

ISSN 0172-7613

Forschungsbericht 66

BUNDESANSTALT FÜR
MATERIALPRÜFUNG (BAM)

BERLIN

Auswirkung von Druckentlastungsvorgängen auf die Umgebung

von Dr. rer. nat. Martin Hattwig

Juni 1980

31 Seiten, 19 Bilder, 5 Tabellen

Herausgegeben von der
Bundesanstalt für Materialprüfung (BAM)
Unter den Eichen 87, 1000 Berlin 45
Telefon 030/8104-1
Telex 01-083 261 bamb d

Inhaltsverzeichnis	Seite
1. Ausgangssituation und Ziel des Forschungsvorhabens	1
2. Forschungsergebnisse	1
2.1 Druckverlauf in der Umgebung eines Behälters während des Entlastungsvorgangs	2
2.1.1. Problemstellung	2
2.1.2. Lösungsweg	2
2.1.3. Ergebnisse und Diskussion	7
2.2. Kraft auf eine vor dem Behälter aufgestellte Wand	13
2.3. Rückstoßkraft auf einen durch Druckentlastung geschützten Behälter	15
2.3.1. Problemstellung	15
2.3.2. Lösungsweg	16
2.3.3. Ergebnisse und Diskussion	20
2.4. Temperaturverlauf in der Umgebung eines druckentlasteten Behälters	27
2.5. Zusammenfassung	28
2.6. Literatur	31

Kurzfassung

Bei der Anwendung der Druckentlastung als Explosionschutzmaßnahme ist außerhalb des geschützten Anlagenteils mit einer Druckwelle und mit Flammenauswirkungen zu rechnen, die die Umgebung gefährden können. Außerdem kann die Rückstoßkraft, die beim Entlastungsvorgang auf die Apparatur wirkt, Zerstörungen hervorrufen. Es wurde deshalb untersucht, wie Druckwelle und Rückstoßkraft von bekannten oder leicht bestimmbareren Einflußgrößen abhängen.

Die Ergebnisse der Untersuchungen gestatten es, den maximal zu erwartenden Überdruck in der Druckwelle an einer gegebenen Stelle außerhalb des Behälters abzuschätzen, wenn bekannt ist, welcher reduzierte Explosionsdruck bei der Entlastung im Inneren des Behälters auftreten kann.

Es konnte außerdem nachgewiesen werden, daß die beim Entlastungsvorgang nach der Theorie zu erwartende maximale Rückstoßkraft in der Praxis nur selten erreicht wird. In der Regel liegen die Meßwerte deutlich unter den berechneten Werten. Für die praktische Anwendung ist es daher ausreichend, wenn der zu erwartende maximale Rückstoß nach der Theorie berechnet wird.

Contents

In the case of venting as a protective measure against explosions a dangerous pressure wave and a large flame must be expected in the neighbourhood of the vent. Moreover the recoil force which is exerted on the protected vessel can be the cause for the destruction of the plant. Therefore experiments have been made on the dependence of the pressure wave and the recoil force from well-known or easily determinable parameters.

The results of the investigations allow the estimation of the maximum overpressure which must be expected at a given point outside the vessel, if the reduced explosion pressure which will be reached in the interior of the vessel is known.

Beyond that it could be shown that the maximum recoil force is nearly always considerably smaller than the value given by theory. Only very rarely the theoretical value is reached. Therefore it is totally sufficient for practical purposes when the maximum recoil to be expected is calculated from the theoretical equation.

1. Ausgangssituation und Ziel des Forschungsvorhabens

Druckentlastung ist eine häufige und in vielen Bereichen der Industrie angewendete Explosionsschutzmaßnahme. Dabei wird durch rechtzeitige Freigabe vorgegebener Öffnungen noch während der Explosion das Bersten der zu schützenden Apparatur verhindert. Außerhalb des geschützten Anlagenteils ist mit einer Druckwelle und Flammenauswirkungen zu rechnen, die die Umgebung gefährden können. Außerdem wirken auf die Apparatur im Augenblick der Entlastung Rückstoßkräfte, die zu einem Umwerfen des Behälters und damit auch zu einer Gefährdung der Umgebung führen können.

Eingehende Untersuchungen über die Auswirkung von Druckentlastungsvorgängen auf die Umgebung waren vor Beginn des Forschungsvorhabens noch nicht unternommen worden. Die bisherigen Untersuchungen beschränkten sich auf die Messung der Belastungen durch die Explosion von Waffen, durch Überschallflüge oder durch sphärische Explosionen von explosionsfähigen Gasgemischen in Ballons.

Im Rahmen des Vorhabens sollte der Druck- und Temperaturverlauf in der Umgebung eines durch Druckentlastung geschützten Behälters beim Entlastungsvorgang untersucht werden. Außerdem sollte festgestellt werden, welche Rückstoßkraft auf den Behälter und welche Kraft auf eine vor der Entlastungsöffnung aufgestellte Wand wirkt.

2. Forschungsergebnisse

Der Bericht über das Vorhaben und seine Ergebnisse ist in folgende Abschnitte gegliedert:

2.1. Druckverlauf in der Umgebung eines Behälters während des Entlastungsvorgangs

2.2. Kraft auf eine vor dem Behälter aufgestellte Wand

2.3. Rückstoßkraft bei einem durch Druckentlastung geschützten Behälter

2.4. Temperaturverlauf in der Umgebung eines druckentlasteten Behälters.

2.1. Druckverlauf in der Umgebung eines Behälters während des Entlastungsvorgangs

2.1.1. Problemstellung:

Um Menschen oder Sachgüter wirksam vor den Auswirkungen der beim Entlastungsvorgang auftretenden Druckwelle schützen zu können, muß bekannt sein, wie der Maximaldruck in dieser Welle von den leicht bestimmbaren Parametern "reduzierter Explosionsdruck", "Abstand von der Entlastungsöffnung", "Winkel gegen die Entlastungsrichtung", "Entlastungsfläche", "Volumen des Gefäßes" und "Explosionskenngrößen der zu entlastenden, explosionsfähigen Atmosphäre" abhängt.

2.1.2. Lösungsweg:

Es wurden Staubexplosionen mit Druckentlastung in Gefäßen mit Volumina von $0,25 \text{ m}^3$, 1 m^3 und 5 m^3 ausgeführt.

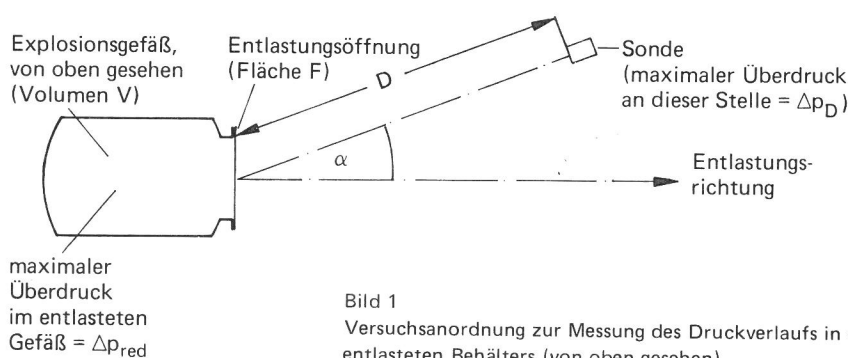
Für die Auswahl von Staubexplosionen sprachen zwei Gründe: Einmal kommt der Explosionsschutzmaßnahme "Druckentlastung" bei Staub/Luft-Gemischen bisher in der Praxis eine größere Bedeutung zu als bei gasförmigen, explosionsfähigen Systemen. Zum anderen gestattet es die bei Stäuben einfachere Versuchsmethodik bei der Gemischherstellung, erheblich mehr Versuche in einem gegebenen Zeitraum auszuführen als bei Gasen.

Der Staub wurde vor dem Versuch in einer oder mehreren an dem Gefäß angebrachten Druckgasflaschen unter komprimierter Luft gespeichert. Jede Flasche war über ein sprengkapselbetätigtes Sperrventil mit einer perforierten Halbkugel im Inneren des Gefäßes verbunden. Zu Beginn eines Versuchs wurde das Sperrven-

til durch Auslösen der Sprengkapsel geöffnet; mit der ausströmenden Druckluft wurde der Staub in das Explosionsgefäß eingeblasen. Die Zündung wurde unmittelbar nach Beendigung des Einblasvorgangs ausgelöst. Hierzu dienten zwei Brückenzünder mit Thermitmischung (sogenannte chemische Zünder). Der zeitliche Druckverlauf im Gefäß wurde mit einem piezoelektrischen Druckgeber mit Vorverstärker gemessen, auf dem Leuchtschirm eines Kathodenstrahloszillografen aufgezeichnet und fotografisch festgehalten. Diese Versuchsmethodik hat sich bei der Bestimmung der Explosionskenngrößen von Stäuben seit Jahren bewährt. Es ist bisher noch keine andere Methode bekannt, mit der sich Versuchsbedingungen und Ergebnisse bei Staubexplosionen besser reproduzieren lassen.

Die Versuchsgefäße enthalten jeweils eine Öffnung, deren freie Fläche durch Einbringen von Blenden verringert werden kann. Die Öffnungen werden durch Berstmembranen verschlossen. Durch Variation der Membranstärke oder der Zahl der Membranen kann der Ansprechdruck (Platzdruck) verändert werden.

Vor der Entlastungsöffnung wurden Drucksonden in verschiedenen Abständen aufgestellt, und zwar in Entlastungsrichtung und seitlich davon.



Zur Druckmessung außerhalb des Gefäßes dienten piezoelektrische Geber. Es waren jeweils zwei Geber gleichen Typs in einen speziell entwickelten Adapter eingebaut. Die Anordnung ist in Bild 2 schematisch dargestellt: Der Geber A ist sowohl dem Druck beim Entlastungsvorgang als auch den mechanischen Schwingun-

gen der Geberhalterung ausgesetzt. Er ist gegen Temperaturerhöhungen durch die Explosionsflamme oder auftreffende heiße Partikel durch eine unmittelbar aufliegende Silikongummimembran C geschützt. Der Geber B ist im geschlossenen Gehäuse so angebracht, daß er nur den mechanischen Schwingungen ausgesetzt ist. Die Signale beider Geber werden in getrennten Ladungsverstärkern einzeln verstärkt und dann mit Hilfe eines Differenz-Vorverstärker-Einschubs im Oszillographen elektronisch voneinander subtrahiert. Mit der geschilderten Anordnung wurde erreicht, daß auf dem Oszillographenschirm als Differenzsignal nur die wirklichen Druckschwankungen erscheinen, während die Störungen durch Temperaturerhöhungen und Schwingungen der Geberaufhängung *) weitgehend unterdrückt werden.

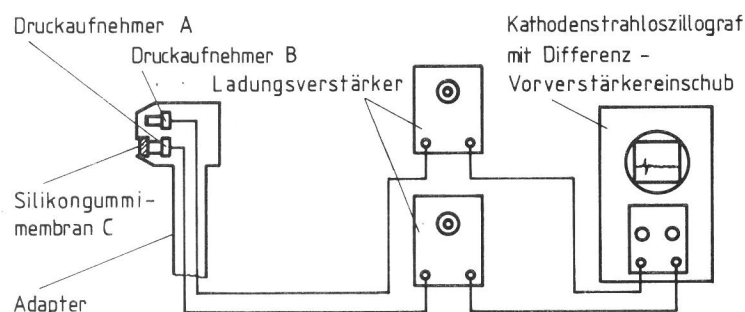


Bild 2
Schematische Darstellung der Druckmeßeinrichtung

Die beschriebene Anordnung wurde in umfangreichen Vorversuchen entwickelt und mit Hilfe von eigens dazu entwickelten Prüfvorrichtungen getestet. Es konnte nachgewiesen werden, daß dadurch Signale, die von den mechanischen Schwingungen herrühren, um den Faktor 10 abgeschwächt werden, während der Einfluß der Erwärmung für den interessierenden Zeitraum gänzlich unterdrückt wird, ohne daß sich durch diese Maßnahme die Druckempfindlichkeit der Anordnung im

*) Diese Schwingungen können zwar durch geeignete Bauweise der Halterungen und feste Verankerung klein gehalten werden; gewisse Grenzen können jedoch hier nicht unterschritten werden, weil die Halterungen nicht so groß und ausladend sein dürfen, daß die freie Ausbildung des Entlastungsvorgangs behindert wird.

Vergleich mit einem frei verwendeten Geber merklich abschwächt. Auf Einzelheiten kann in diesem Bericht im Interesse der Kürze nicht eingegangen werden, doch muß erwähnt werden, daß die sogenannten beschleunigungskompensierten piezoelektrischen Geber, die von den einschlägigen Herstellern angeboten werden, für die Messungen ungeeignet waren. Versuche mit drei verschiedenen Gebern dieser Art zeigten, daß die von mechanischen Schwingungen der Geberhalterung herrührenden Signale im Vergleich mit einem gewöhnlichen Geber nur etwa um den Faktor 2 herabgesetzt wurden. Der Grund hierfür dürfte unter anderem darin liegen, daß in diesen Gebern nur die Axialkomponente der Beschleunigung kompensiert wird. - Bei der von uns verwendeten Anordnung tritt dieser Nachteil nicht auf.

Der Druckverlauf wurde bei jedem Versuch an zwei verschiedenen Stellen gleichzeitig gemessen. Die Geberhalterungen waren auf Rohrgestellen mit Verstrebungen befestigt und im Betonfußboden der Versuchsstrecke verankert. Die Meßköpfe waren dabei so an den Geberhalterungen befestigt, daß die druckempfindliche Membran der Entlastungsöffnung zugekehrt war. Mit dieser Anordnung wird nicht nur der sich allseitig ausbreitende statische Druck am Ort der Sonde, sondern auch die zusätzliche Bewegungskomponente in Richtung auf die Sonde erfaßt. Je nach Ausbreitungsgeschwindigkeit kann dies eine mit Überschallgeschwindigkeit laufende Stoßwelle (Verdichtungsstoß) oder eine mit Schallgeschwindigkeit laufende Kompressionswelle mit nachlaufender Gasströmung sein.

Für die Wahl dieser Anordnung waren folgende Überlegungen maßgebend: Bei der Anwendung der Forschungsergebnisse auf die Praxis läßt es sich im konkreten Fall schlecht übersehen, ob bei der Berechnung der Belastung eines Bauteils, das von der Druckwelle der Entlastung getroffen wird, vom statischen Druck oder vom Gesamtdruck auszugehen ist. Da der Gesamtdruck stets höher ist als der statische Druck, soll-

te im Interesse der Sicherheit stets der Gesamtdruck in die Rechnung eingesetzt werden. Außerdem ist es bei der gewählten Aufstellung - anders als bei der Aufstellung mit der Membran parallel zur Ausbreitungsrichtung, mit der nur der statische Druck gemessen wird - möglich, den Adapter relativ klein und damit die Störung der Druckausbreitung durch die Meßsonden möglichst gering zu halten. Dies ist notwendig, damit die Meßergebnisse der bei den Versuchen jeweils weiter von der Entlastungsöffnung entfernten Sonden nicht verfälscht werden.

Es wurden jedoch Vergleichsversuche ausgeführt, bei denen jeweils zwei Sonden mit unterschiedlicher Orientierung der druckempfindlichen Membran nebeneinander aufgestellt waren.

Da vermutet wurde, daß der maximale Überdruck in der Druckwelle außerhalb des Behälters vom dynamischen Ansprechdruck p_{dyn} der Entlastungseinrichtung abhängen könnte, wurde diese Größe ebenfalls bestimmt. Dazu wurde quer über die Entlastungsmembran ein stromdurchflossener Metallstreifen gespannt. Beim Ansprechen der Membran zerriß der Streifen und verursachte in dem zugehörigen Stromkreis einen Spannungssprung. Damit konnte der Zeitpunkt des Platzens und in Verbindung mit dem zugehörigen Druck-Zeit-Diagramm für den Druck im Inneren des Behälters auch der dynamische Ansprechdruck p_{dyn} genau bestimmt werden. Bild 3 zeigt ein typisches Meßergebnis.

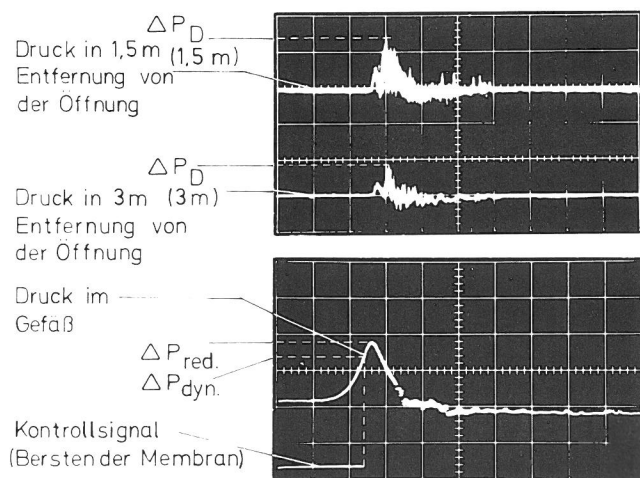


Bild 3
 Verlauf des Drucks innerhalb und außerhalb eines druckentlasteten Behälters
 (Abszissenmaßstab 50 ms/Rasterfeld,
 Ordinatenmaßstab oben 0,4 bar/Rasterfeld,
 untern 0,5 bar/Rasterfeld)

2.1.3. Ergebnisse und Diskussion:

a) Einflußgrößen

Zunächst wurde in orientierenden Versuchen festgestellt, von welchen Größen der maximale Druck außerhalb des Explosionsgefäßes abhängt. Dabei wurden alle anderen vermuteten Einflußgrößen soweit wie experimentell möglich konstant gehalten.

Die Versuche zeigten, daß im Rahmen der unvermeidlichen Schwankungen der Einzelergebnisse keine erkennbare Korrelation besteht zwischen dem maximalen Überdruck Δp_D außerhalb des Gefäßes mit

- dem Volumen des entlasteten Gefäßes
 - dem dynamischen Ansprechüberdruck Δp_{dyn} der Entlastungsmembran
 - den Explosionskenngrößen K_{st} und p_{max} des verwendeten brennbaren Staubes
- (Zur Definition dieser Größen siehe [1])

Unklar blieb zunächst, ob eine Abhängigkeit vom Winkel gegen die Entlastungsrichtung besteht. Diese Frage wurde deshalb mit einem längeren Versuchsprogramm (insgesamt 29 Versuche) gründlicher untersucht.

Dabei wurden der Abstand D zwischen den Meßsonden und der Entlastungsöffnung im Bereich zwischen 3 m und 15 m und der Winkel α zwischen der Verbindungslinie Explosionsgefäß/Sonde und der Entlastungsrichtung im Bereich von 0° bis 90° variiert.

Die Versuche zeigten, daß im Rahmen der Meßgenauigkeit keine erkennbare Korrelation zwischen dem Winkel gegen die Entlastungsrichtung und dem maximalen Überdruck Δp_D am Ort der Sonde besteht.

b) Vergleichsversuche zur Ermittlung eines Zusammenhangs zwischen Gesamtdruck und statischem Druck

Bei diesen Versuchen wurden die Entfernungen der beiden Meßköpfe vom Entlastungsgefäß und der reduzierte Explosionsdruck über einen großen Bereich

variiert. Es zeigte sich, daß der Gesamtüberdruck unter den Versuchsbedingungen in allen Fällen etwa 1,5 mal so groß ist wie der statische Überdruck. Bezeichnet man den Quotienten aus dem maximalen gemessenen Überdruck mit der druckempfindlichen Membran parallel zur Ausbreitungsrichtung $\Delta p_{D=}$ und dem Meßergebnis $\Delta p_{D\perp}$, bei dem die druckempfindliche Membran der Entlastungsöffnung zugekehrt ist, mit Q , so lassen sich die Ergebnisse wie folgt darstellen:

$Q = \frac{\Delta p_{D=}}{\Delta p_{D\perp}}$				Zahl der Versuche
Mittelwert	Standardabweichung	niedrigster Einzelwert	höchster Einzelwert	
0,70	0,09	0,56	0,85	18

c) Einfluß des reduzierten Explosionsdrucks

Unter reduziertem Explosionsdruck wird derjenige höchste Druck verstanden, der sich bei vorgegebener Entlastungsöffnung im Explosionsgefäß nach Zündung des Staub/Luft-Gemisches einstellt [1]. Bei insgesamt 120 Einzelversuchen konnte das Verhältnis aus dem maximalen Überdruck Δp_D am Ort der Sonde und dem reduzierten Explosionsüberdruck Δp_{red} im entlasteten Gefäß bestimmt werden. Dabei wurde die Entfernung D zwischen 1,5 m und 35 m variiert, der Winkel α gegen die Entlastungsrichtung im Bereich 0° bis 90° und der reduzierte Explosionsüberdruck Δp_{red} im Bereich zwischen 0,3 bar und 2,0 bar. In allen Fällen waren Δp_D und Δp_{red} bei konstantgehaltenen Bedingungen einander proportional.

d) Einfluß des Abstands zwischen Ort der Meßsonde und Entlastungsöffnung auf den Spitzenüberdruck am Ort der Sonde.

Wie zu erwarten ist, nimmt der maximale Druck am Ort der Sonde mit wachsendem Abstand D von der Entlastungsöffnung ab.

Bildet man für eine Versuchsreihe, bei der alle Einflußgrößen außer D und Δp_{red} konstant gehalten werden, die Kenngröße A, die definiert sein soll durch

$$A = \frac{\Delta p_D \cdot D}{\Delta p_{red}},$$

so ist diese, wiederum im Rahmen der bei Staubexplosionsversuchen unvermeidlichen Schwankungen der Einzelergebnisse, konstant. Die Tabellen 1 und 2 zeigen dies für zwei Versuchsreihen :

D [m]	$A = \frac{\Delta p_D \cdot D}{\Delta p_{red}}$ [m]				Zahl der Versuche
	Mittelwert	Standardabweichung	niedrigster Einzelwert	höchster Einzelwert	
1,5	0,75	0,09	0,63	0,90	11
2	1,04	0,18	0,74	1,20	10
3	1,08	0,13	0,84	1,26	11
5	1,00	0,20	0,65	1,40	11
8	0,78	0,20	0,50	1,28	8
10	1,10	0,25	0,90	1,30	4

Tabelle 1: Kennzahl A für eine Meßreihe im 5-m³-Explosionsgefäß ($\Delta p_{dyn} = 0,6$ bar, $\Delta p_{red} = 0,9$ bar, Fläche der Entlastungsöffnung 0,5 m²)

D [m]	$A = \frac{\Delta p_D \cdot D}{\Delta p_{red}}$ [m]				Zahl der Versuche
	Mittelwert	Standardabweichung	niedrigster Einzelwert	höchster Einzelwert	
2	0,17	0,08	0,11	0,30	7
5	0,20	0,04	0,16	0,24	10
10	0,22	0,06	0,13	0,30	8
15	0,16	0,03	0,15	0,21	7
20	0,15	0,02	0,13	0,18	7
25	0,15	0,02	0,13	0,19	8
30	0,15	0,01	0,14	0,15	5
35	0,15	--	--	--	1

Tabelle 2: Kennzahl A für eine Meßreihe im 1-m³-Explosionsgefäß ($\Delta p_{dyn} = 0,45$ bar, $\Delta p_{red} = 0,6$ bar, Entlastungsfläche 0,2 m²)

Der maximale Überdruck Δp_D außerhalb des entlasteten Gefäßes ist also dem Abstand D von der Entlastungsöffnung umgekehrt proportional.

Dieser Zusammenhang gilt unabhängig vom Winkel gegen

die Entlastungsrichtung. Er konnte bei den Versuchen im Abstandsbereich zwischen 2 m und 35 m nachgewiesen werden. Unterhalb von 2 m kann in den meisten Fällen die Ausdehnung der Entlastungsöffnung gegenüber dem Abstand nicht mehr vernachlässigt werden. Es treten dann starke Druckschwankungen auf, die eine Auswertung unmöglich machen. Bei Abständen von mehr als 35 m wird bei dem uns zur Verfügung stehenden Versuchsgelände das Drucksignal, das von der direkt von der Entlastungsöffnung einlaufenden Druckwelle herrührt, von gleichzeitig eintreffenden Echos überlagert.

Das Ergebnis läßt sich leicht erklären, wenn man die Entlastungsmembran als punktförmigen Schallstrahler auffaßt, der sich in einem "halbunendlichen" Raum befindet. Für diesen Fall lehrt die Akustik, daß die Druckamplitude der Schallwelle dem Abstand zur Schallquelle umgekehrt proportional ist. Es sei angemerkt, daß es keineswegs von vornherein selbstverständlich ist, daß eine berstende Platzmembran als punktförmige Schallquelle aufgefaßt werden darf. Zum einen enthält die beim Entlastungsvorgang entstehende Druckwelle sicher eine Reihe von Grundfrequenzen, deren Wellenlänge wesentlich kleiner ist als der Durchmesser der Entlastungsöffnung. Für diese Frequenzen ist also die Entlastungsöffnung eine ausge dehnte Schallquelle. Zum anderen liegen bei der Explosionsdruckentlastung Bedingungen vor, bei denen sich nicht ohne weiteres aussagen läßt, ob sie auf die Ausbreitung der bei der Entlastung entstehenden Druckwelle einen entscheidenden Einfluß ausüben.

(Im Behälterinneren erreicht z.B. der Druck bekanntlich in der Regel erst nach dem Bersten der Membran seinen höchsten Wert. Das hiervon ausgehende Drucksignal muß Gebiete mit hohen Temperaturgradienten durchqueren, wodurch die Ausbreitung stark beeinflußt werden könnte).

e) Einfluß der Entlastungsfläche

Wie im vorigen Abschnitt gezeigt wurde, läßt sich die Abhängigkeit des Maximaldrucks von der Entfernung von der Entlastungsöffnung voraussagen, wenn man die Entlastungsöffnung als punktförmigen Schallstrahler auffaßt. Läßt man die Entlastungsfläche größer werden, so treffen die Voraussetzungen, unter denen diese Betrachtungsweise gültig ist, weniger gut zu. Die Entlastungsmembran nimmt mehr den Charakter eines flächenhaften Schallstrahlers an. Im Extremfall einer sehr großen Membran sollte von ihr ein nahezu paralleles Schallbündel ausgehen, das sich mit zunehmender Entfernung von der Entlastungsöffnung durch Beugungsercheinungen verbreitert. Da das Frequenzspektrum eines "Druckentlastungsknalls" nicht bekannt ist und außerdem stark von verschiedenen Einflüssen abhängt, läßt sich nicht voraussagen, ob dieser Extremfall bei den in der Praxis vorkommenden Öffnungsgrößen annähernd erreicht wird.

Wenn die obige Betrachtungsweise zutrifft, muß jedoch der Maximaldruck in einer gegebenen Entfernung von der Entlastungsöffnung mit zunehmender Entlastungsfläche ansteigen, da die Entlastungsöffnung dann für immer größer werdende Anteile des gesamten Frequenzspektrums wie ein flächenhafter Schallstrahler wirkt. Die im vorangegangenen Abschnitt definierte Kenngröße A müßte daher mit zunehmender Öffnungsfläche größer werden. Dies trifft auch zu, wie zum Beispiel Bild 4 zeigt. In dieser Abbildung wurde die Kenngröße A in logarithmischem Maßstab gegen die reziproke Fläche aufgetragen. Es ist bemerkenswert, daß sich dabei anscheinend eine lineare Abhängigkeit ergibt. Der Umfang des bisher vorliegenden experimentellen Materials läßt es indessen nicht gerechtfertigt erscheinen, aus dieser Beobachtung schon heute weitergehende Schlüsse zu ziehen.

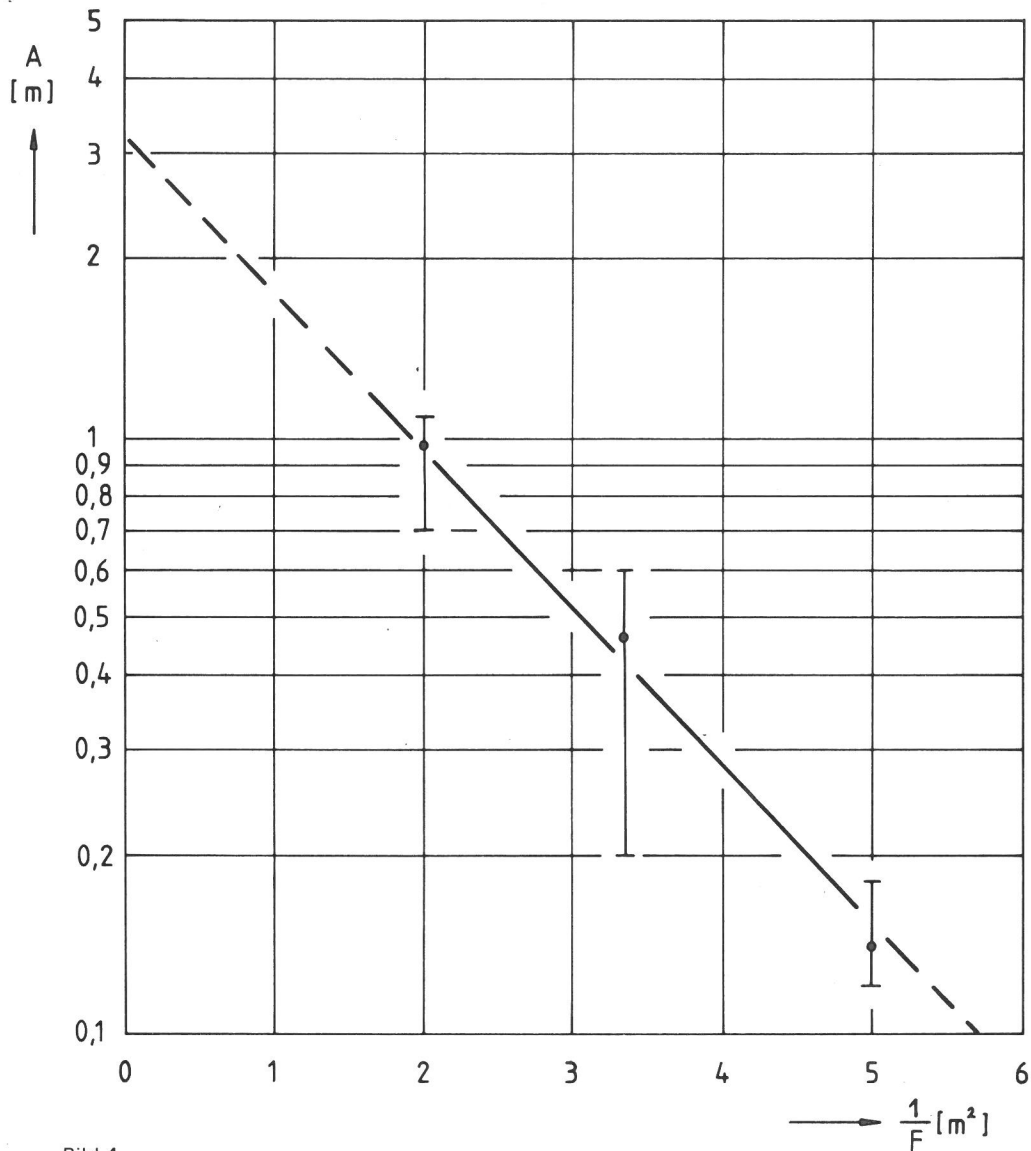


Bild 4
 Kennzahl A als Funktion der reziproken Öffnungsfläche F
 (I-Balken: Streubereich der Einzelwerte, Punkte: Mittelwert der Einzelergebnisse)

Führt man anhand der vorliegenden Meßergebnisse eine Extrapolation $\frac{1}{F} \rightarrow 0$ durch (siehe z.B. Bild 4), ergibt sich, daß bei einer sehr großen Öffnung der maximale Gesamtdruck in 2 m Entfernung von der Öffnung etwa das 1,5-fache des reduzierten Explosionsdrucks im Inneren des Behälters erreicht. Dieses Ergebnis erscheint in Anbetracht der Ergebnisse des Abschnitts b ("Vergleich zwischen Gesamtdruck und statischem Druck") nicht unvernünftig. Für die praktische Anwendung wird allerdings empfohlen, die Extrapolation auf das 5-fache der Fläche zu beschränken, für die die Kenngröße A durch Meßwerte belegt ist. Mit den Ergebnissen der vorliegenden Untersuchung sollten also nur Voraussagen für den

Druck in der Nähe von Entlastungsöffnungen gemacht werden, die nicht größer als etwa $2,5 \text{ m}^2$ sind.

Es sollte dabei wie folgt vorgegangen werden:

Zunächst wird $\Delta p_{\text{red}} = p_{\text{red}} - 1 \text{ bar}$ für den vorgesehenen Anwendungsfall bestimmt. Dies kann für Staubexplosionen geschehen durch geeignete Anwendung der in der VDI-Richtlinie 3673 angegebenen Nomogramme zur Bestimmung der notwendigen Entlastungsflächen oder näherungsweise durch Anwendung der von HEINRICH [2] angegebenen Formeln nach entsprechender Umstellung und Vereinfachung. Bei Gasexplosionen ist für die Bestimmung von p_{red} zur Zeit noch der experimentelle Weg vorzuziehen. Der so erhaltene Wert wird in die nach Δp_{D} aufgelöste Definitionsgleichung für die Größe A

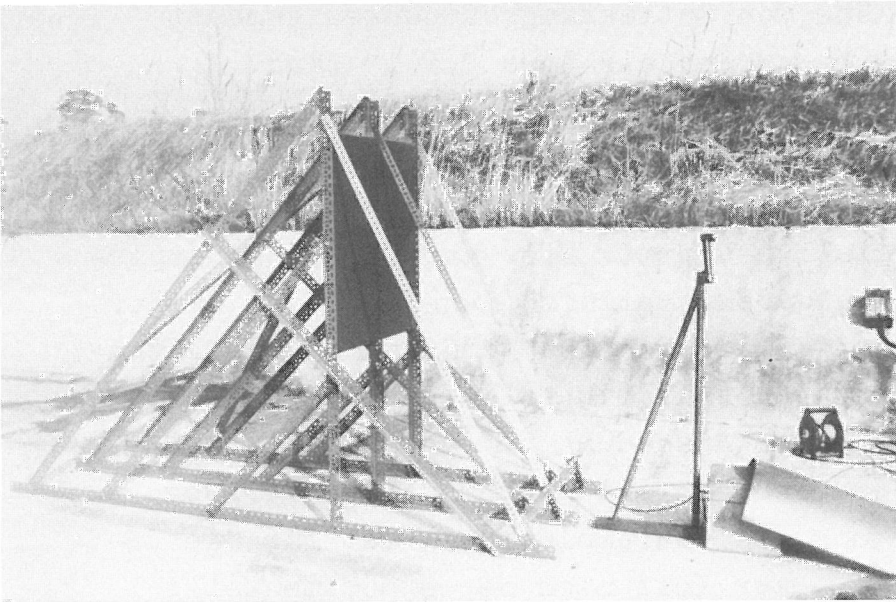
$$\Delta p_{\text{D}} = \frac{A \cdot 1 \text{ m} \cdot \Delta p_{\text{red}}}{D}$$

eingesetzt. Der Wert von A wird der graphischen Darstellung (Bild 4) entnommen. Man erhält so auf einfache Weise Δp_{D} als Funktion des Abstands von der Entlastungsöffnung.

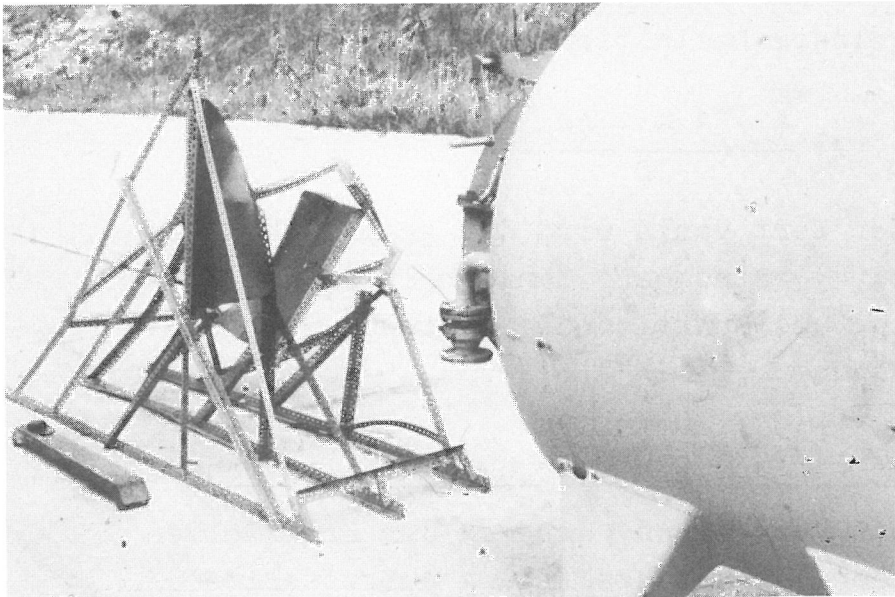
2.2. Kraft auf eine vor dem Behälter aufgestellte Wand

Es war zunächst vorgesehen, die von der Druckwelle auf eine vor der Entlastungsöffnung aufgestellte Modellwand ausgeübte Kraft direkt zu messen. Die Ergebnisse von in anderem Zusammenhang ausgeführten Versuchen (siehe Bilder 5 und 6) sowie die Erfahrungen bei der Messung des Rückstoßes auf den Behälter (siehe den entsprechenden Abschnitt dieses Berichts) zeigten jedoch, daß dies nur mit relativ großem Aufwand möglich ist, wenn die Wand realistische Ausmaße haben soll.

Darüber hinaus war zu bedenken, daß derartige Versuche außer einer indirekten Bestätigung der Ergebnisse des Abschnitts 2.1. keine für die Praxis wichtigen zusätzlichen Resultate erbracht hätten. Solche Resultate wären nur zu erwarten gewesen, wenn man zusätzlich zur Modellwand "Modellumgebungen" (reflek-



vor dem Versuch



nach dem Versuch

Bilder 5 und 6
Auswirkung eines Druckentlastungsvorgangs auf eine aus handelsüblichen Schwerlast-Regal-Bauteilen aufgebaute Modellwand (Belastbarkeit laut Herstellerangaben 20 kN/m^2)

tierende Hindernisse verschiedener Größe in verschiedenen Anordnungen) aufgestellt und ihren Einfluß auf die Kraft untersucht hätte, die auf die Modellwand ausgeübt wird.

Da solche Versuche weit über den Rahmen der vorliegenden Untersuchung hinausgegangen wären, mußte darauf verzichtet werden.

In bezug auf die praktische Anwendung der Ergebnisse des vorangegangenen Abschnitts sollen an dieser Stelle noch zwei ergänzende Hinweise gegeben werden:

Bei der Abschätzung der Kraft, die durch den Entlastungsvorgang auf eine Wand ausgeübt wird, muß die Reflexion der Druckwelle an Hindernissen und eine in ungünstigen Fällen mögliche Fokussierung berücksichtigt werden. Bei der Untersuchung, ob ein solcher Fall vorliegt, kann man die Methoden der geometrischen Optik heranziehen.

Für die Widerstandsfähigkeit von Schutzwänden gegenüber den Druckauswirkungen von Explosionen ist nicht in jedem Fall die Höhe des Druckmaximums maßgebend, sondern in manchen Fällen auch die Dauer des durch die Explosion verursachten Überdruckes. Die Klärung der Frage, wann dies berücksichtigt werden muß, ist nicht Gegenstand der vorliegenden Untersuchung.

2.3. Rückstoßkraft auf einen durch Druckentlastung geschützten Behälter

2.3.1. Problemstellung:

Ein Behälter, der durch Druckentlastung vor der Zerstörung durch eine in seinem Inneren ablaufende Explosion geschützt ist, erfährt beim Ansprechen der Entlastungseinrichtung einen Rückstoß. Dieser Rückstoß kann bereits bei Entlastungsflächen gängiger Größe (wenige m^2) und den in der Praxis üblichen reduzierten Explosionsdrücken (bis etwa 4 bar absolut) Werte von einigen 100 kN erreichen, damit den Behälter aus seiner Verankerung reißen und so sekundär zu seiner Zerstörung führen.

Die Gefahr, daß Behälter dabei umgeworfen werden, ist besonders groß, wenn die Entlastungsöffnungen bei aufrecht stehenden Behältern seitlich am oberen Ende angebracht sind. (Dies ist eine Lösung, die relativ häufig bei staubführenden Behältern zu beobachten ist, da man sich die obere, horizontale Abschlußfläche meist für Beschickungsorgane usw. freihalten will). Will man eine solche sekundäre Zerstörung vermeiden, so muß der Rückstoß bekannt sein, der beim Entlastungsvorgang auftritt.

RITTER [3] hat dieses Problem theoretisch behandelt. Er ging dabei aus von Überlegungen von SCHMIDT [4], die

dieser für den Fall der Ausströmung eines Gases aus einem Behälter durch eine Öffnung angestellt hatte. RITTER gelangte dabei zu der Formel

$$k_R = F_e \cdot (1,2679 p_o - p_a)$$

Darin bedeuten k_R die Rückstoßkraft, F_e den Endquerschnitt der Ausströmöffnung, p_o den Druck im Behälter, p_a den Druck außerhalb des Behälters. Für die Berechnung der maximalen Rückstoßkraft bei der Explosionsdruckentlastung ist also $p_o = p_{red}$ zu setzen.

Bei der Ableitung der Formel werden jedoch eine Reihe von Annahmen gemacht, die bei der Explosionsdruckentlastung sicher nicht zutreffen. So wird das ausströmende Gas als ideal betrachtet. Seine spezifische Wärme soll konstant sein. Der Ausströmvorgang soll adiabatisch verlaufen. Der Adiabatenexponent wird gleich 1,4 gesetzt. Die Strömungsgeschwindigkeit des Gases innerhalb des Behälters wird ebenso vernachlässigt wie die Einschnürung des Gasstroms bei nicht ideal geformten Öffnungen. Schließlich wird die Strömung als reibungsfrei angesehen, und es wird angenommen, daß das Verhältnis p_a/p_{red} nicht das Laval-Druckverhältnis unterschreitet.

In Anbetracht der praktischen Bedeutung war es notwendig, die Voraussagen der Theorie durch Versuche zu überprüfen. Darüber hinaus liefert das Experiment zusätzlich noch Aussagen über den zeitlichen Verlauf der Kraft und über den Impuls, der beim Rückstoßvorgang auf den Behälter wirkt. Bei der Beurteilung, ob ein Behälter auch für den Entlastungsvorgang ausreichend befestigt ist, können diese Informationen eine wichtige Rolle spielen.

2.3.2. Lösungsweg:

Es wurden wiederum Staubexplosionsversuche in Gefäßen mit Volumina von $0,25 \text{ m}^3$, 1 m^3 und 5 m^3 ausgeführt. An der Seite, die der Entlastungsöffnung gegenüberlag, wurden die Behälter an einem oder mehreren Widerlagern spielfrei abgestützt. Die Widerlager lagen auf der gemeinsamen Symmetrieachse von Gefäß und Druckent-

lastungsöffnung oder waren konzentrisch in gleichen Winkelabständen um diese Achse verteilt. Zwischen den Widerlagern und dem Behälter befand sich jeweils eine sogenannte Meßunterlagscheibe. Meßunterlagscheiben sind ringförmige Kraftmeßelemente. Bei den von uns verwendeten Gebern wurde der piezoelektrische Effekt angewendet. Die von den Gebern erzeugten Signale wurden in Ladungsverstärkern verstärkt und mit Hilfe eines Transientenrekorders und eines X,Y-Schreibers aufgezeichnet. Bei den Versuchen, bei denen mehr als ein Geber verwendet wurde, wurden die Signale der einzelnen Geber in einigen Fällen elektronisch summiert. Meistens wurden die Signale jedoch getrennt aufgezeichnet und dann mit kurzer Schrittweite Punkt für Punkt rechnerisch summiert.

Schwierigkeiten bereitete zunächst die Konstruktion der Widerlager für das $0,25\text{-m}^3$ - und das 5-m^3 -Gefäß. Diese Gefäße können aufgrund ihrer Bauweise nur horizontal aufgestellt werden. Sie benötigen daher Widerlager, die zur Erdoberfläche parallele Kräfte aufnehmen können, ohne sich dabei nennenswert zu bewegen.

Zunächst wurde ein Widerlager aus schwerem U-Profilstahl verwendet, das im Betonfußboden der Versuchsstrecke mit Schrauben und Dübeln großen Durchmessers verankert war (Bild 7).

Das Kraftsignal zeigte jedoch starke Schwingungen, die eine Auswertung unmöglich machten (Bild 8).

Dies war insofern unerwartet, als eine Bewegung des Widerlagers beim Versuch mit bloßem Auge nicht festgestellt werden konnte. (Später konnte in einer gesonderten Versuchsreihe nachgewiesen werden, daß die maximale Schwingungsamplitude des Widerlagers am Krafteinleitungspunkt nur $0,6\text{ mm}$ betrug).

Aufgrund dieser Erfahrung wurde ein Widerlager aus drei



Bild 7
Widerlager aus U-Profil-Stahl

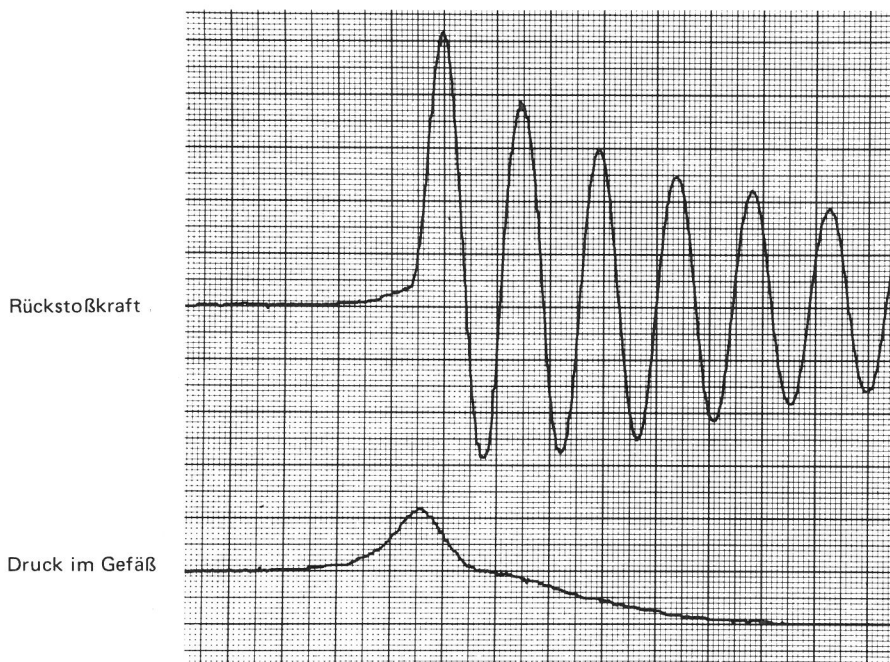


Bild 8
Kraftsignal bei ungeeignetem Widerlager
(Abszissenmaßstab 50 ms/Rasterfeld; Ordina-
tenmaßstab oben 2,2 kN/Rasterfeld, unten
0,2 bar/Rasterfeld)

Schwerbeton-Blöcken verwendet. Die Blöcke hatten eine Masse von insgesamt 8100 kg. Um gegenseitige Verschiebungen der Blöcke beim Versuch zu verhindern, waren sie mit einem Joch zusammengespant (Bild 9). Das Joch trug an der dem Behälter zugewandten Seite die eigentliche Auflagefläche. An dieser Stelle wurde die Oberfläche des Betonblocks mit Zementmörtel sauber ausgeglichen, um jegliche Wackelschwingungen zu vermeiden.

Wie die im nächsten Abschnitt wiedergegebenen Diagramme des Kraftverlaufs zeigen, hat sich diese An-

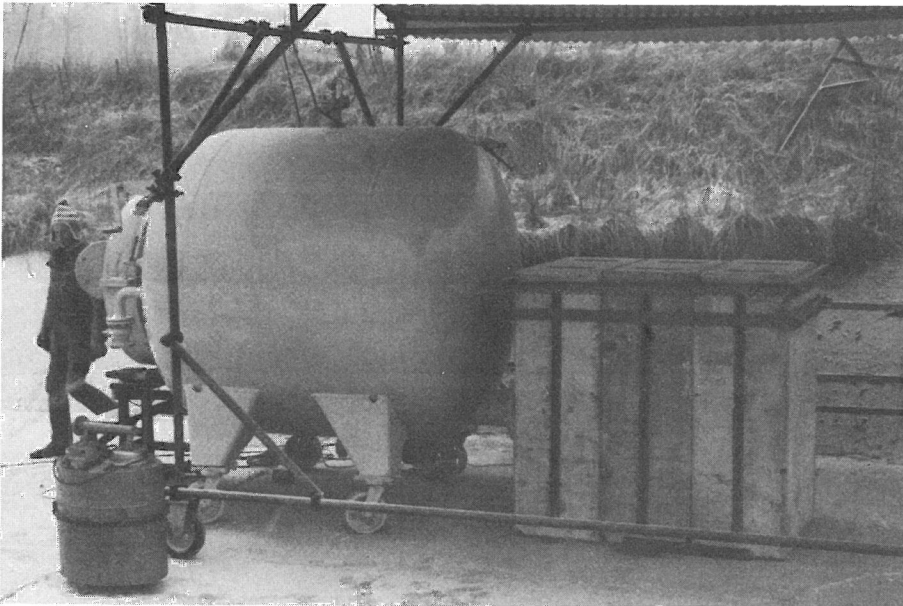


Bild 9
Widerlager aus Betonblöcken

ordnung bis zu sehr hohen maximalen Rückstoßkräften ausgezeichnet bewährt. Auch bei den größten Rückstoßkräften wurden die Betonblöcke nicht gegenüber dem Boden der Versuchsstrecke verschoben.

Bei den Versuchen im 1-m^3 -Gefäß traten diese Probleme nicht auf, weil das Gefäß aufgrund seiner besonderen Konstruktion vertikal aufgestellt werden kann. Der Behälter stand dann auf drei Füßen, die Druckentlastungsöffnung zeigte nach oben. Unter den Füßen befanden sich Kraftaufnehmer (Bilder 10 und 11).

Wie man aus den im folgenden Abschnitt wiedergegebenen Diagrammen entnehmen kann, sind dem Kraft-Zeit-Verlauf auch bei zweckmäßiger Konstruktion der Widerlager Schwingungen überlagert. Dies ist auf Schwingungen des Gefäßes, insbesondere des der Entlastungsöffnung gegenüberliegenden Behälterbodens zurückzuführen. Diese Schwingungen lassen sich nur mit sehr hohem Aufwand durch eine allseitige starre Abstützung des Behälterbodens auf ein Widerlager beseitigen.

Derartige Schwingungen treten bei der Anwendung der Druckentlastung in der Praxis ebenfalls auf. Dies muß bei der Anlagenplanung berücksichtigt werden.

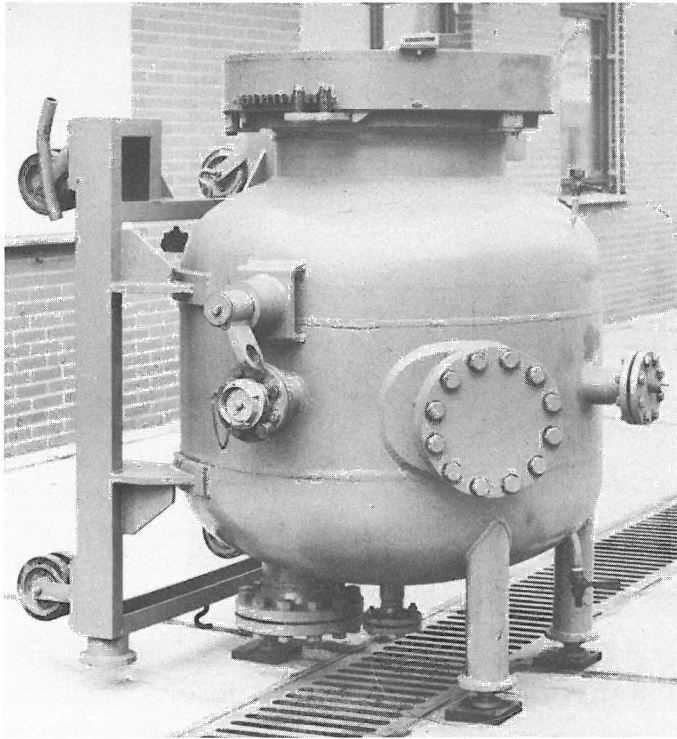


Bild 10
1-m³-Explosionsgefäß, für
Rückstoßversuche vertikal
aufgestellt

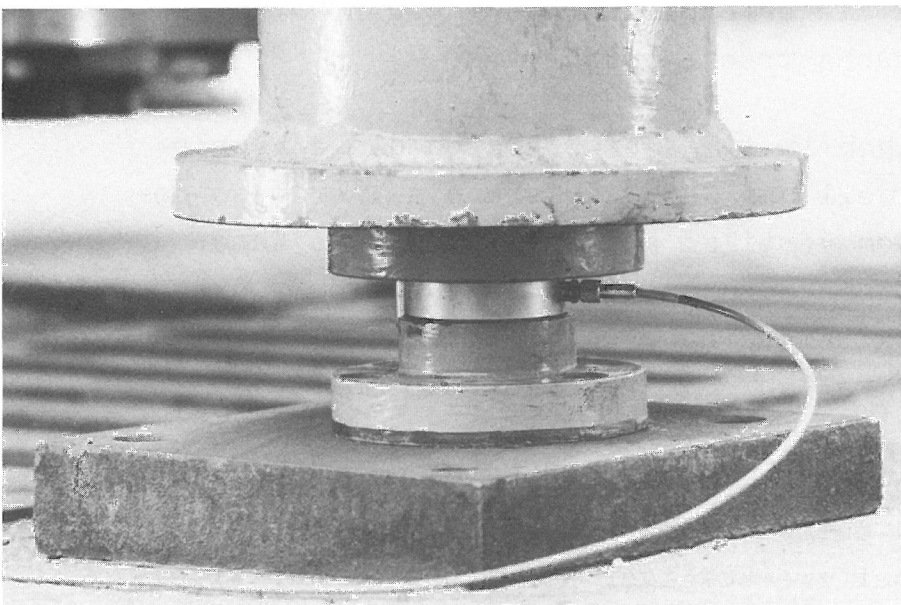


Bild 11
Meßunterlagscheibe unter einem
Fuß des 1-m³-Explosionsgefäßes

2.3.3. Ergebnisse und Diskussion:

Bei den Versuchen wurde die Größe der Entlastungsöffnung zwischen $0,008 \text{ m}^2$ (entsprechend etwa NW 100) und $0,5 \text{ m}^2$ (entsprechend etwa NW 800) variiert. Es wurden maximale Rückstoßkräfte von 2,8 kN bis 41,8 kN gemessen. Der Gesamtimpuls lag zwischen 130 Ns und 6800 Ns.

Im allgemeinen folgt der zeitliche Verlauf der Rückstoßkraft qualitativ recht gut dem zeitlichen Verlauf

des reduzierten Explosionsüberdrucks Δp im entlasteten Behälter, wie dies auch aufgrund der Theorie zu erwarten ist (Bild 12). Bei großen Öffnungen und hohen Ansprechdrücken der Membran wird der Entlastungsvorgang allerdings von einem hohen Rückstoßimpuls eingeleitet (Bild 13 und 14), während bei kleinen Öffnungen und niedrigen Ansprechdrücken ein derartiges Verhalten nicht mehr zu beobachten ist (Bild 15). Auf die Anregung von Eigenschwingungen des Behälterbodens wurde eingangs schon hingewiesen (Bild 16).

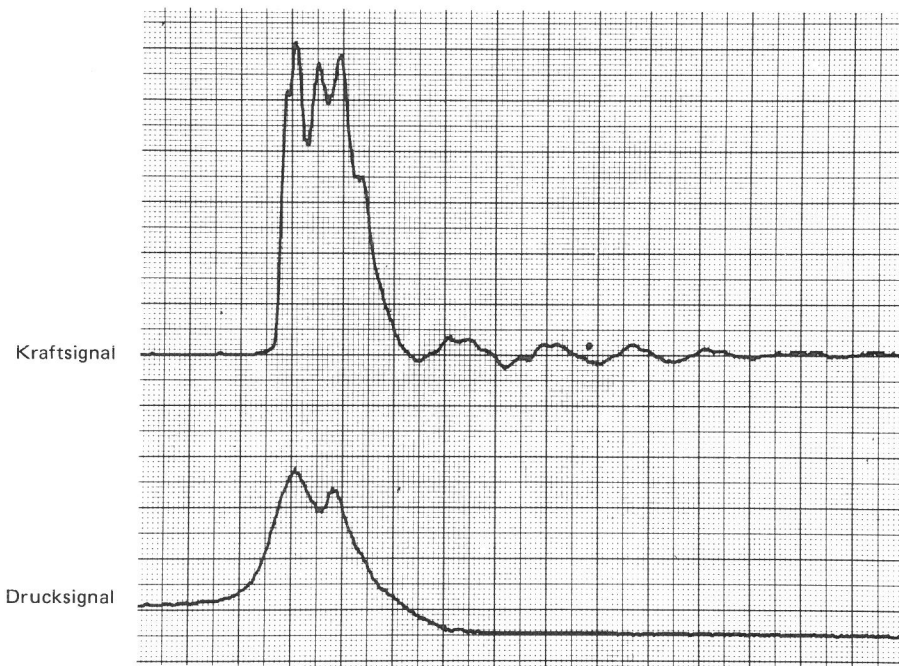


Bild 12
Zeitlicher Verlauf der Rückstoßkraft bei einer Explosion im 5-m^3 -Gefäß mit einer Entlastungsfläche von $0,5\text{ m}^2$
(Abszissenmaßstab 50 ms/Rasterfeld ; Ordinatenmaßstab oben $5,5\text{ kN/Rasterfeld}$, unten $0,2\text{ bar/Rasterfeld}$)

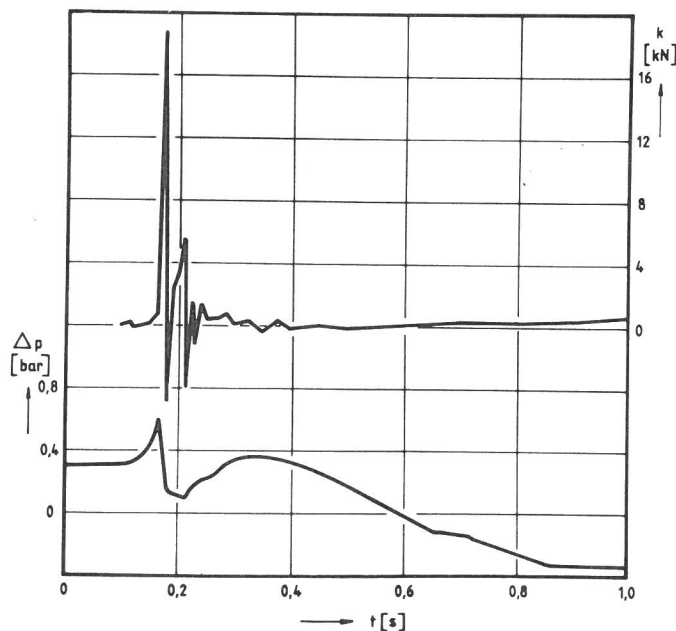


Bild 13
Zeitlicher Verlauf der Rückstoßkraft bei einer Explosion im 1-m^3 -Gefäß mit einer Entlastungsfläche von $0,3\text{ m}^2$
(Maßstäbe siehe Bildbeschriftung)

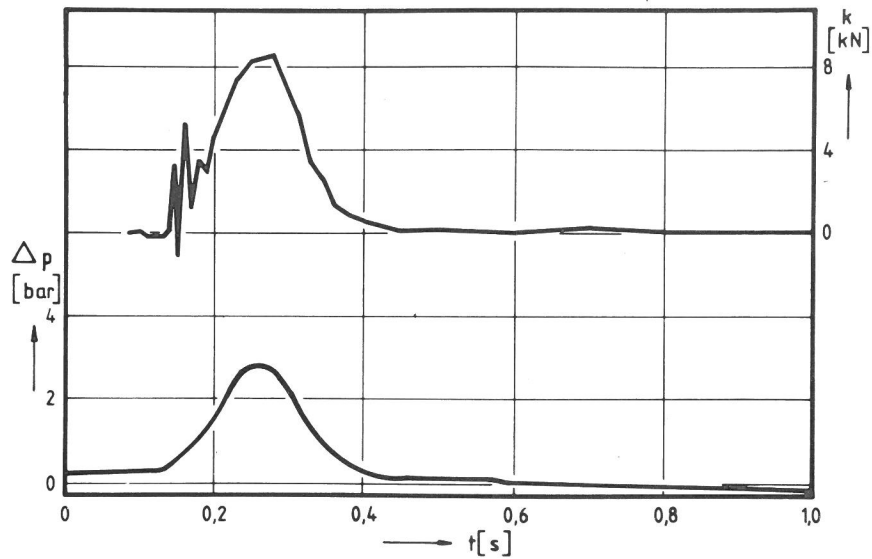


Bild 14
Zeitlicher Verlauf der Rückstoßkraft bei einer Explosion im 1-m^3 -Gefäß mit einer Entlastungsfläche von $0,032\text{ m}^2$ (Maßstäbe siehe Bildbeschriftung)

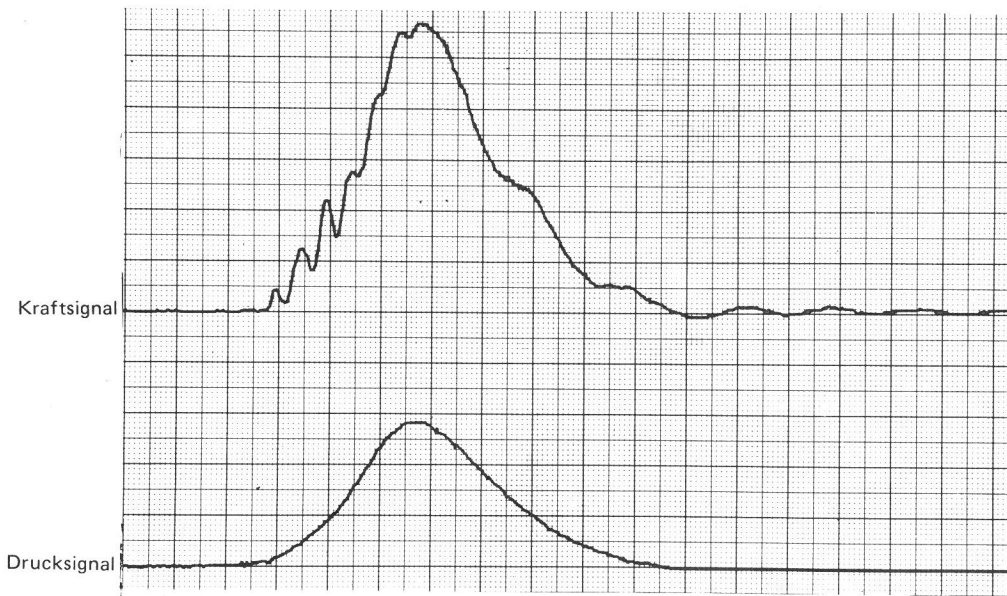


Bild 15
Zeitlicher Verlauf der Rückstoßkraft bei einer Explosion im 5-m^3 -Gefäß mit einer Entlastungsfläche von $0,1\text{ m}^2$

(Abszissenmaßstab 50 ms/Rasterfeld; Ordinatenmaßstab oben 5,5 kN/Rasterfeld, unten 1,0 bar/Rasterfeld)

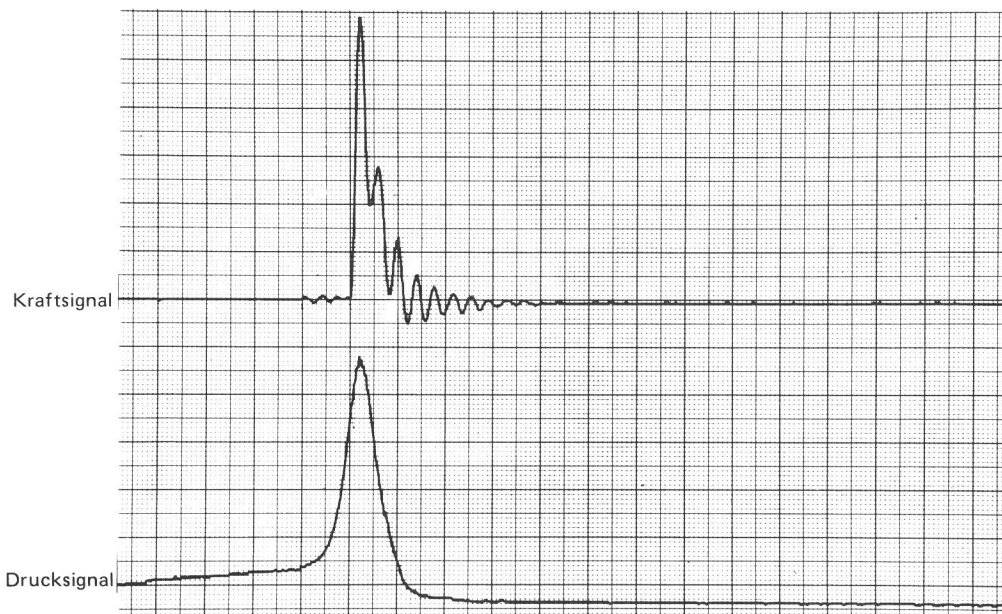


Bild 16
Zeitlicher Verlauf der Rückstoßkraft bei einer Explosion im $0,25\text{-m}^3$ -Gefäß mit einer Entlastungsfläche von $0,032\text{ m}^2$

(Abszissenmaßstab 50 ms/Rasterfeld; Ordinatenmaßstab oben 2,2 kN/Rasterfeld, unten 0,5 bar/Rasterfeld)

In Bild 17 ist die maximale Rückstoßkraft $k_{R,max}$ für drei ausgewählte reduzierte Explosionsdrücke gegen die Entlastungsfläche aufgetragen. Wie man sieht, scheint die Voraussage der Theorie, wonach die beiden Größen einander proportional sein sollten, leidlich gut erfüllt zu sein.

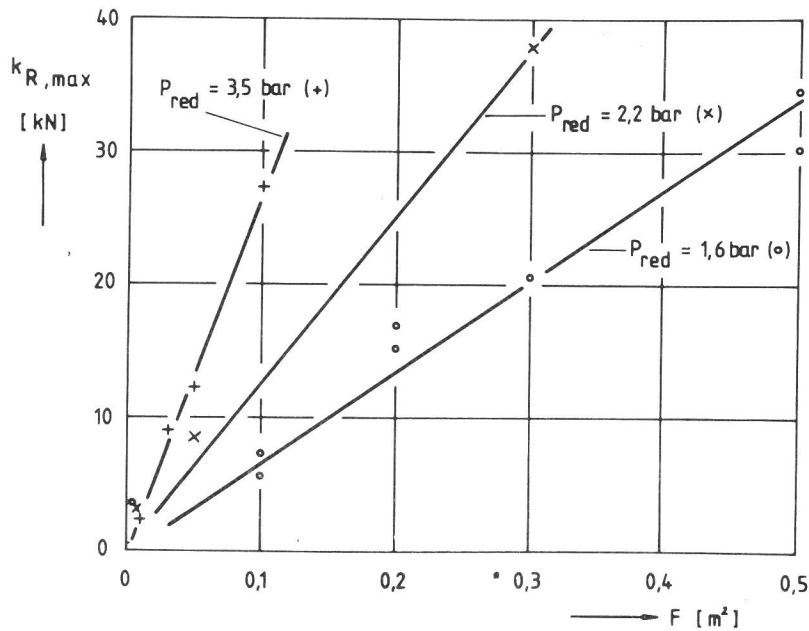


Bild 17
Maximale Rückstoßkraft $k_{R,max}$ für drei verschiedene reduzierte Explosionsdrücke P_{red} , aufgetragen gegen die Entlastungsfläche F

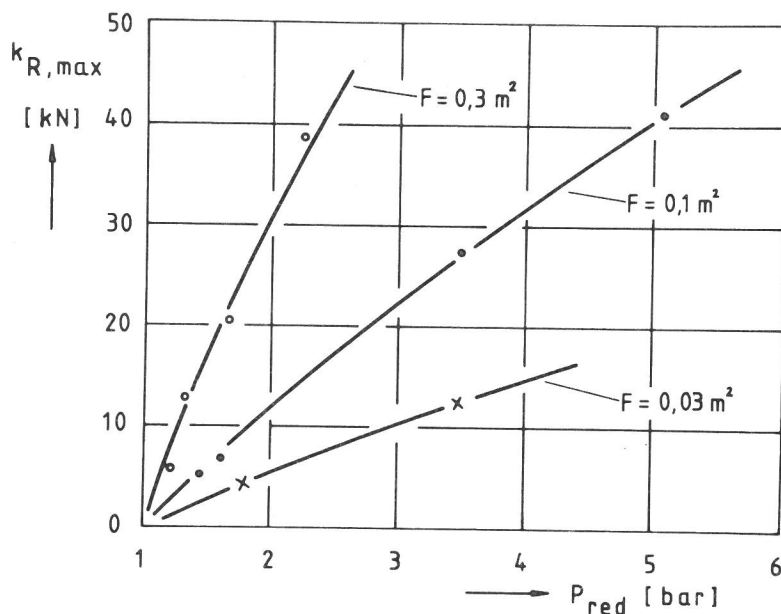


Bild 18
Maximale Rückstoßkraft $k_{R,max}$ für drei verschiedene Entlastungsflächen F , aufgetragen gegen den reduzierten Explosionsdruck P_{red}

Indessen werden Abweichungen von den Voraussagen der Theorie erkennbar, wenn man die maximale Rückstoßkraft $k_{R,max}$ gegen den reduzierten Explosionsdruck aufträgt (Bild 18). Die Theorie sagt hier voraus, daß sich die Abhängigkeit der beiden Größen durch eine Gerade darstellen läßt, was durch das Experiment nicht bestätigt wird.

Deutlicher werden die Verhältnisse, wenn man die

Größe $\frac{k_{R,max}}{1,2679 p_o - p_a}$ berechnet. Ihr Zahlenwert

müßte gleich der jeweils verwendeten Druckentlastungsfläche sein. In Tabelle 3 sind die Ergebnisse für alle 71 Versuche, bei denen der Rückstoß gemessen werden konnte, zusammengefaßt:

F [m ²]	$\frac{k_{R,max}}{1,2679 p_{red}^{-1}}$ [m ²]				Zahl der Ver- suche
	Mittel- wert	Stan- dard- abwei- chung	nie- drig- ster Einzel- wert	höch- ster Einzel- wert	
0,008	0,0063	0,0008	0,0048	0,0071	6
0,020	0,019	0,001	0,017	0,020	6
0,032	0,029	0,007	0,020	0,038	12
0,05	0,040	0,007	0,034	0,053	6
0,1	0,073	0,010	0,054	0,085	14
0,2	0,12	0,05	0,05	0,16	7
0,3	0,17	0,05	0,09	0,22	14
0,5	0,28	0,06	0,21	0,35	6

Tabelle 3:
Gegenüberstellung der Größe
 $\frac{k_{R,max}}{1,2679 p_{red}^{-1}}$ und der tatsächlichen
Entlastungsfläche F.

Wie die Tabelle zeigt, ist also die maximale Rückstoßkraft praktisch immer kleiner als nach der Theorie zu erwarten ist. Das Ausmaß der Abweichungen wird klarer aus einer graphischen Darstellung, in der die Größen aus Tabelle 3 mit Ausnahme der Werte für 0,008 m² und 0,032 m² gegeneinander aufgetragen sind (Bild 19).

In Tabelle 4 ist für alle Versuche noch einmal zusammengestellt, welcher Bruchteil (in %) der nach der Theorie zu erwartenden maximalen Rückstoßkraft bei den Versuchen tatsächlich gemessen wurde.

Eine genauere Analyse der Daten zeigt, daß die relativen Abweichungen von der Theorie gering sind, wenn das Verhältnis aus Druck der Außenatmosphäre p_a und reduziertem Explosionsdruck p_{red} das Laval-Druckverhältnis (0,53 für $\kappa = 1,4$) unterschreitet und wenn die Entlastungsfläche klein ist [5].

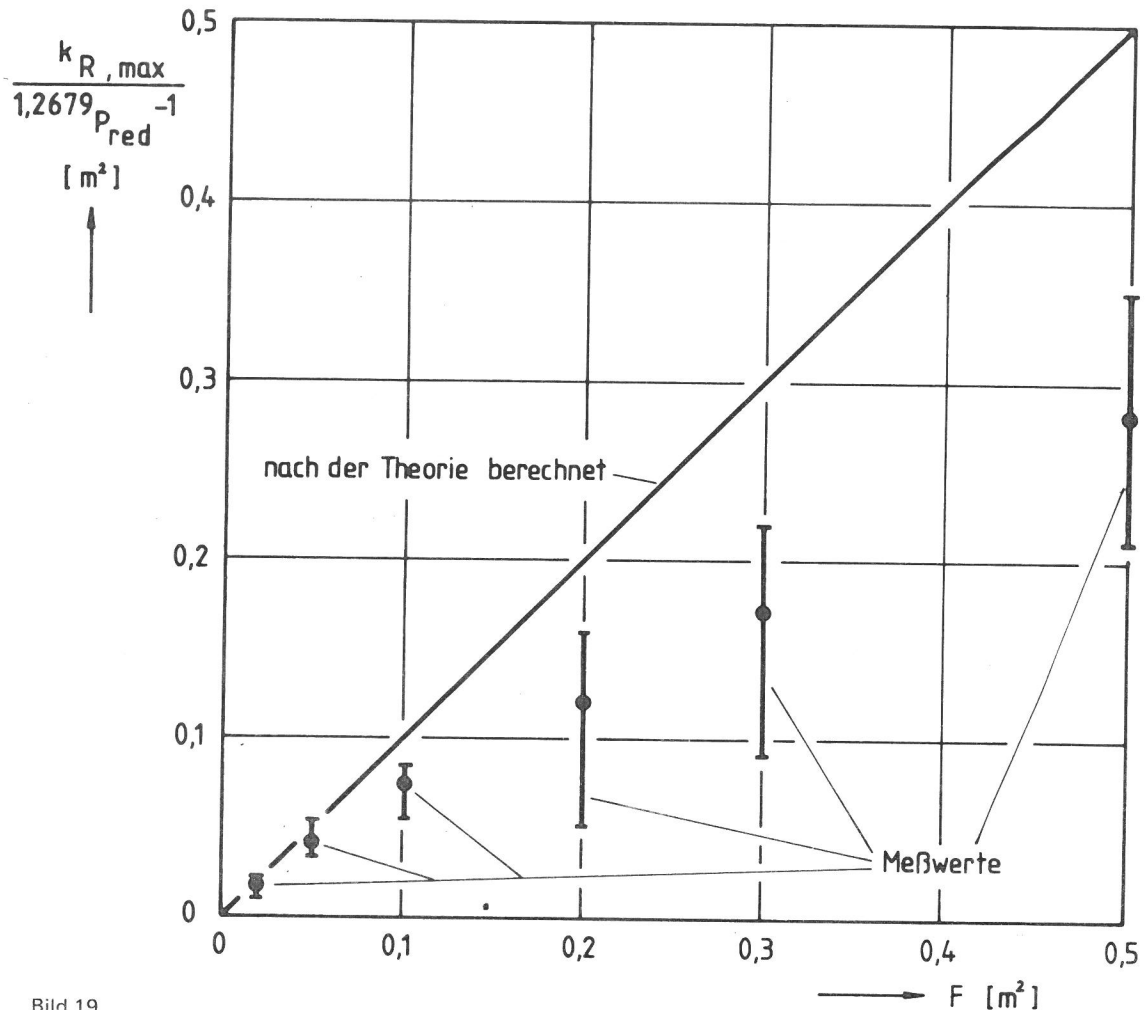


Bild 19
 $\frac{k_{R,max}}{1,2679 p_{red}^{-1}}$, aufgetragen gegen die Entlastungsfläche F
 (I-Balken: Streubereich der Einzelwerte; Punkte: Mittelwert der Einzelergebnisse)

Ent- las- tungs- fläche [m ²]	$\frac{k_{R,max,gemessen}}{k_{R,max,theoret.}}$ [%]				Zahl der Ver- suche
	Mittel- wert	Stan- dard- abwei- chung	nie- drig- ster Einzel- wert	höch- ster Einzel- wert	
0,008	79	10	60	89	6
0,020	95	5	85	100	6
0,032	91	22	63	119	12
0,05	80	14	68	106	6
0,1	73	10	54	85	14
0,2	60	25	25	80	7
0,3	57	17	30	73	14
0,5	56	12	42	70	6

Tabelle 4: Vergleich der gemessenen maximalen Rückstoßkraft mit der Theorie

Der Einfluß des reduzierten Explosionsdrucks ist leicht zu verstehen: Sobald p_{red} kleiner wird als etwa das Doppelte des außen herrschenden Drucks, treffen die Voraussetzungen, unter denen die Theorie gilt, nicht mehr zu. Da nunmehr die

Ausströmgeschwindigkeit im engsten Querschnitt unter die Schallgeschwindigkeit sinkt, muß die Rückstoßkraft kleiner werden, da das ausgeworfene Material eine geringere Beschleunigung erfährt als bei höheren reduzierten Explosionsdrücken, wo es grundsätzlich auf die Schallgeschwindigkeit beschleunigt wird.

Die Erklärung des Einflusses der Entlastungsfläche stößt dagegen auf Schwierigkeiten, zumal die Abnahme des Anteils der Randzonen an der Gesamt-Querschnittsfläche der Strömung eher das Gegenteil des experimentellen Befundes erwarten ließe. Eine Deutung dieses Einflusses soll daher erst später versucht werden, wenn die Ergebnisse zusätzlicher Untersuchungen vorliegen.

Der beim Rückstoßvorgang gemessene Gesamtimpuls I hatte Werte im Bereich zwischen rund 100 und etwa 7000 Ns (siehe hierzu Tabelle 5); er steigt mit zunehmendem reduzierten Explosionsdruck und mit zunehmender Entlastungsfläche an. Dies gilt nicht nur für die Versuche, bei denen der Kraftverlauf dem Druckverlauf folgt (Bild 12), sondern auch für solche Versuche, bei denen die Entlastung mit einem kräftigen Stoß beginnt (Bild 13).

Der Gesamtimpuls wird erwartungsgemäß umso größer, je größer das Volumen des zu entlastenden Behälters wird.

Die Versuche haben also gezeigt, daß die nach der Theorie zu erwartende maximale Rückstoßkraft nur in einigen wenigen Fällen erreicht oder geringfügig überschritten wird. In der überwiegenden Mehrzahl der Fälle liegt der gemessene Rückstoß deutlich unter dem zu erwartenden Wert. Diese Abweichung ist umso stärker, je größer das Gefäß und je größer die Druckentlastungsöffnung ist. Es ist also ausreichende Sicherheit gegeben, wenn man den in der Praxis zu erwartenden Rückstoß nach der einleitend genannten Formel berechnet.

Volumen [m ³]	Entlastungs- fläche [m ²]	P _{red} [bar]	Gesamtimpuls (Mittelwert) [Ns]
0,25	0,008	4,4	309
		6,4	409
	0,020	2,1	169
		4,2	316
	0,032	1,8	121
		3,5	256
1,0	0,032	3,9	1180
		4,0	1340
	0,1	1,4	399
		1,5	453
	0,3	1,3	171
		1,6	293
5,0	0,1	3,5	4780
		5,1	6680
	0,3	1,3	1400
		2,2	4350
	0,5	1,2	724
		1,6	2470

Tabelle 5: Gesamtimpuls beim Rückstoß eines druckentlasteten Behälters für verschiedene Bedingungen

Der beim Entlastungsvorgang übertragene Gesamtimpuls hängt vom reduzierten Explosionsdruck und von der Entlastungsfläche in gleicher Weise ab wie die maximale Rückstoßkraft. Er nimmt außerdem mit dem Volumen zu. Seine Größenordnung läßt sich für den konkreten Fall mit ausreichender Genauigkeit mit Hilfe der Tabelle 5 abschätzen.

2.4. Temperaturverlauf in der Umgebung eines druckentlasteten Behälters

Es war vorgesehen, die Flammenausbreitung und den Temperaturverlauf vor der Entlastungsöffnung unter mehreren, stark voneinander abweichenden Bedingungen zu untersuchen. Die erwarteten Ergebnisse sollten Abschätzungen über die Größe des Bereichs ermöglichen, der beim Entlastungsvorgang unter verschiedenen Be-

dingungen durch die Stichflamme gefährdet wird. Die zur Verfügung stehende Versuchsstrecke ist für solche Untersuchungen recht gut geeignet, da sie allseits von 4,5 m hohen Erdwällen und zusätzlich noch von Bäumen gegen den Wind abgeschirmt wird.

Die Untersuchungen konnten aus apparativen Gründen (Zahl der vorhandenen schnellen Registriereinrichtungen u.a.m.) jedoch nicht gleichzeitig mit den anderen Versuchen ausgeführt werden. Während der Untersuchungen für das Forschungsvorhaben wurde aber klar, daß großes Interesse an der experimentellen Untersuchung der Rückstoßkraft bestand. In Anbetracht der Tatsache, daß die Ergebnisse dieser Untersuchungen für die Praxis sicher eine größere Bedeutung haben als Messungen der Flammenausbreitung, wurde entschieden, zunächst den Rückstoßvorgang zu untersuchen. Es war deshalb nicht mehr möglich, die Untersuchungen zur Flammenausbreitung in dem für das Vorhaben zur Verfügung stehenden begrenzten Zeitraum auszuführen.

2.5. Zusammenfassung

Es wurden Explosionsversuche mit Druckentlastung in Gefäßen mit Volumina von $0,25 \text{ m}^3$, 1 m^3 und 5 m^3 ausgeführt. Bei den Versuchen wurde der Verlauf des Drucks in der Umgebung des Behälters sowie der Verlauf der Rückstoßkraft auf den Behälter untersucht.

Die Versuche zur Druckausbreitung hatten im wesentlichen folgende Ergebnisse:

- 1) Der maximale Überdruck Δp_D an einer vorgegebenen Stelle außerhalb des Gefäßes ist unabhängig vom Volumen des entlasteten Gefäßes, vom dynamischen Ansprechdruck der Entlastungseinrichtung, von den Explosionskenngrößen "maximaler zeitlicher Druckanstieg" und "maximaler Explosionsdruck" der explodierenden Atmosphäre und vom Winkel gegen die Entlastungsrichtung.

- 2) Ab einer Entfernung von 2 m (Vierfaches des Durchmessers der größten verwendeten Entlastungsöffnung) ist der Maximalwert des Gesamtüberdrucks Δp_D an einer gegebenen Stelle außerhalb des Gefäßes etwa 1,5-mal so groß wie der statische Überdruck an derselben Stelle.
- 3) Δp_D ist im Abstandsbereich zwischen 2 m und 35 m, wahrscheinlich aber auch in größerer Entfernung, umgekehrt proportional dem Abstand D von der Entlastungsöffnung.
- 4) Δp_D ist dem reduzierten Explosionsüberdruck Δp_{red} für Δp_{red} -Werte zwischen 0,3 bar und 2,0 bar proportional.
- 5) Aus den Versuchsergebnissen wurde eine graphische Darstellung entwickelt (Bild 4), mit deren Hilfe im Gültigkeitsbereich der Untersuchungen (Abstand zur Entlastungsöffnung nicht kleiner als der vierfache Durchmesser der Entlastungsöffnung, Fläche der Entlastungsöffnung nicht größer als $2,5 \text{ m}^2$) der maximal zu erwartende Überdruck Δp_D an einer gegebenen Stelle außerhalb des Behälters abgeschätzt werden kann.
- 6) Aufgrund der Versuchserfahrungen wird empfohlen, bei der Abschätzung der Kraft, die auf ein vor der Entlastungsöffnung liegendes Hindernis wirkt, mögliche Reflexions- und Fokussierungserscheinungen der Druckwelle besonders zu beachten.

Die Versuche zum Verlauf des Rückstoßes hatten folgende Resultate:

- 1.) Die maximale Rückstoßkraft $k_{R,max}$ auf den entlasteten Behälter steigt mit dem reduzierten Explosionsdruck p_{red} und mit der Größe der Entlastungsfläche.

- 2.) Die maximale Rückstoßkraft erreicht nur in wenigen Fällen den nach der Theorie zu erwartenden Wert oder überschreitet ihn geringfügig. In der weitaus überwiegenden Mehrzahl der Fälle liegt sie deutlich darunter. Für die Anwendung in der Praxis ist es daher völlig ausreichend, wenn der zu erwartende maximale Rückstoß nach der Formel

$$k_{R,max} = F \cdot (1,27 p_{red} - 1)$$

berechnet wird.

- 3.) Der beim Entlastungsvorgang übertragene Gesamtimpuls steigt ebenso wie die maximale Rückstoßkraft mit dem reduzierten Explosionsdruck und mit der Entlastungsfläche. Er nimmt darüber hinaus erwartungsgemäß mit dem Volumen des entlasteten Gefäßes zu. Aus den Versuchsergebnissen (Tabelle 5) kann abgeschätzt werden, in welcher Größenordnung der bei der Anwendung zu erwartende Impuls liegen wird. Die Höhe des Gesamtimpulses ist zu beachten, wenn sich die Behälterbefestigung bei kurzfristiger Beanspruchung elastisch verhält, sich aber bei länger dauernder Belastung gleicher Größe plastisch verformt oder bricht.

2.6. Literatur

- [1] VDI-Richtlinie 3673 "Druckentlastung von Staubexplosionen", Weißdruck, Düsseldorf, Juni 1979
- [2] a) H.-J.HEINRICH, Arbeitsschutz 1974, Seite 314
b) H.-J.HEINRICH, Chemie-Ingenieur-Technik 38, (1966), Seite 1125
- [3] K.RITTER, Privatmitteilung
- [4] E.SCHMIDT, "Thermodynamik", 9.Auflage, Springer, Berlin 1962, Seite 271
- [5] M.HATTWIG, "Investigations on the recoil of vented vessels", Third International Symposium on Loss Prevention and Safety Promotion in the Process Industries, Basel, 15. bis 19.September 1980, Preprints, Seite 968

Das Forschungsvorhaben wurde aus Mitteln des ERP-Sondervermögens finanziell unterstützt.

Neben anderen Mitarbeitern und Freunden der Bundesanstalt für Materialprüfung ist der Verfasser besonders den Herren Prof. Dr. H.-J. Heinrich, Dipl.-Ing. J. Knapp, Dipl.-Ing. K. Oppermann, Dr.-Ing. W. Rückward (BAM) und Prof. Dr. H. Gg. Wagner (Institut für physikalische Chemie der Universität Göttingen) für nützliche Diskussionen zu Dank verpflichtet.

Bisher erschienene Forschungsberichte der BAM

Nr. 1/September 1968

Forschung und Entwicklung in der Bundesanstalt für Materialprüfung (BAM)
Rechenschaftsbericht für den Bundesminister für Bildung und Wissenschaft

Nr. 2/Juli 1970 (vergriffen)

Zum Problem des Feuchtigkeitsschutzes von Dehnungsmeßstreifen und Halbleitergebern
von Dr.-Ing. Götz Andreae

Nr. 3/September 1970 (vergriffen)

Über das mechanische Verhalten von Aluminium-Stahl-Freileitungsseilen als Beispiel für Verbundbauteile
von Dr.-Ing. Josef Ziebs

Nr. 4/Dezember 1970 (vergriffen)

Formbeständigkeit von Holz gegenüber Feuchtigkeit — Grundlagen und Vergütungsverfahren
von Dr. rer. nat. Arno Burmester

Nr. 5/März 1971

Die Bedeutung der Netzstellenart und der Netzwerkendichte für die Beschreibung der elastischen Eigenschaften und des Abbaus von elastomeren Netzwerken
von Dr. rer. nat. Norbert Steiner

Nr. 6/April 1971

Zur Problematik der Prüfung und Beurteilung des Luftschallschutzes von Bauelementen bei unterschiedlichen Einbaubedingungen
von Prof. Dr.-Ing. Paul Schneider

Nr. 7/Juli 1971

Chromatographie und chemische Konstitution — Untersuchungen über den Einfluß der Struktur organischer Verbindungen auf das Verhalten bei der Dünnschicht-Chromatographie
von Dr.-Ing. Hans-Joachim Petrowitz

Nr. 8/November 1971

Zum Spannungs-Dehnungs-Verhalten von Baustählen bei Wechselbeanspruchung
von Dr.-Ing. Helmut Veith

Nr. 9/November 1971

Untersuchung über die sichernde Wirkung poröser Massen in Acetylenflaschen
von Dr.-Ing. Karl-Heinz Möller

Nr. 10/Januar 1972

Untersuchungen über die Korngrößenbestimmung mit Ultraschall zur Entwicklung einer für die Praxis geeigneten zerstörungsfreien Meßmethode
von Dr.-Ing. Dietmar Aurich und Prof. Dr. phil. Erich Martin

Nr. 11/Februar 1972

Beitrag zur Kenntnis der Schnittriefenbildung und Schnittgütwerte beim Brennschneiden
von Dr.-Ing. Hans-Joachim Krause

Nr. 12/Mai 1972

Über Veränderungen von Nylon-6-Fasern beim Texturieren
von Dir. u. Prof. Dr. rer. nat. Hubert Feuerberg

Nr. 13/Juni 1972

Festkörpergleitreibung und Verschleiß von Eisen, Kobalt, Kupfer, Silber, Magnesium und Aluminium in einem Sauerstoff-Stickstoff-Gemisch zwischen 760 und $2 \cdot 10^{-7}$ Torr
von Dr.-Ing. Karl-Heinz Habig (Berichter), Prof. Dr.-Ing. Kurt Kirschke, Dr.-Ing. Wolfgang-Werner Maennig und Dipl.-Phys. Harald Tischer

Nr. 14/Juli 1972

Untersuchungen zur Amplitudenabhängigkeit der Ultraschalldämpfung in Metallen bei 20 kHz
von Eberhard Fischer

Nr. 15/August 1972

Studie und Probleme der chemischen Edelmetall-Analyse
von Dir. u. Prof. Dr.-Ing. Heinz Pohl

Nr. 16/August 1972

Über Ausführung und Aussagefähigkeit des Normbrandversuches nach DIN 4102, Blatt 2, im Hinblick auf die Nachbildung natürlicher Schadensfeuer
von Dr.-Ing. Erwin Knublauch

Nr. 17/August 1972

Aktivierungsanalyse mit schnellen Neutronen, Photonen und geladenen Teilchen
von Dr.-Ing. Peter Reimers

Nr. 18/Januar 1973

Das Spröbruchverhalten des Baustahles R St 37-2 N in geschweißten Konstruktionen, dargestellt mit Hilfe der Methode des Temperaturvergleiches
von Dr.-Ing. Werner Struck

Nr. 19/Januar 1973

Die Bestimmung von Grenzflächentemperaturen bei tribologischen Vorgängen
Literaturrecherche von Dipl.-Phys. K. Kaffanke und Dr.-Ing. H. Czichos

Nr. 20/April 1973

Brandrisiko elektrischer Leitungen und Installationen in Wänden
von Dipl.-Ing. R. Rudolphi

Nr. 21/Juli 1973

Die kontinuumsmechanische Erfassung des zeitlichen Ablaufs der elastisch-plastischen Dehnungen bei der Zerrüttung
Literaturrecherche von Dipl.-Phys. D. Klaffke und Dr.-Ing. W. Maennig

Nr. 22/Juli 1973

Untersuchungen für ein Prüfverfahren zur Bemessung der Brandschutzbekleidung von Stahlstützen
von Dipl.-Ing. R. Rudolphi und Dr.-Ing. E. Knublauch

Nr. 23/November 1973

Reichs- und preußische Landesanstalten in Berlin

Ihre Entstehung und Entwicklung als außeruniversitäre Forschungsanstalten und Beratungsorgane der politischen Instanzen
von Prof. Dr. rer. nat. habil. Walter Ruske

Nr. 24/November 1973

Das Brandverhalten von Holzstützen unter Druckbeanspruchung

von Dipl.-Ing. J. Stanke, Ing. grad. E. Klement und Dipl.-Ing. R. Rudolphi

Nr. 25/Dezember 1973

Über das Brandgeschehen vor der Fassade eines brennenden Gebäudes unter besonderer Berücksichtigung der Feuerbeanspruchung von Außenstützen

von Dr.-Ing. E. Knublauch

Nr. 26/August 1974

Der Elektronen-Linearbeschleuniger der BAM — Eigenschaften und erste Anwendungen —

von Dipl.-Ing. P. Jost, Dr.-Ing. P. Reimers und Dr.-Ing. P. Weise

Nr. 27/August 1974

Untersuchungen zum Schallfeld von Winkelprüfköpfen für die Materialprüfung mit Ultraschall

von Dr.-Ing. Hermann Wüstenberg

Nr. 28/August 1974

Zum Ablauf von Gasexplosionen in mit Rohrleitungen verbundenen Behältern

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

Nr. 29/August 1974

Theorie der dissipativen Luftschalldämmung bei einem idealisotropen porösen Material mit starrem Skelett für senkrechten, schrägen und allseitigen Schalleinfall

von Prof. Dr.-Ing. P. Schneider

Nr. 30/September 1974 (vergriffen)

The Application of Systems Thinking and Systems Analysis to Tribology

von Dr. Horst Czichos und Dr. Geert Salomon

Nr. 31/August 1975

Untersuchungen zur Klärung des Verhaltens thermoplastischer Kunststoffe bei Wechseldehnungsbeanspruchung

von Dr.-Ing. Gerhard Fuhrmann

Nr. 32/September 1975

Ein thermo-elektrisches Netzwerkverfahren zur Berechnung stationärer Temperatur- und Wärmestromverteilungen mit Anwendungsbeispielen

von Dipl.-Ing. Reinald Rudolphi und Dr.-Ing. Bernhard Böttcher

Nr. 33/November 1975

Die Bestimmung der Temperaturleitfähigkeit von Baustoffen mit Hilfe eines nichtstationären Meßverfahrens

von Dipl.-Ing. Armin Wagner, Dipl.-Phys. Gerhard Kieper und Dipl.-Ing. Reinald Rudolphi

Nr. 34/Januar 1976 (vergriffen)

Untersuchungen zur Vergütung von Holzwerkstoffen

von Dipl.-Forsting. Dr. rer. sylv. Hans-Joachim Deppe

Nr. 35/Januar 1976

Der Widerstand von Platten, die als Beplankungsmaterial leichter Wände verwendet werden, gegenüber dem Aufprall harter Körper — Vorschlag für ein Prüfverfahren —

von Dipl.-Ing. Ernst Limberger

Nr. 36/Januar 1976 (vergriffen)

Wärme- und Feuchtigkeitsleitung in Beton unter Einwirkung eines Temperaturgefälles

von Dipl.-Ing. Jürgen Hundt

Nr. 37/Februar 1976

Die stoßartige Beanspruchung leichter, nichttragender Bauteile durch einen mit der Schulter gegenprallenden Menschen — Vorschlag für ein Prüfverfahren —

von Dr.-Ing. Werner Struck

Nr. 38/Juni 1976

Verschleißuntersuchungen an gas-, bad- und ionitriertem Stahl 42 CrMo 4

von Dr.-Ing. Karl-Heinz Habig

Nr. 39/Juni 1976

Untersuchung der viskoelastischen Eigenschaften von Flüssigkeiten (mit nicht-Newtonschem Fließverhalten) insbesondere bei höherer Scherbeanspruchung

von Prof. Dr.-Ing. K. Kirschke und Dipl.-Phys. G. Kempf

Nr. 40/Juni 1976

Zum Untergrundabzug bei energiedispersiven Spektren nach verschiedenen Verfahren

von Dr. rer. nat. H. Hantsche

Nr. 41/Okttober 1976

Optische Eigenschaften cholesterinischer Flüssigkeiten

von Dr. rer. nat. Bernhard Böttcher

Nr. 42/Okttober 1976

Ermittlung der Mindestzündenergie brennbarer Gase in Mischung mit Luft

von Dr.-Ing. Siegmund Dietlen

Nr. 43/Okttober 1976

Das Sprödbruchverhalten geschweißter Bauteile aus Stahl mit zäh-sprödem Übergang im Bruchverhalten, dargestellt mit Hilfe der Methode des Temperaturvergleiches

von Dr.-Ing. Werner Struck

Nr. 44/November 1976

Berechnung von räumlichen, linear elastischen Systemen, die aus finiten Stab- und Balkenelementen zusammengesetzt sind, unter Verwendung des Programms „Stab-Werk“

von Dipl.-Ing. W. Matthees

Nr. 45/Dezember 1976

Untersuchung des Elektrodenverhaltens im Vakuum aufgedampfter Metallschichten
von Dr.-Ing. W.-Paatsch

Nr. 46/Mai 1977 (vergriffen)

Versuchsergebnisse zur Festigkeit und Verformung von Beton bei mehraxialer Druckbeanspruchung
Results of Test Concerning Strength and Strain of Concrete Subjected to Multiaxial Compressive Stresses
von Dipl.-Ing. Gerald Schickert und Dipl.-Ing. Helmut Winkler

Nr. 47/Juni 1977

Bautechnische Einflüsse auf die Tragfähigkeit von Kunststoffdübeln für Fassadenbekleidungen
von Dr.-Ing. Arno Plank

Nr. 48/Okttober 1977

Setzung von Fundamenten infolge dynamischer Last, angewendet auf die Fundamente einer geplanten Schnellbahn
von Dr.-Ing. U. Holzlöhner

Nr. 49/Dezember 1977

Untersuchungen zur Anwendung von Mikrowellen in der zerstörungsfreien Prüfung
von Dr.-Ing. Günther Wittig

Nr. 50/Juni 1978 (vergriffen)

Zur Meßtechnik für die Sicherheitsbeurteilung und -überwachung von Spannbeton-Reaktordruckbehältern
von Prof. Dipl.-Phys. Norbert Czaika, Dipl.-Phys. Norbert Mayer, Dipl.-Ing. Claus Amberg, Dipl.-Ing. Götz Magiera, Dr.-Ing. Götz Andrae und Dipl.-Ing. Winfried Markowski

Nr. 51/Juni 1978

Auswirkung von chemischen und physikalisch-technologischen Einflußfaktoren auf das Beständigkeitsverhalten von Oberflächenbeschichtungen auf der Basis von Reaktionsbeschichtungsstoffen
von Dr. rer. nat. J. Sickfeld

Nr. 52/August 1978

Zum Einfluß der Gleitgeschwindigkeit auf das tribologische Verhalten von Werkstoffen hoher Härte bei reiner Festkörperreibung
von Dr.-Ing. Aleksandar Tomov

Nr. 53/Okttober 1978

Bemessung und Optimierung beheizbarer Straßen- und Brückenbeläge
von Rolf Günter Rohrmann und Reinald Rudolphi

Nr. 54/Okttober 1978

Magnetisches Verhalten dünner Eisenschichten bei mechanischer Wechselbeanspruchung
von Dr.-Ing. Harro Sander

Nr. 55/November 1978

Beobachtung und Orientierungsbestimmung der Oberflächenkristallite polykristalliner 99,999 %-Al-Proben bei Biegewechselbeanspruchung
von Dr.-Ing. Dieter Klaffke

Nr. 56/Januar 1979

Stabilität von Sandwichbauteilen
von Dipl.-Ing. W. Brünner und Prof. Dr.-Ing. C. Langli

Nr. 57/März 1979

Untersuchungen an Prüfmitteln für die Magnetpulverprüfung
Investigations on Inspection-Media for Magnetic-Particle-Testing
von Dipl.-Ing. Meinhard Stadthaus

Nr. 58/März 1979

Ermittlung des Bauteilwiderstandes aus Versuchsergebnissen bei vereinbartem Sicherheitsniveau
von Dr.-Ing. Werner Struck

Nr. 59/Juli 1979

Ermittlung der Verformungen biegebeanspruchter Stahlbetonbalken mit der Methode der Finiten Elemente unter besonderer Berücksichtigung des Verbundes zwischen Beton und Stahl
von Dr.-Ing. Günther Plauk

Nr. 60/August 1979

Untersuchungen zur Erfassung der Kaltformbarkeit von Feinblechen beim Strecken
von Dr.-Ing. H. Spreckelmeyer, Dr.-Ing. R. Helms und Dr.-Ing. J. Ziebs

Nr. 61/Dezember 1979

Beschreibung von Problemen der höheren Farbmeterik mit Hilfe des Gegenfarbensystems
von Dr. Klaus Richter

Nr. 62/Dezember 1979

Geomagnetobiologisch bedingter Zusammenhang zwischen der Fraßaktivität von Termiten und der Zahl der Sterbefälle
von Dir. u. Prof. Dr.-Ing. Wolfgang Gerisch und Prof. Dr. habil. Dr. h. c. Günther Becker

Nr. 63/Dezember 1979

Untersuchungen an Stopfbuchsen von Ventilen und Schiebern für Gase
von Dipl.-Ing. E. Behrend und Dipl.-Ing. J. Ludwig

Nr. 64/Februar 1980

Ermittlung der Schwingungserregung beim Betrieb schienengebundener Fahrzeuge in Tunneln sowie Untersuchung des Einflusses einzelner Parameter auf die Ausbreitung von Erschütterungen im Tunnel und dessen Umgebung
von Dr.-Ing. Werner Rucker

Nr. 65/Februar 1980

Untersuchungen über den Einfluß des Spannungszustandes auf bruchmechanische Kennwerte
von Dr.-Ing. Peter Schmidt, Dr.-Ing. Dietmar Aurich, Dr.-Ing. Rolf Helms, Dr.-Ing. Helmut Veith und Dr.-Ing. Josef Ziebs

Nr. 66/Mai 1980

Auswirkung von Druckentlastungsvorgängen auf die Umgebung
von Dr. rer. nat. Martin Hattwig

