente Verbrennung auf breiter Front statt (Abb. 27 e).

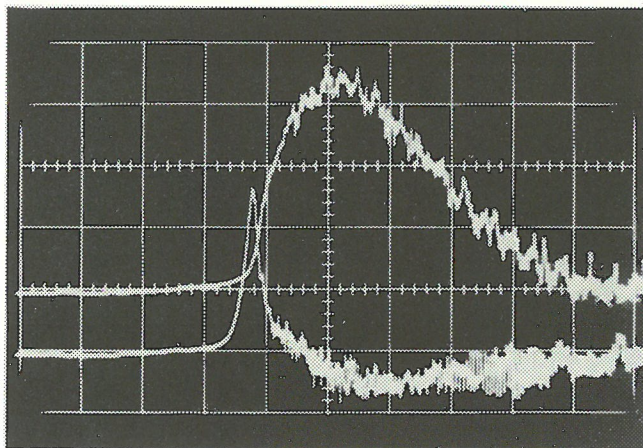


Bild 28
Zeitlicher Druckverlauf bei einer druckentlasteten Explosion
Versuchsanordnung s. Bild 26
oberer Strahl: Verlauf in V_2 unterer Strahl: Verlauf in V_1
Ordinate: 0,8 bar/cm Ordinate: 0,4 bar/cm
Abszisse: 10 ms/cm Abszisse: 10 ms/cm

Im entsprechenden Druck-Zeit-Diagramm, s. Bild 28, steigt zunächst – in Übereinstimmung mit dem gefilmten Verlauf – der Druck in der linken Kammer wegen der dort herrschenden turbulenten Verbrennung schneller an als in der rechten. Nach dem Platzen der Membran nimmt der Druck in der linken Kammer wieder schnell ab. In der rechten Kammer baut sich dagegen wegen der dort verstärkt einsetzenden turbulenten Verbrennung (vgl. Abb. 27 d) und begünstigt durch die relativ kleine Entlastungsöffnung in der Mittelwand zunächst ein sehr hoher Druck auf. Das im Laufe der Explosion erreichte sekundäre Druckmaximum in der rechten Kammer hängt – wie die Versuche zeigen – empfindlich vom Querschnitt der Blendenöffnung in der Mittelwand ab; es verschwindet vollständig, wenn Mittelöffnung und Entlastungsöffnung gleich groß gemacht werden.

4.3 Durch Rohrleitung verbundene Kammern

Die Versuche wurden mit Methan/-, Propan/- und Wasser-

Tabelle 9

Versuchs-Nr.	Gemisch	F [cm ²]	p _A [bar]	p _{pred} [bar]		Bild
				V ₁	V ₂	
45	10 % CH ₄ in Luft	2 x 10,4	1,15	3,1	3,7	30
46			1,40	3,0	3,7	
47			1,15	1,9	2,4	
48			1,40	2,2	3,0	
49	4 % C ₃ H ₈ in Luft	2 x 20,8	1,15	2,0	2,9	
50			1,40	2,8	5,3	
51	25 % H ₂ in Luft	2 x 41,5	1,15	2,0	1,7	32
52			1,40	3,0	4,0	

stoff/Luft-Gemischen unter einem Anfangsdruck von 1 bar in durch Rohrleitungen verbundenen Kammern gleichen und unterschiedlichen Volumens unter Variation von Ort und Größe der Druckentlastungsöffnungen sowie vom Ort der Zündung vorgenommen.

4.3.1 Versuchsanordnung:

Zwei Kammern gleichen Volumens ($V_1 = V_2 = 12$ l), verbunden durch eine Rohrleitung von 2 cm Durchmesser und 56 cm Länge. Zündung zentral in V_1 . Entlastung in V_1 und V_2 (Bild 29). Die Versuchsergebnisse sind in Tabelle 9 wiedergegeben, die Bilder 30 bis 33 zeigen zugehörige Oszillogramme des zeitlichen Druckverlaufs in beiden Kammern.

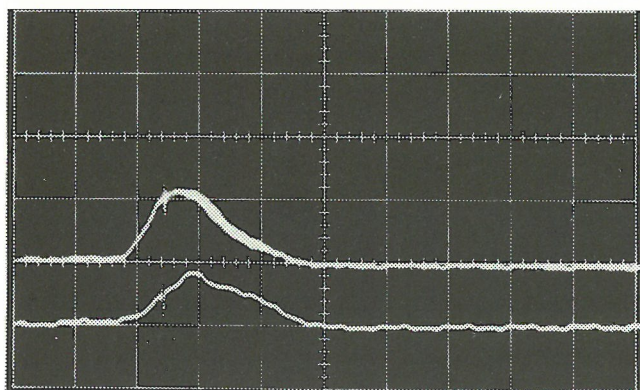


Bild 30
Zeitlicher Druckverlauf bei einer druckentlasteten Explosion
Versuchsanordnung s. Bild 29 und Tabelle 9
Ordinate: 2,5 bar/cm oberer Strahl: Verlauf in V_2
Abszisse: 20 ms/cm unterer Strahl: Verlauf in V_1

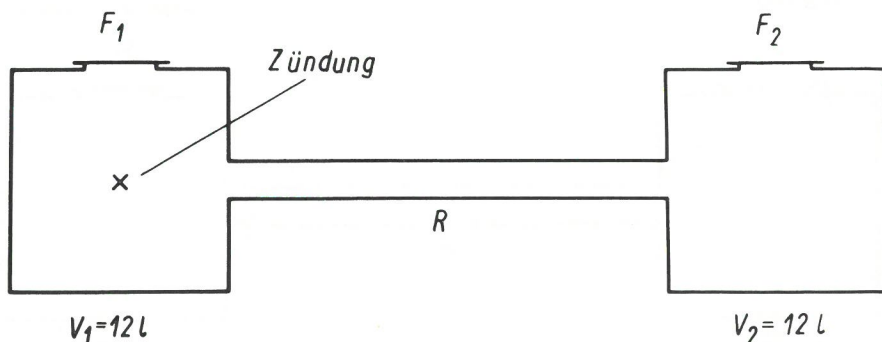


Bild 29
Versuchsanordnung

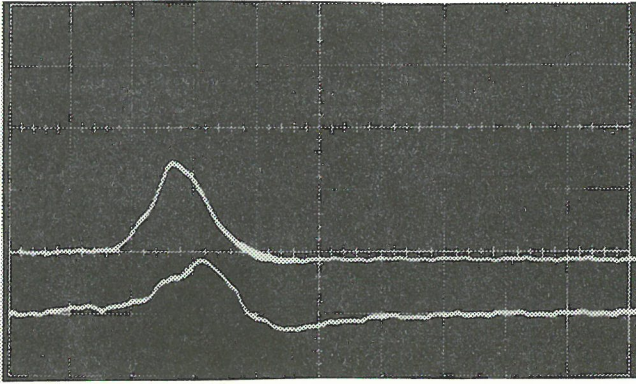


Bild 31
 Zeitlicher Druckverlauf bei einer druckentlasteten Explosion
 Versuchsanordnung s. Bild 29 und Tabelle 9
 Ordinate: 1 bar/cm oberer Strahl: Verlauf in V_2
 Abszisse: 10 ms/cm unterer Strahl: Verlauf in V_1

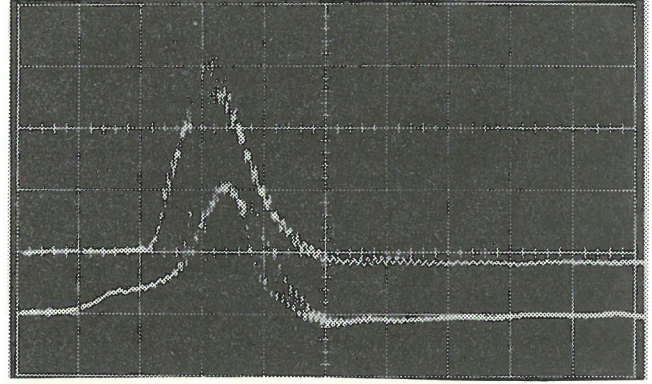


Bild 33
 Zeitlicher Druckverlauf bei einer druckentlasteten Explosion
 Versuchsanordnung s. Bild 29 und Tabelle 9
 Ordinate: 1 bar/cm oberer Strahl: Verlauf in V_2
 Abszisse: 5 ms/cm unterer Strahl: Verlauf in V_1

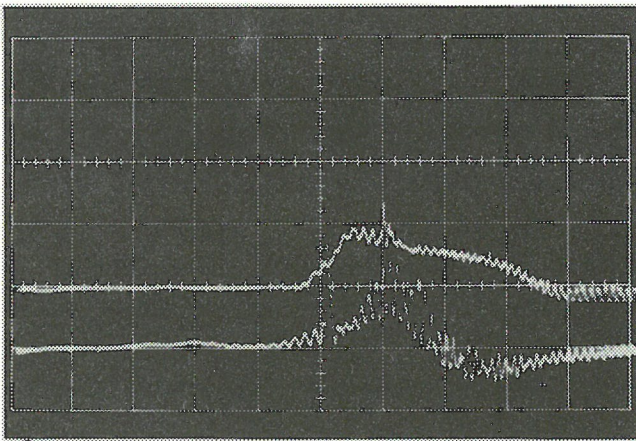


Bild 32
 Zeitlicher Druckverlauf bei einer druckentlasteten Explosion
 Versuchsanordnung s. Bild 29 und Tabelle 9
 Ordinate: 1 bar/cm oberer Strahl: Verlauf in V_2
 Abszisse: 5 ms/cm unterer Strahl: Verlauf in V_1

Tabelle 10

Versuchs-Nr.	Gemisch	F [cm ²]	p_A [bar]	p_{red} [bar]		Bild
				in V_1	V_2	
53	10 % CH ₄ in Luft	2 x 10,4	1,15	2,7	5,2	35
54			1,40	3,0	7,4	
55		2 x 20,8	1,15	1,25	1,9	36
56			1,40	2,3	4,9	37
57	4 % C ₃ H ₈ in Luft	2 x 20,8	1,15	1,6	3,0	
58			1,40	1,5	5,5	
59	25 % H ₂ in Luft	2 x 41,5	1,15	1,4	2,1	38
60			1,40	1,9	4,2	39

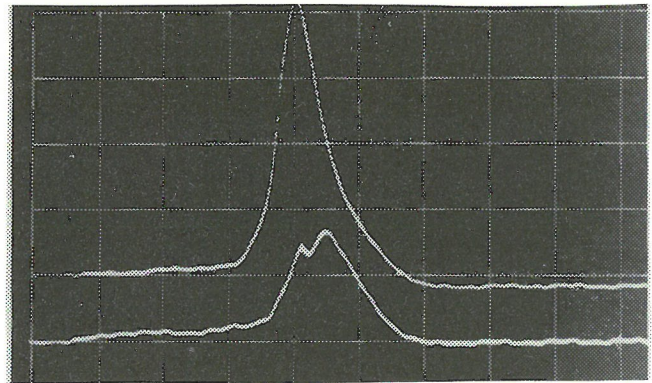


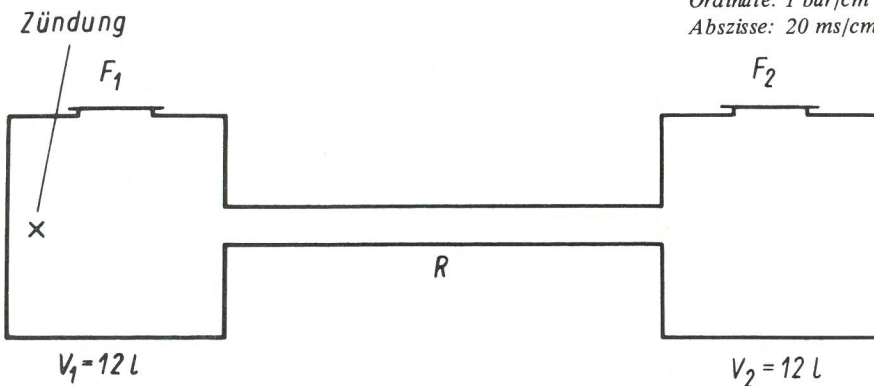
Bild 35
 Zeitlicher Druckverlauf bei einer druckentlasteten Explosion
 Versuchsanordnung s. Bild 34 und Tabelle 10
 Ordinate: 1 bar/cm oberer Strahl: Verlauf in V_2
 Abszisse: 20 ms/cm unterer Strahl: Verlauf in V_1

4.3.2 Versuchsanordnung wie in 4.3.1,

aber Zündung in V_1 3 cm von Kammerrückwand (Bild 34).

Die Versuchsergebnisse (Mittelwerte) sind in Tabelle 10 wiedergegeben, die Bilder 35 bis 39 zeigen zugehörige Druck/Zeit-Oszillogramme.

Bild 34
 Versuchsanordnung



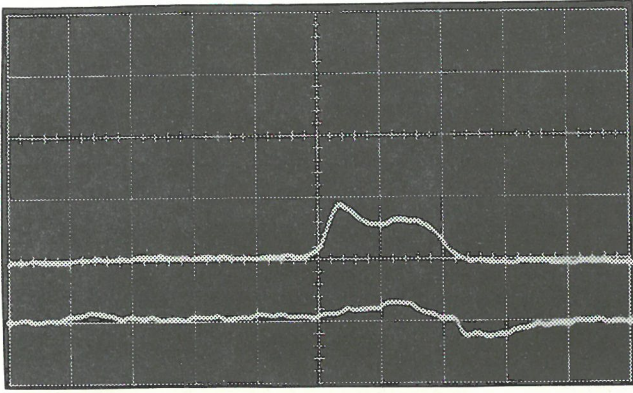


Bild 36
 Zeitlicher Druckverlauf bei einer druckentlasteten Explosion
 Versuchsanordnung s. Bild 34 und Tabelle 10
 Ordinate: 1 bar/cm oberer Strahl: Verlauf in V_2
 Abszisse: 20 ms/cm unterer Strahl: Verlauf in V_1

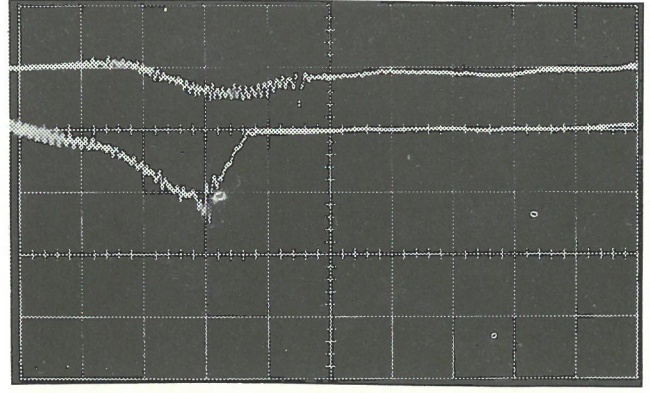


Bild 38
 Zeitlicher Druckverlauf bei einer druckentlasteten Explosion
 Versuchsanordnung s. Bild 34 und Tabelle 10
 Ordinate: 1 bar/cm oberer Strahl: Verlauf in V_2
 Abszisse: 5 ms/cm unterer Strahl: Verlauf in V_1

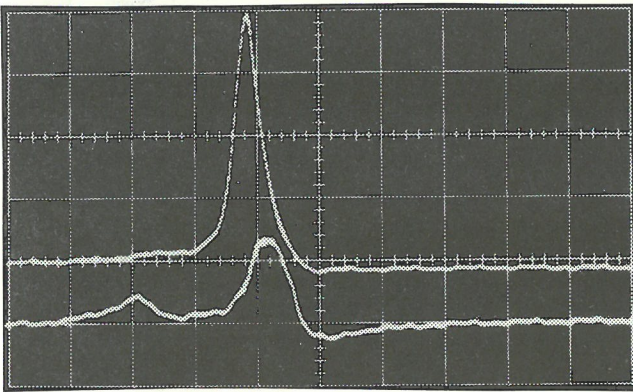


Bild 37
 Zeitlicher Druckverlauf bei einer druckentlasteten Explosion
 Versuchsanordnung s. Bild 34 und Tabelle 10
 Ordinate: 1 bar/cm oberer Strahl: Verlauf in V_2
 Abszisse: 20 ms/cm unterer Strahl: Verlauf in V_1

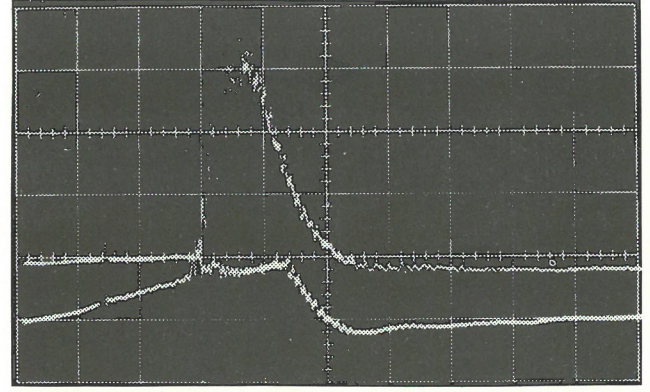


Bild 39
 Zeitlicher Druckverlauf bei einer druckentlasteten Explosion
 Versuchsanordnung s. Bild 34 und Tabelle 10
 Ordinate: 1 bar/cm oberer Strahl: Verlauf in V_2
 Abszisse: 5 ms/cm unterer Strahl: Verlauf in V_1

4.3.3 Versuchsanordnung:

Zwei Kammern gleichen Volumens ($V_1 = V_2 = 12 \text{ l}$), verbunden durch eine Rohrleitung von 2 cm Durchmesser und 56 cm Länge. Zündung in V_1 3 cm von Kammerrückwand entfernt. Entlastung in V_1 (Bild 40).

Versuchsergebnisse (Mittelwerte) sind in Tabelle 11 dargestellt, die Abb. 41 und 42 zeigen den zeitlichen Druck/Zeitverlauf.

Bild 40
 Versuchsanordnung

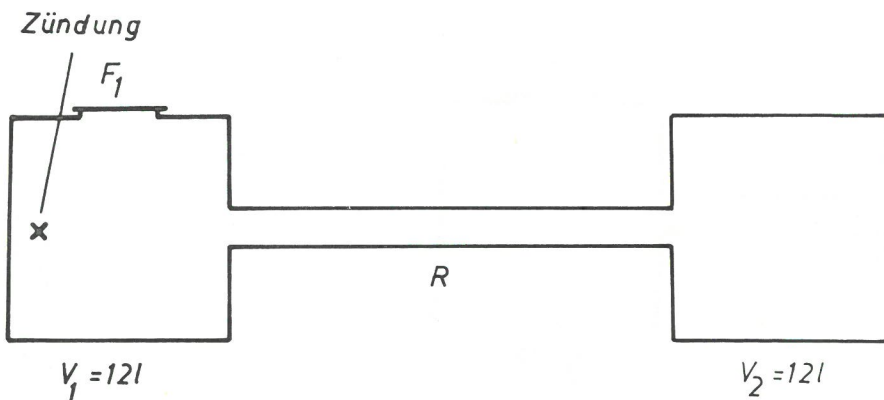


Tabelle 11

Versuchs-Nr.	Gemisch	$F [\text{cm}^2]$	$p_A [\text{bar}]$	$p_{\text{Pred}} [\text{bar}]$		Bild
				in V_1	V_2	
61	10 % CH_4 in Luft	20,8	1,15	1,75	7,1	41
62			1,40	2,9	8,7	42

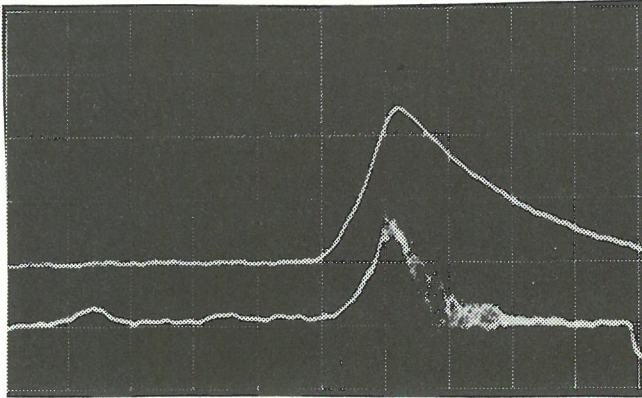


Bild 41
 Zeitlicher Druckverlauf bei einer Explosion mit Druckentlastung
 Versuchsanordnung s. Bild 40 und Tabelle 11
 oberer Strahl: Verlauf in V_2 unterer Strahl: Verlauf in V_1
 Ordinate: 2,5 bar/cm Ordinate: 0,5 bar/cm
 Abszisse: 20 ms/cm Abszisse: 20 ms/cm



Bild 42
 Zeitlicher Druckverlauf bei einer Explosion mit Druckentlastung
 Versuchsanordnung s. Bild 40 und Tabelle 11
 oberer Strahl: Verlauf in V_2 unterer Strahl: Verlauf in V_1
 Ordinate: 2,5 bar/cm Ordinate: 1 bar/cm
 Abszisse: 20 ms/cm Abszisse: 20 ms/cm

4.3.4 Versuchsanordnung wie in 4.3.3,

aber Entlastung in V_2 (Bild 43). Versuchsergebnisse (Mittelwerte sind in Tabelle 12, ausgewählte Druckzeit/Kurven in den Bildern 44 und 45 wiedergegeben.

Bild 43
 Versuchsanordnung

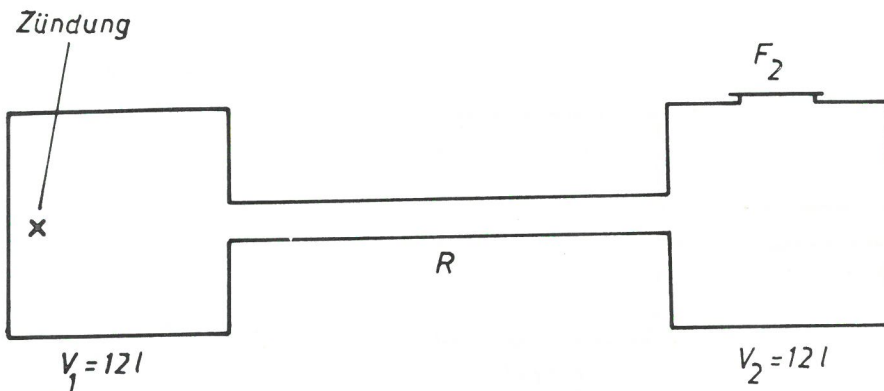


Tabelle 12

Versuchs-Nr.	Gemisch	F [cm ²]	p _A [bar]	p _{red} [bar]		Bild
				in V ₁	V ₂	
63	10 % CH ₄ in Luft	20,8	1,15	3,7	1,3	44
64				3,7	1,7	45

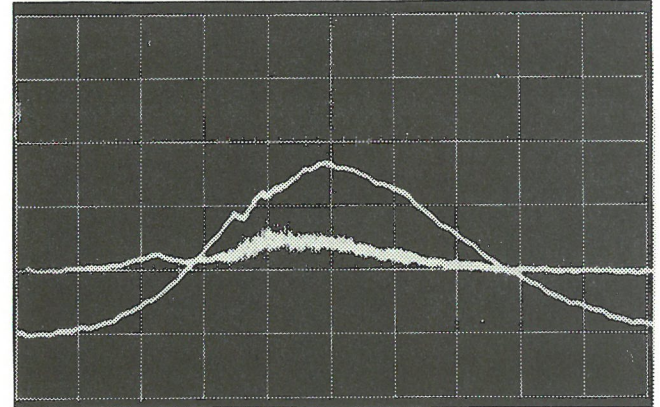


Bild 44
 Zeitlicher Druckverlauf bei einer Explosion mit Druckentlastung
 Versuchsanordnung s. Bild 43 und Tabelle 12
 oberer Strahl: Verlauf in V_2 unterer Strahl: Verlauf in V_1
 Ordinate: 0,5 bar/cm Ordinate: 1 bar/cm
 Abszisse: 20 ms/cm Abszisse: 20 ms/cm

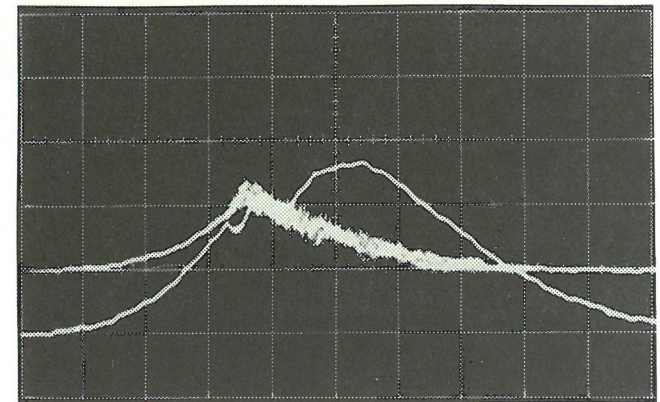


Bild 45
 Zeitlicher Druckverlauf bei einer Explosion mit Druckentlastung
 Versuchsanordnung s. Bild 43 und Tabelle 12
 oberer Strahl: Verlauf in V_2 unterer Strahl: Verlauf in V_1
 Ordinate: 0,5 bar/cm Ordinate: 1 bar/cm
 Abszisse: 20 ms/cm Abszisse: 20 ms/cm

4.3.5 Versuchsanordnung:

Zwei Kammern mit $V_1 = 12 \text{ l}$ und $V_2 = 2 \text{ l}$, durch eine Rohrleitung von 2 cm Durchmesser und 56 cm Länge verbunden.

Zündung zentral in V_1 , Entlastung in V_1 (Bild 46). Versuchsergebnisse (Mittelwerte) in Tabelle 13, Druck/Zeit-Kurven in den Abb. 47 bis 49.

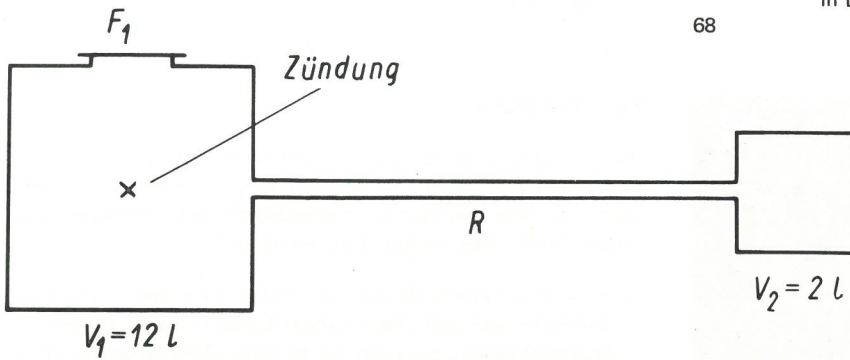


Bild 46
Versuchsanordnung

Versuchs-Nr.	Gemisch	F [cm ²]	p _A [bar]	p _{red} [bar]		Bild
				V ₁	V ₂	
65	10 % CH ₄ in Luft	20,8	1,15	2,7	5,6	47
66			1,40	3,2	6,3	48
67	4 % C ₃ H ₈ in Luft	20,8	1,15	3,0	6,2	49
68			1,40	3,6	7,0	

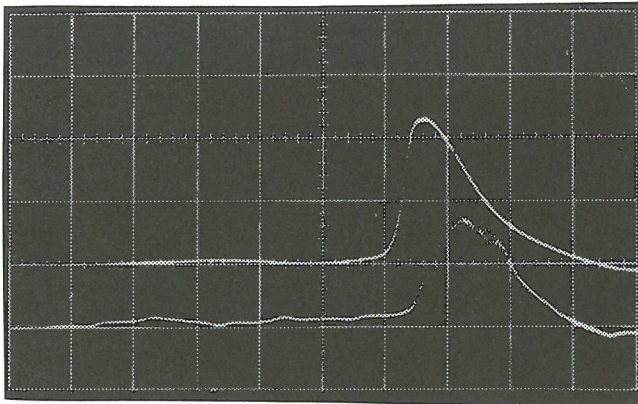


Bild 47
Zeitlicher Druckverlauf bei einer Explosion mit Druckentlastung
Versuchsanordnung s. Bild 46 und Tabelle 13
oberer Strahl: Verlauf in V₂ unterer Strahl: Verlauf in V₁
Ordinate: 2 bar/cm Ordinate: 1 bar/cm
Abszisse: 20 ms/cm Abszisse: 20 ms/cm

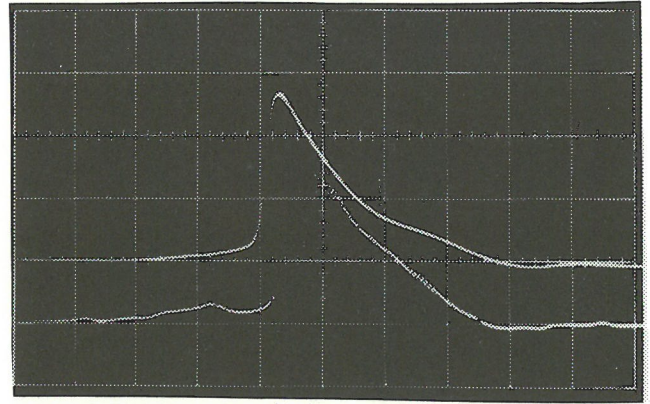


Bild 48
Zeitlicher Druckverlauf bei einer Explosion mit Druckentlastung
Versuchsanordnung s. Bild 46 und Tabelle 13
oberer Strahl: Verlauf in V₂ unterer Strahl: Verlauf in V₁
Ordinate: 2 bar/cm Ordinate: 1 bar/cm
Abszisse: 20 ms/cm Abszisse: 20 ms/cm

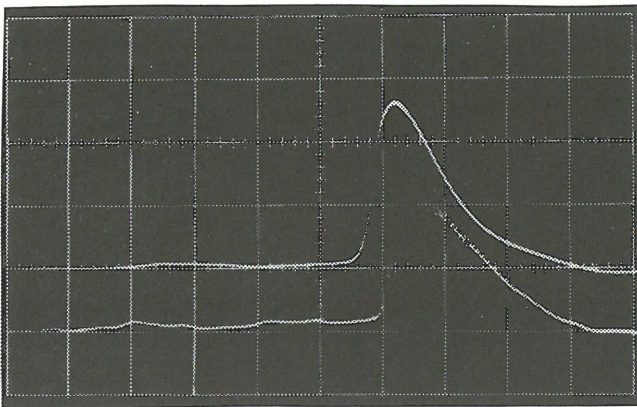


Bild 49
Zeitlicher Druckverlauf bei einer Explosion mit Druckentlastung
Versuchsanordnung s. Bild 46 und Tabelle 13
oberer Strahl: Verlauf in V₂ unterer Strahl: Verlauf in V₁
Ordinate: 2 bar/cm Ordinate: 1 bar/cm
Abszisse: 20 ms/cm Abszisse: 20 ms/cm

4.3.6 Versuchsanordnung wie in 4.3.5,

aber Zündung in V₁ 3 cm vor Kammerrückwand (Bild 50). Versuchsergebnisse (Mittelwerte) in Tabelle 14, die Bilder 51 bis 53 zeigen den Druck/Zeit-Verlauf.

Versuchs-Nr.	Gemisch	F [cm ²]	p _A [bar]	p _{red} [bar]		Bild
				V ₁	V ₂	
69	10 % CH ₄ in Luft	10,4	1,15	>2,5	7,2	51
70			1,40	3,3	8,3	52
71		20,8	1,15	1,15	1,15	
72			1,40	1,40	1,40	
73	4 % C ₃ H ₈ in Luft	10,4	1,15	2,3	9,0	53
74				1,40	2,3	9,0

Zündung

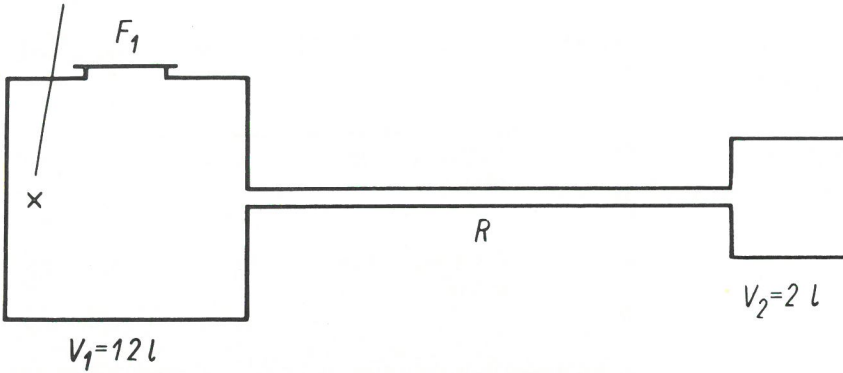


Bild 50
Versuchsordnung

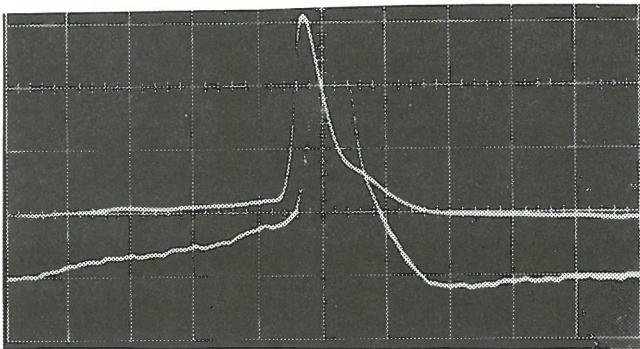


Bild 51
Zeitlicher Druckverlauf bei einer Explosion mit Druckentlastung
Versuchsordnung s. Bild 50 und Tabelle 14
oberer Strahl: Verlauf in V_2 unterer Strahl: Verlauf in V_1
Ordinate: 2 bar/cm Ordinate: 0,5 bar/cm
Abszisse: 20 ms/cm Abszisse: 20 ms/cm

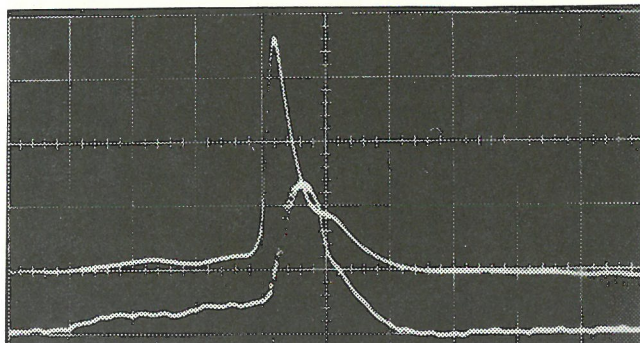


Bild 52
Zeitlicher Druckverlauf bei einer Explosion mit Druckentlastung
Versuchsordnung s. Bild 50 und Tabelle 14
oberer Strahl: Verlauf in V_2 unterer Strahl: Verlauf in V_1
Ordinate: 2 bar/cm Ordinate: 1 bar/cm
Abszisse: 20 ms/cm Abszisse: 20 ms/cm

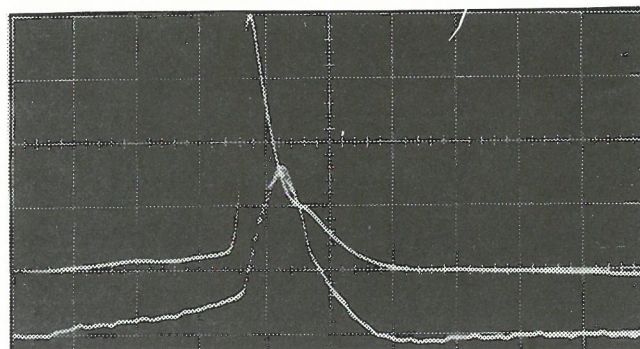


Bild 53
Zeitlicher Druckverlauf bei einer Explosion mit Druckentlastung
Versuchsordnung s. Bild 50 und Tabelle 14
oberer Strahl: Verlauf in V_2 unterer Strahl: Verlauf in V_1
Ordinate: 2 bar/cm Ordinate: 0,5 bar/cm
Abszisse: 20 ms/cm Abszisse: 20 ms/cm

4.4 Diskussion

Die Versuche zeigen, daß sich der Explosionsablauf in Einzelgefäßen kubischer Gestalt und in kombinierten Gefäßen auch bei Druckentlastung beträchtlich unterscheidet. Folgende Unterschiede fallen besonders auf:

- e) In kombinierten Behältern stellen sich im System bei insgesamt gleicher, spezifischer Entlastungsfläche höhere Maximaldrücke p_{red} ein als in kubischen Behältern (vgl. z. B. Tabelle 7 mit Tabelle 9).
- f) Bei Anbringung von Entlastungsöffnungen in beiden Kammern fällt der Druck in die Kammer, in der gezündet wird, niedriger aus als in der anderen Kammer (Tabelle 9).
- g) Bei Anbringung nur einer Druckentlastungsöffnung von doppelter Größe in einer der beiden Kammern kann der Druck in der Kammer, in der nicht gezündet wird, beträchtlich ansteigen; besonders hohe Drücke – z. T. höher als der maximale Explosionsdruck in einer allseits geschlossenen Kammer – treten dann auf, wenn in der druckentlasteten Kammer in der Nähe der der Rohrmündung gegenüberliegenden Wand gezündet wird (s. Bild 40 oder 50). Dies tritt nur dann nicht ein, wenn bei einseitiger Druckentlastung sich die Druckentlastungsöffnung nicht in der Zündkammer befindet (V_2 in Bild 43).

Zu e) bis g):

Die Deutungen für die Punkte e) bis g) ergeben sich aus dem in 3.4 zu den Punkten a) bis d) Gesagten. Die Versuche zeigen deutlich, daß die niedrigsten Drücke dann erzielt werden, wenn bei Behälterkombinationen jeder Behälter getrennt entlastet wird. Eine solche Lösung sollte bei der Druckentlastung derartiger Systeme deshalb stets verwirklicht werden. Dabei sollte die jeweilige Entlastungsfläche nach Möglichkeit etwas größer sein als notwendig, wenn der betreffende Behälter allein stünde.

5. Zweckmäßige Anbringung von Druckentlastungsöffnungen an mit Rohrleitungen verbundenen Behältern

In Kapitel 4 wurde gezeigt, daß Druckentlastung bei mit Rohrleitungen verbundenen Behältern nur dann verlässlichen Schutz bietet, wenn jeder Behälter einzeln entlastet wird. Die im folgenden geschilderten Untersuchungen befassen sich mit der günstigsten Art der Anbringung solcher Entlastungsöffnungen in bezug auf die einlaufende Flamme.

5.1 Versuche mit schnellen Flammen

Bei diesen Versuchen befand sich sowohl im Rohr als auch in der Kammer das gleiche Benzoldampf/Luft-Gemisch (3,5 Vol.-% Benzol). Die Flammengeschwindigkeit im Rohr betrug 210 m/s.

5.1.1 Versuchsanordnung:

Kammer $V_1 = 12$ l, verbunden mit einer kurz vor Kammer-eintritt rechtwinklig abgelenkten Rohrleitung ($\phi = 5$ cm, Länge 275 cm). Rohrleitung am Knick entlastet (F_2), die Druckentlastungsöffnung F_1 in der Kammer befindet sich gegenüber der Rohrmündung (Bild 54).

Zündung am geschlossenen Rohrende. Druckmessung in V_1 . Versuchsergebnis (Mittelwert) in Tabelle 15, das zugehörige Druck/Zeit-Oszillogramm zeigt Bild 55.

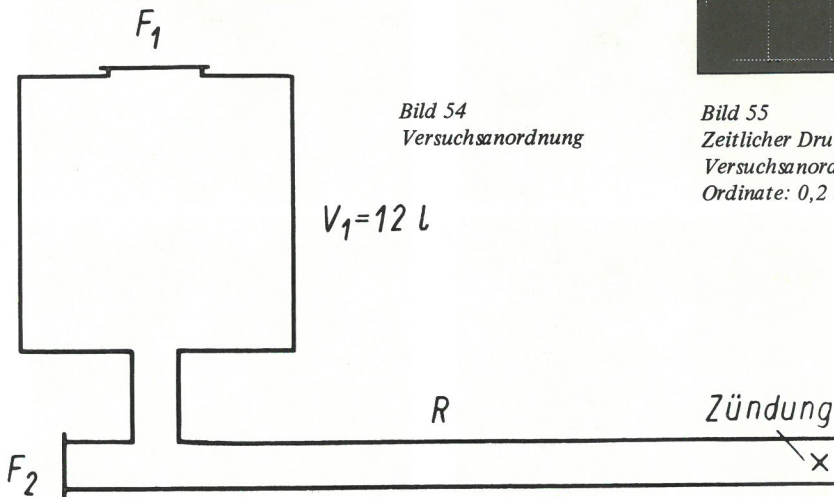


Bild 54
Versuchsanordnung

Tabelle 15

Versuchs-Nr.	V_1 F_1 [cm ²]	p_A [bar]	F_2 [cm ²]	Rohr p_A [bar]	Pred [bar]	Bild
75	106	1,5	20	1,15	1,35	55

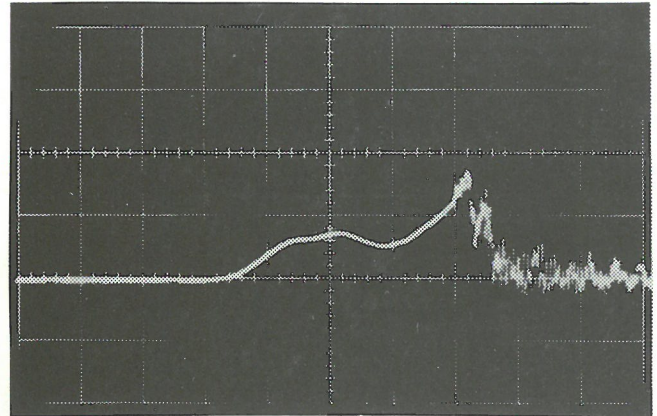


Bild 55
Zeitlicher Druckverlauf bei einer druckentlasteten Explosion
Versuchsanordnung s. Bild 54 und Tabelle 15
Ordinate: 0,2 bar/cm Abszisse: 10 ms/cm

5.1.2 Versuchsanordnung wie in 5.1.1,

aber Lage der Druckentlastungsöffnung in V_1 rechtwinklig zur Rohrmündung (Bild 56). Versuchsergebnis (Mittelwert) in Tabelle 16 und Bild 57.

Tabelle 16

Versuchs-Nr.	V_1 F_1 [cm ²]	p_A [bar]	F_2 [cm ²]	Rohr p_A [bar]	Pred [bar]	Bild
76	106	1,15	20	1,15	2,6	57

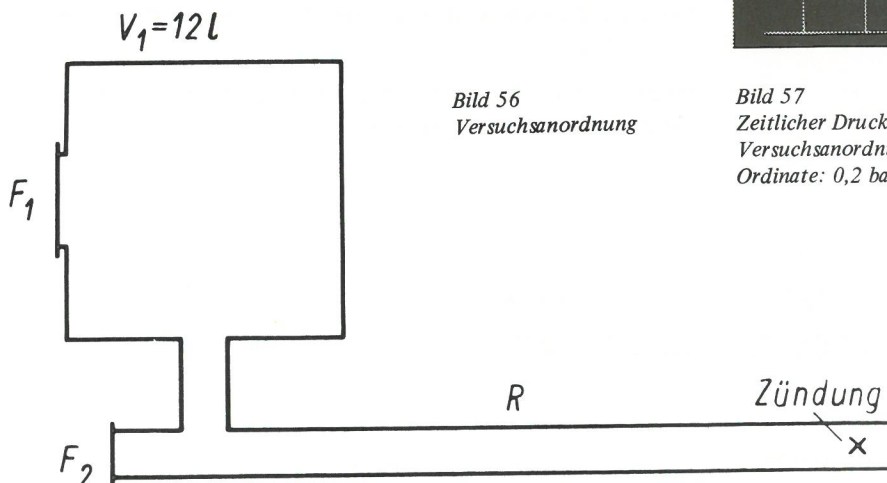


Bild 56
Versuchsanordnung

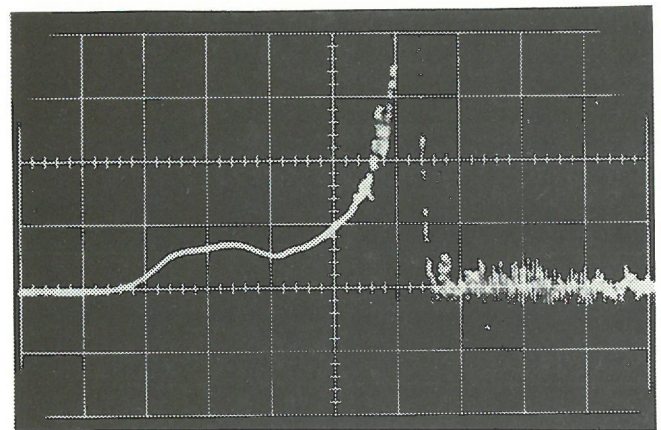


Bild 57
Zeitlicher Druckverlauf bei einer druckentlasteten Explosion
Versuchsanordnung s. Bild 56 und Tabelle 16
Ordinate: 0,2 bar/cm Abszisse: 10 ms/cm

5.1.3 Versuchsanordnung:

Kammer mit 12 l, verbunden mit einer Rohrleitung ($\phi = 2$ cm). Die Druckentlastungsöffnung in der Kammer befindet sich gegenüber der Rohrmündung. Zündung am geschlossenen Rohrende (Bild 58). Versuchsergebnis (Mittelwert) in Tabelle 17.

Tabelle 17

Versuchs-Nr.	F_1 [cm ²]	p_A [bar]	p_{red} [bar]
77	106	1,05	1,15

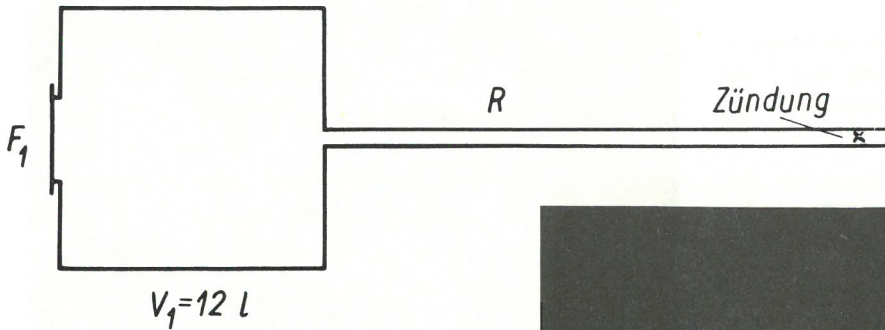


Bild 58
Versuchsanordnung

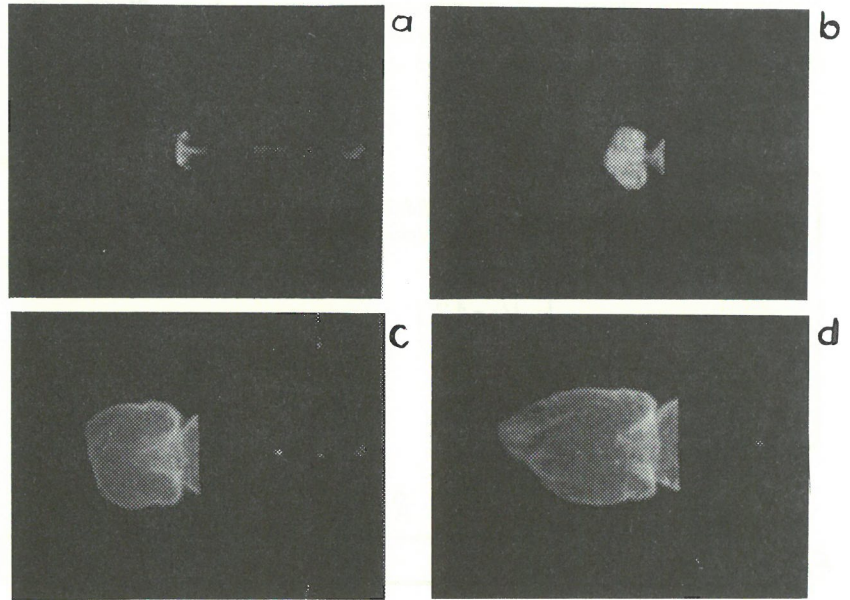


Bild 59 a bis d
Verlauf der Flammenausbreitung
Versuchsanordnung s. Bild 58

Der Explosionsablauf wurde gefilmt (Bild 59 a bis d). Die Bildfolge zeigt das Wachstum der Flamme. Bei Eintritt in die Kammer bildet sich um die Flammenszunge eine pilzförmige Flammenfront aus. Die Flamme breitet sich dabei laminar aus; das letzte Bild zeigt die Flamme nach Platzen der Membran.

5.2 Versuche mit Detonationen

Bei diesen Versuchen befand sich im Rohr ein leicht detonierendes Acetylen/Sauerstoff-Gemisch (30 % C₂H₂), in der Kammer ein Benzoldampf/Luft-Gemisch (3,5 Vol.-% Benzol). Die Detonationsgeschwindigkeit des C₂H₂/O₂-Gemisches beträgt 2 480 m/s.

5.1.4 Versuchsanordnung wie in 5.1.3,

aber Druckentlastungsöffnung senkrecht zur Rohrmündung (Bild 60). Versuchsergebnis (Mittelwert) in Tabelle 18.

5.2.1 Versuchsanordnung

Kammer mit $V_1 = 12$ l, verbunden mit einer Rohrleitung ($\phi = 2$ cm, Länge 20 cm). Die Druckentlastungsöffnung in der Kammer befindet sich gegenüber der Rohrmündung. Zwischen Kammer und Rohr befindet sich eine Folie von 0,1 mm Dicke.

Tabelle 18

Versuchs-Nr.	F_1 [cm ²]	p_A [bar]	p_{red} [bar]
78	106	1,05	1,45

Zündung am geschlossenen Rohrende (s. Bild 58). Versuchsergebnis (Mittelwert) in Tabelle 19 und Bild 61.

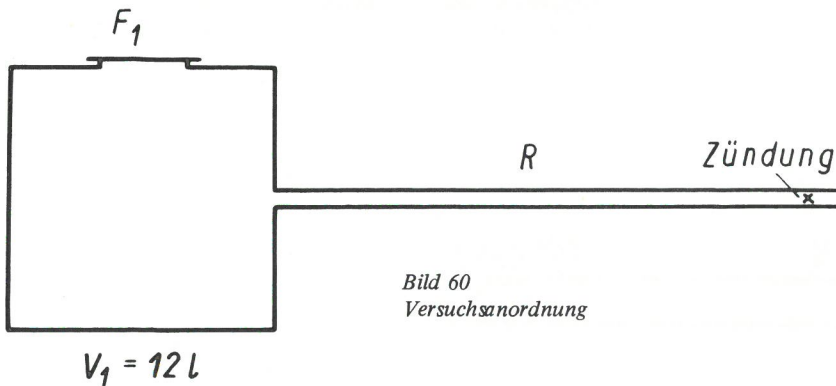


Bild 60
Versuchsanordnung

Tabelle 19

Versuchs-Nr.	F_1 [cm ²]	p_A [bar]	p_{red} [bar]	Bild
79	106	1,05	2,1	61

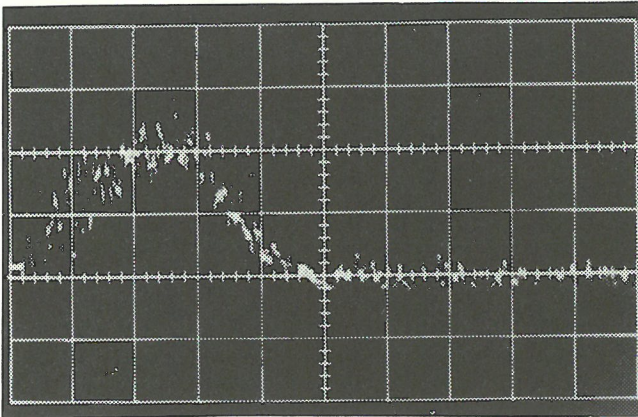


Bild 61
Zeitlicher Druckverlauf bei einer druckentlasteten Explosion
Versuchsanordnung s. Bild 58 und Tabelle 19
Ordinate: 0,62 bar/cm Abszisse: 2 ms/cm

5.2.2 Versuchsanordnung wie in 5.2.1,

aber Druckentlastungsöffnung senkrecht zur Rohrmündung (Bild 60). Versuchsergebnis (Mittelwert) in Tabelle 20 und Bild 62.

Tabelle 20

Versuchs-Nr.	F_1 [cm ²]	p_A [bar]	p_{red} [bar]	Bild
80	106	1,05	3,3	62

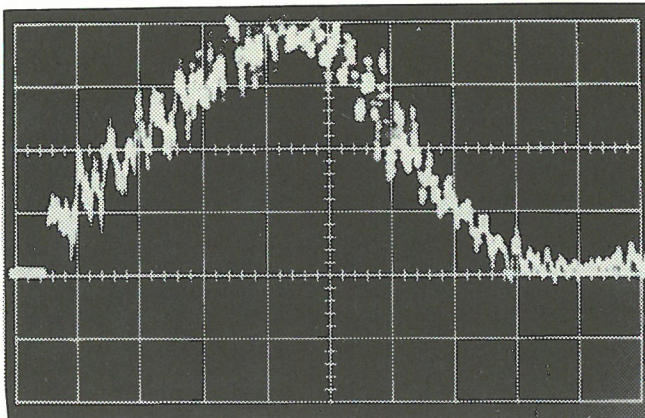
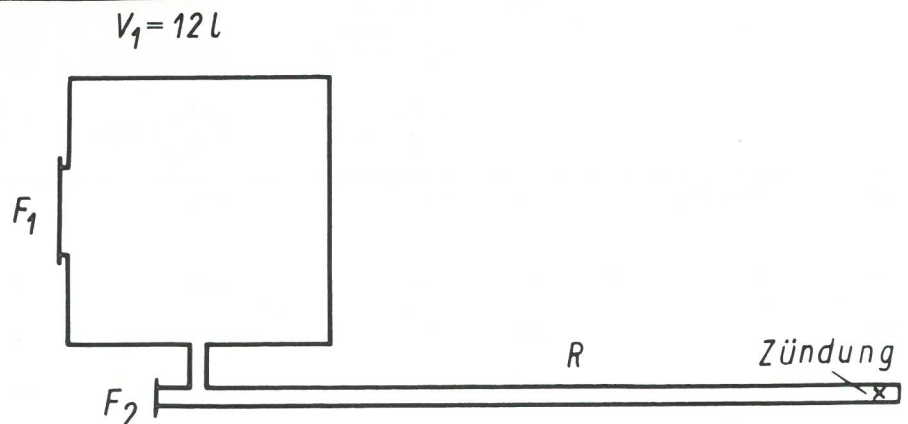


Bild 62
Zeitlicher Druckverlauf bei einer druckentlasteten Explosion
Versuchsanordnung s. Bild 60 und Tabelle 20
Ordinate: 0,62 bar/cm
Abszisse: 1 ms/cm

Bild 63
Versuchsanordnung



5.2.3 Versuchsanordnung:

Kammer mit $V_1 = 12$ l, verbunden mit einer kurz vor Kammertritt rechtwinklig abgelenkten Rohrleitung ($\phi = 2$ cm, Länge 20 cm). Rohrleitung am Knick entlastet (F_2), Druckentlastungsöffnung F_1 in Kammer liegt rechtwinklig zur Rohrmündung. V_1 von Rohrleitung durch eine dreifache Lage Seidenpapier getrennt.

Zündung im geschlossenen Rohrende (Bild 63). Versuchsergebnis (Mittelwert) in Tabelle 21 und Bild 64.

Tabelle 21

Versuchs-Nr.	V_1 F_1 [cm ²]	p_A [bar]	F_2 [cm ²]	Rohr p_A [bar]	p_{red} [bar]	Bild
81	106	1,05	3,1	1,05	2,15	64

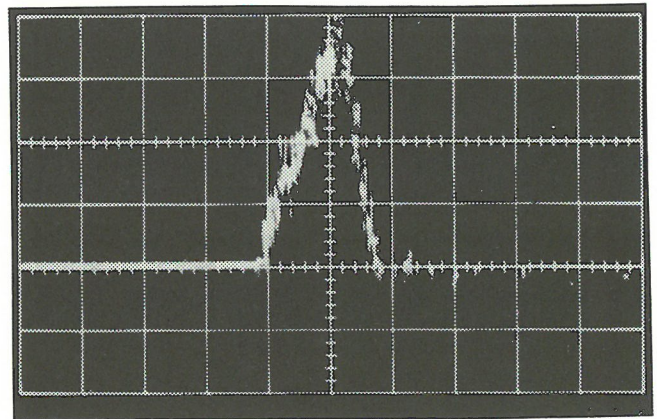


Bild 64
Zeitlicher Druckverlauf bei einer druckentlasteten Explosion
Versuchsanordnung s. Bild 63 und Tabelle 21
Ordinate: 0,31 bar/cm Abszisse: 5 ms/cm

Der Explosionsablauf wurde gefilmt (Bild 65 a bis c). Die Bilder zeigen, daß trotz Druckentlastung am Rohrknick eine turbulente Flamme in die Kammer eintritt und dort sofort turbulente Verbrennung auf breiter Front einleitet. Die letzte Aufnahme zeigt den Flammenverlauf nach Druckentlastung.

5.3 Diskussion

Die Versuche lassen übereinstimmend erkennen, daß der Explosionsdruck in der Kammer bei vorgegebener Entlastungsöffnung am niedrigsten liegt, wenn sich die Entla-

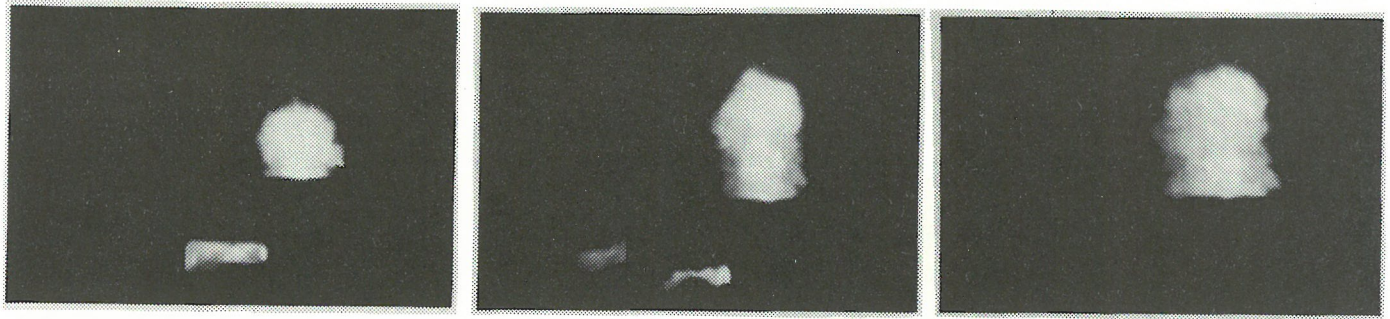


Bild 65 a bis c
Verlauf der Flammenausbreitung
Versuchsanordnung s. Bild 63

stungsöffnung gegenüber der einmündenden Rohrleitung befindet. Einlaufende Detonationen liefern höhere Drücke als einlaufende Flammen. Durch Abknickung einlaufender Rohrleitung unmittelbar vor dem Behälter und Einbau einer Druckentlastungsöffnung am Knick kann einer anlaufenden Detonation ein beträchtlicher Teil ihres Impulses genommen werden (vgl. Versuch Nr. 80 und 81).

6. Druckentlastung über Rohrleitungen

Aus baulichen Gründen ist es nicht immer möglich, explosionsgefährdete Behälter direkt ins Freie zu entlasten. Die Entlastung wird dann über zwischengeschaltete Rohrleitungen vorgenommen. Bekanntlich verringert sich der Durchsatz strömender Gase durch Rohrleitungen bei vorgegebene-

nem Druckgefälle, wenn der Rohrdurchmesser ab- und die Rohrlänge zunimmt. Druckentlastung über Rohrleitungen muß daher gegenüber direkter Druckentlastung zu einer Erhöhung von p_{red} führen.

Es war von Interesse, zu klären, von welchen Rohrabmessungen sich ein Einfluß auf p_{red} bemerkbar zu machen beginnt. Hierzu wurden Druckentlastungsversuche an der 12 l-Kammer bei vorgegebener Größe der Entlastungsöffnung in Abhängigkeit vom Ansprechdruck, Gasart, Länge und Querschnitt der angesetzten Rohrleitung durchgeführt.

Aus dem Querschnitt F_K der Entlastungsöffnung, dem Querschnitt F_R der Rohrleitung, ihrem Durchmesser d und ihrer Länge l wurde die dimensionslose Zahl $\frac{d}{l} \cdot \frac{F_R}{F_K}$ gebildet und mit dem gemessenen Druck p_{red} in Vergleich gesetzt. *Tabelle 22* gibt die Ergebnisse für $F_R > F_K$, *Tabelle 23* für $F_R \approx F_K$ wieder.

Versuchs-Nr.	Gemisch	p_A [bar]	p_{red} [bar]		
			ohne Rohr	$l = 50$ cm; $d = 8$ cm $F_R = 50$ cm ² ; $F_K = 10,4$ cm ²	$l = 10$ cm; $d = 4,9$ cm $F_R = 18,5$ cm ² ; $F_K = 10,4$ cm ²
				$\frac{d}{l} \cdot \frac{F_R}{F_K} = 0,77$	$\frac{d}{l} \cdot \frac{F_R}{F_K} = 0,87$
82	10 % CH ₄ in Luft	1,15	1,4	1,4	1,35
83		1,5	1,7	1,75	1,51
84	4 % C ₃ H ₈ in Luft	1,15	2,15	2,09	1,85
85		1,5	2,4	2,1	1,90
86	25 % H ₂ in Luft	1,6	4,6	4,9	4,9

Tabelle 22

Versuchs-Nr.	Gemisch	p_A [bar]	p_{red} [bar]		
			ohne Rohr	$l = 50$ cm $d = 3,7$ cm ² $F_R = 11$ cm ² $F_K = 10,4$ cm ²	$l = 100$ cm $d = 3,7$ cm $F_R = 11$ cm ² $F_K = 10,4$ cm ²
				$\frac{d}{l} \cdot \frac{F_R}{F_K} = 0,39$	$\frac{d}{l} \cdot \frac{F_R}{F_K} = 0,078$
				$\frac{d}{l} \cdot \frac{F_R}{F_K} = 0,039$	$\frac{d}{l} \cdot \frac{F_R}{F_K} = 0,039$
87	10 % CH ₄ in Luft	1,5	1,7	1,5	1,75
88	4 % C ₃ H ₈ in Luft	1,25	—	1,95	2,25
89		1,5	2,4	2,2	4,7
90	25 % H ₂ in Luft	1,4	4,5	4,5	5,2

Tabelle 23

Die Tabellen lassen erkennen, daß ab $\frac{d}{l} \cdot \frac{F_R}{F_K} \geq 0,4$ ein Einfluß der vorgesetzten Rohrleitung auf p_{red} nicht mehr beobachtet wird. Es bedarf weiterer Versuche an größeren Behältern, um diese Beziehung zu bestätigen.

Herrn R. Kowall sei für Mitarbeit bei der Ausführung der Untersuchungen herzlich gedankt.

Der Berufsgenossenschaft der chemischen Industrie gebührt aufrichtiger Dank für die finanzielle Unterstützung der Arbeiten.

Literatur

- 1) B. Lewis u. G. v. Elbe
J. chem. Phys. 2 (1934) 283
- 2) H. J. Heinrich
Chem. Ing. Techn. 38 (1966) 1125
- 3) W. Bartknecht
Z. VFDB H. 4 (1971) 112

