

Forschungsbericht 118

Projekt Nr. 605
der Bundesanstalt für Arbeitsschutz
Dortmund

Bundesanstalt für
Materialprüfung (BAM)
Berlin

Brand- und Explosionsgefahren explosions- gefährlicher Stoffe bei Herstellung und Lagerung

Modellversuche mit pyrotechnischen Sätzen und Gegenständen

von Dr. rer. nat. Hartwig Treumann
Dipl.-Ing. Hilmar Andre
Dr. rer. nat. Eduard Blossfeld
Dr. rer. nat. Norbert Pfeil
Ing. grad. Matthias-Michael Zindler

175 Seiten, 116 Abbildungen, 39 Tabellen

Das Forschungsvorhaben „Brand- und Explosionsgefahren explosionsgefährlicher Stoffe bei Herstellung und Lagerung — Modellversuche mit pyrotechnischen Sätzen und Gegenständen“ wurde von der Bundesanstalt für Arbeitsschutz (BAU), Dortmund unter der Projekt-Nr. 605 finanziell gefördert. Der vorliegende Abschlußbericht wurde der Bundesanstalt für Materialprüfung zur Veröffentlichung als Forschungsbericht der BAM zur Verfügung gestellt.

Herausgegeben von der
Bundesanstalt für Materialprüfung (BAM)
Unter den Eichen 87, 1000 Berlin 45
Telefon (030) 8104-1 Telex 183 261 bamb d Telefax (030) 8 112 029

Copyright © 1985 by Wirtschaftsverlag NW
Verlag für neue Wissenschaft GmbH, Bremerhaven

Verlag und Vertrieb:
Wirtschaftsverlag NW
Verlag für neue Wissenschaft GmbH
Postfach 10 11 10, 2850 Bremerhaven 1
Telefon (0471) 46093-95

Kurzfassung

Die Wirkung von Schwarzpulver und anderen pyrotechnischen Sätzen sowie pyrotechnischer Munition bei Brand- und Explosionsversuchen in einem Reihengebäude in Ausblasebauart wurde in unterschiedlicher Anordnung dieser Stoffe und mit verschiedenen Ausblasewänden untersucht. Die Explosionsparameter Druck, Wärmestrahlung und Flammenausbreitung geben Auskunft über die Gefährdung der Umgebung und benachbarter Räume.

Entsprechende Versuche wurden in einem kleinen Stahlmodell (1 m³) durchgeführt, wobei die Untersuchung von Einflußgrößen und besonderen Phänomenen der Druckentlastung im Vordergrund stand. Weitere Versuche unter anderen Bedingungen waren z. B. Freifeldmessungen zur Ermittlung von Druckausbreitungsfunktionen. Die Übertragbarkeit der Ergebnisse wurde diskutiert und sofern möglich mathematisch formuliert.

Für die quantitative Unterscheidung der Lagergruppen 1.3 und 1.4 der Zweiten Verordnung zum Sprengstoffgesetz wurde ein Wärmestrahlungsmeßsystem entwickelt und erprobt, das den vielfältigen Reaktionsmöglichkeiten verpackter pyrotechnischer Gegenstände gerecht wird und daher allgemein verwendbar ist.

Abstract

In this paper the effects of black powder and other pyrotechnic compositions as well as pyrotechnic ammunition on a row building in venting construction are investigated by means of burning and explosion tests employing varying arrangements of the substances as well as different types of blowout walls. The explosion parameters pressure, thermal radiation, and size of flames show the degree of hazard for the surroundings as well as for the neighbouring rooms.

Analogous tests were carried out in a 1 m³ steel box model focussing on the investigation of parameters and specific phenomena of pressure venting. Further test series under varying conditions were e. g. free-field measurements to determine the pressure at scaled distances. The applicability of the results is discussed and, where possible, formulated mathematically.

For the quantitative distinction of the storage groups 1.3 and 1.4 of the Second Regulation to the Explosives Act a measuring system for thermal radiation was developed and tested, which is suitable for all possible reactions of packed pyrotechnic articles and is thus universally applicable.

Brand- und Explosionsversuche — pyrotechnische Sätze und Mittel — Schwarzpulver — Reihengebäude — Ausblasebauart — Druckentlastung — Druckausbreitungsfunktion — Wärmestrahlung — Flammenausbreitung — Lagergruppenzuordnung — Wärmestrahlungsmeßsystem

Inhaltsverzeichnis

Seite

	Begründung	1
Teil I.	Versuche in einem Modellgebäude	5
1.	Einleitung	5
2.	Allgemeiner Versuchsaufbau	7
2.1	Modellgebäude	7
2.2	Meßmethoden	9
3.	Versuchsergebnisse	13
3.1	Versuche mit Schwarzpulver	13
3.1.1	Raum mit schwerer Dachausführung	14
3.1.1.1	Offener Raum	14
3.1.1.2	Ausblasewände aus Holz	22
3.1.1.3	Ausblasewände aus Kunststoffolie	27
3.1.1.4	Schwarzpulver auf Horden	29
3.1.1.5	Schwingungsmessungen am Gebäude	34
3.1.2	Raum mit leichter Dachausführung	36
3.1.2.1	Offener Raum	37
3.1.2.2	Ausblasewände aus Holz	39
3.1.2.3	Ausblasewände aus Kunststoffolie	41
3.1.3	Diskussion	41
3.2	Versuche mit pyrotechnischen Sätzen	46
3.2.1	Versuche mit Feuerwerkssternen	46
3.2.1.1	Materialien und Versuchsaufbau	46
3.2.1.2	Meßwerte	48
3.2.2	Versuche mit Leuchtsätzen	52
3.2.2.1	Materialien und Versuchsaufbau	52
3.2.2.2	Meßwerte	52
3.2.3	Diskussion	54
3.3	Versuche mit pyrotechnischen Mitteln	57
3.3.1	Materialien und Versuchsaufbau	58
3.3.2	Meßwerte	61
3.3.3	Diskussion	63
4.	Zusammenfassung	64
Teil II.	Versuche in einem kleinen Stahlmodell	65
1.	Einleitung	65
2.	Allgemeiner Versuchsaufbau	67
2.1	1-m ³ -Stahlkasten	67
2.2	Meßmethoden	68
3.	Versuchsergebnisse	69
3.1	Versuche mit Schwarzpulver	69
3.1.1	Verschiedene Öffnungen	69
3.1.2	Ausblasewände aus Holz	75
3.1.3	Ausblasewände aus Kunststoffolie	79
3.1.4	Versuche zur Erklärung der verschiedenen Druckmaxima	82
3.1.4.1	Zündung von oben	82
3.1.4.2	Schwarzpulveraufwirbelung	84

3.1.4.3	Unterdrückung des Hauptmaximums	86
3.1.5	Diskussion	88
3.2	Versuche mit pyrotechnischen Sätzen	91
3.2.1	Versuche mit Zündschnurpulver	91
3.2.2	Versuche mit Feuerwerkssternen	93
3.2.3	Versuche mit Knallsätzen	95
3.2.4	Diskussion	97
4.	Zusammenfassung	98
Teil III. Versuche zur Klärung spezieller Fragen		99
1.	Einleitung	99
2.	Versuche in einem 6-l-Stahlrohr	99
2.1	Versuchsaufbau und Meßmethoden	99
2.2	Versuchsergebnisse	100
2.2.1	Versuche mit Schwarzpulver	100
2.2.2	Versuche mit pyrotechnischen Sätzen	101
2.2.3	Versuche mit Kunststoffolien für leichte Ausblasewände	102
2.3	Diskussion	105
3.	Freifeldversuche	105
3.1	Ermittlung von Ausbreitungsparametern	106
3.1.1	Versuchsaufbau und Meßmethoden	106
3.1.2	Versuchsergebnisse	106
3.2	Messung des Druckverlaufes im Schwarzpulver	112
3.2.1	Versuchsaufbau und Meßmethoden	112
3.2.2	Versuchsergebnisse	112
3.3	Diskussion	117
4.	Zusammenfassung	120
Teil IV. Messung der Wärmestrahlung bei Brandversuchen für die Lagergruppenzuordnung		121
0	Aufgabenstellung	121
1.	Einleitung	121
2.	Die verschiedenen Lagergruppen	122
2.1	Explosivstoffe und ihre Lagergruppen	122
2.2	Sonstige explosionsgefährliche Stoffe und ihre Lagergruppen	123
2.3	Versuche zur Ermittlung von Lagergruppen	123
2.4	Zuordnung zu den Lagergruppen	124
3.	Experimenteller Teil	125
3.1	Meßgeräte	125
3.1.1	Thermoelektrischer Detektor	126
3.1.2	Pyroelektrischer Detektor	126
3.1.3	Registrierung und Auswertung	128

3.2	Durchführung von Brandversuchen	130
3.3	Ergebnisse der Brandversuche	133
3.4	Kalibrierung der Detektoren	134
3.5	Geplante weitere Arbeiten	135
4.	Zusammenfassung	136
Teil V. Vergleichende Betrachtungen		147
1.	Einleitung	147
2.	Deflagration unter Eigenverdämmung	147
3.	Deflagration im aufgewirbelten Zustand	150
4.	Deflagration in Räumen mit Ausblasewänden	155
5.	Mengenabhängiges Verhalten und Stoffeigenschaften	160
6.	Auswirkungen auf die Umgebung	163
7.	Zusammenfassung	168
	Schlußbetrachtung und Ausblick	169
	Literaturverzeichnis	172

Begründung

H. Treumann

Am 1. Juli 1978 trat die Zweite Verordnung zum Sprengstoffgesetz [1] in Kraft und ersetzte eine Reihe von Landesverordnungen über die Lagerung von Sprengstoffen. Diese Verordnung unterscheidet vier Lagergruppen 1.1 bis 1.4 für Explosivstoffe und Gegenstände mit Explosivstoffen und neben den Lagergruppen 1.1 bis 1.3 zusätzlich drei Lagergruppen I bis III für sonstige explosionsgefährliche Stoffe, die nicht Explosivstoffe im eigentlichen Sinne sind. Zu den Explosivstoffen gehören z. B. Sprengstoffe, Treibstoffe, Zündstoffe und pyrotechnische Sätze, zu den Gegenständen gehören Zündmittel und pyrotechnische Gegenstände. Maßgebend für die Zuordnung von diesen Stoffen und Gegenständen zu Lagergruppen sind die Zweckbestimmung und das Verhalten im Brand- oder Explosionsfall.

Die wesentlichen Gefahrenmerkmale der einzelnen Lagergruppen sind: Massenexplosion (1.1), Sprengstücke (1.2), Massenfeuer (1.3), Auswirkungen weitgehend auf die Packung beschränkt (1.4) und Abbrand abgestufter Intensität (I, II, III). Für die Zuordnung von Stoffen und Gegenständen zu den Lagergruppen ist die Bundesanstalt für Materialprüfung (BAM) zuständig bzw., soweit die Stoffe und Gegenstände für eine ausschließlich militärische Verwendung bestimmt sind, das Bundesinstitut für chemisch-technische Untersuchungen beim Bundesamt für Wehrtechnik und Beschaffung (BICT).

Die Richtlinie für das Zuordnen explosionsgefährlicher Stoffe zu Lagergruppen (SprengLR 010, Ausgabe April 1978) [2] beschreibt die Prüfungen, aufgrund deren Ergebnisse die Lagergruppe eines Stoffes oder Gegenstandes in seiner jeweiligen Verpackung ermittelt wird. Diese Prüfmethodik sollte ursprünglich - nach einem Vorschlag des Verbandes der chemischen Industrie an den Bundesminister für Arbeit und Sozialordnung (BMA) - im Rahmen eines Forschungsauftrages von der BAM erarbeitet werden. Als 1977 der Projektantrag in der dem Forschungsvorhaben zugrundeliegenden Fassung erstellt war, wurde die SprengLR 010 bereits abschließend bearbeitet; d.h., daß die Zielsetzung des Vorhabens eine nun festgelegte Prüfmethodik berücksichtigen mußte. Statt "Entwicklung" ei-

ner Prüfmethdik entsprechend dem Titel des Vorhabens "Übertragungsversuche und Prüfmethden für die Einteilung von explosionsgefährlichen Stoffen in Lagergruppen nach der Sprengstofflagerverordnung" konnte es nur noch "Überprüfung" oder "Vereinfachung" einer Prüfmethdik heißen, welche - wegen der erforderlichen großen Stoffmengen und des hohen Arbeitsaufwandes - dem Antragsteller erhebliche Kosten verursachen mußte.

Große Stoffmengen sind immer dann notwendig, wenn aus dem Verhalten einer kleinen Stoffmenge kein sicherer Schluß auf das Verhalten größerer Mengen gezogen werden kann. Aus diesem Grunde sah der Projektantrag auch vergleichende Untersuchungen in verschiedenen Maßstäben vor, und zwar nicht unbedingt auf die Lagerung verpackter Stoffe und Gegenstände bezogen, sondern sowohl den Bedingungen der Praxis entsprechend als auch aus aktuellem Anlaß auf lose pyrotechnische Sätze in Gebäuden in sogenannter Ausblasebauweise, wodurch die Ergebnisse anderer Forschungsvorhaben besser für das vorliegende Vorhaben genutzt werden konnten.

Der Auftrag zur Durchführung des Forschungsvorhabens wurde 1979 erteilt. In der Zwischenzeit hatte die BAM nicht nur den größten Teil der bereits zugelassenen Stoffe und Gegenstände den Lagergruppen zugeordnet und diese im Bundesanzeiger bekanntgemacht, sondern sie hatte auf Anraten des BMA auch einen überarbeiteten Projektantrag vorgelegt, der diese Entwicklung berücksichtigte. Letzteres gilt auch für den Verlängerungsantrag, dessen Begründung den Umstand in den Vordergrund stellte, daß das Verhalten und die Wirkung großer Mengen nichtdetonierender Stoffe und Gegenstände noch weitgehend unbekannt ist, während die Wirkung von Detonationen unter den unterschiedlichsten Bedingungen schon grundlegend untersucht ist.

Zu den nichtdetonierenden Explosivstoffen gehört der größte Teil der pyrotechnischen Sätze, welche dann entweder deflagrieren oder abbrennen. Deshalb stellt sich für viele pyrotechnische Gegenstände die Frage der Lagergruppenzuordnung bereits eingengt auf die Entscheidung zwischen den Lagergruppen 1.3 und 1.4. Diese Entscheidung könnte auf ähnliche Weise getroffen werden, wie es neuerdings die Richtlinie für

das Zuordnen sonstiger explosionsgefährlicher Stoffe zu Lagergruppen (SprengLR 011, Ausgabe Mai 1981) [3] für die Lagergruppen 1.3, I, II und III vorsieht. Die meßtechnischen Voraussetzungen dafür zu schaffen, wurde erst zuletzt durch eine Mittelaufstockung ermöglicht.

Die hier kurz umrissenen, verschiedenen Arbeitsgebiete des Vorhabens machen eine klare Gliederung des vorliegenden Berichtes erforderlich:

- Teil I : Versuche in einem Modellgebäude.
- Teil II : Versuche in einem kleinen Stahlmodell.
- Teil III: Versuche zur Klärung spezieller Fragen.
- Teil IV : Messung der Wärmestrahlung bei Brandversuchen für die Lagergruppenzuordnung.
- Teil V : Vergleichende Betrachtungen.

Der inhaltlichen Änderung des Forschungsvorhabens mußte auch der Titel des Vorhabens Rechnung tragen, der nunmehr "Brand- und Explosionsgefahren explosionsgefährlicher Stoffe bei Herstellung und Lagerung - Modellversuche mit pyrotechnischen Sätzen und Gegenständen" lautet. An dieser Stelle sei darauf hingewiesen, daß pyrotechnische Gegenstände nicht nur Feuerwerkskörper im herkömmlichen Sinne sind, sondern nach ihrer Legaldefinition [4] Gegenstände, die Vergnügungs- oder technischen Zwecken dienen und in denen explosionsgefährliche Stoffe oder Stoffgemische (pyrotechnische Sätze) enthalten sind, die dazu bestimmt sind, unter Ausnutzung der in diesen enthaltenen Energie Licht-, Schall-, Rauch-, Nebel-, Heiz-, Druck- oder Bewegungswirkungen zu erzeugen. Daß im internationalen Sprachgebrauch der Begriff "Pyrotechnische Gegenstände" noch umfassender ist, sei nur erwähnt. Gerade die Vielfalt der möglichen Effekte pyrotechnischer Gegenstände und der damit verbundenen Spanne der Eigenschaften pyrotechnischer Sätze stellt ein sicherheitstechnisches Problem nicht nur für Genehmigungs- und Aufsichtsbehörden sowie Unfallversicherer im gewerblichen Bereich dar, sondern auch für die pyrotechnische Industrie. Letztere benötigt genaue Kenntnisse der Risiken beim Umgang mit diesen explosionsgefährlichen Stoffen, da sie auf möglichst wirtschaftliche Weise den Schutz von Leben, Gesundheit oder Sachgütern be-

schäftigter oder Dritter zu gewährleisten hat. Mit dem Vorlegen dieses Forschungsberichtes ist die Hoffnung der Autoren verbunden, daß er für die genannten Institutionen und die Industrie einen nützlichen Schritt bei der Vertiefung ihrer Kenntnisse auf dem Gebiet des Umgangs mit einem Teil der explosionsgefährlichen Stoffe bedeuten möge.

Teil I. Versuche in einem Modellgebäude

H. Treumann und N. Pfeil

1. Einleitung

Nachdem 1975 der gesamte Inhalt des Trockenhauses einer deutschen pyrotechnischen Fabrik - etwa 800 kg verschiedener pyrotechnischer Sätze - explodierte, verabredeten die Berufsgenossenschaft der chemischen Industrie (BG Chemie), der Verband der Hersteller pyrotechnischer Gegenstände und die BAM ein Forschungsvorhaben, dessen Ziel die Untersuchung der Widerstandsfähigkeit von Gebäuden, wie sie in der pyrotechnischen Industrie üblich sind, sein sollte.

In der pyrotechnischen Industrie sind Fabrikationsgebäude im allgemeinen in einer der beiden Ausblasebauarten errichtet, die in den berufsgenossenschaftlichen Unfallverhütungsvorschriften vorgeschrieben sind [5]. Gebäude in Ausblasebauart und leichter Dachausführung bestehen aus Räumen mit ein oder zwei Ausblasewänden und einem nach der beabsichtigten Ausblaseseite zu geneigten Ausblasedach. Die übrigen Wände müssen Widerstandswände sein. Bei der Ausblasebauart mit schwerer Dachausführung muß das Dach die gleiche Widerstandsfähigkeit wie die drei Widerstandswände besitzen und zur Ausblaseseite leicht ansteigen. Bild 1 zeigt Räume in beiden Bauweisen.

Diese Bauweisen ermöglichen Reihengebäude mit kleinen, abgetrennten Arbeitsbereichen, zwischen denen im Falle eines Unfalles eine Explosionsübertragung nicht möglich sein darf. Voraussetzung dafür ist, daß durch den Explosionsdruck die Widerstandsfähigkeit der Trennwände zwischen den Räumen nicht überschritten wird. Die zulässigen Mengen an explosionsgefährlichen Stoffen in einem solchen Raum lassen sich also nur angeben, wenn einerseits die Widerstandsfähigkeit der Trennwände bei mehr oder minder kurzfristiger Druckbelastung und wenn andererseits die zu erwartende Druckbelastung selbst bekannt ist.

Dieser Zusammenhang sollte in einem aus Mitteln der BG Chemie eigens für diesen Zweck auf dem Versuchsgelände der BAM

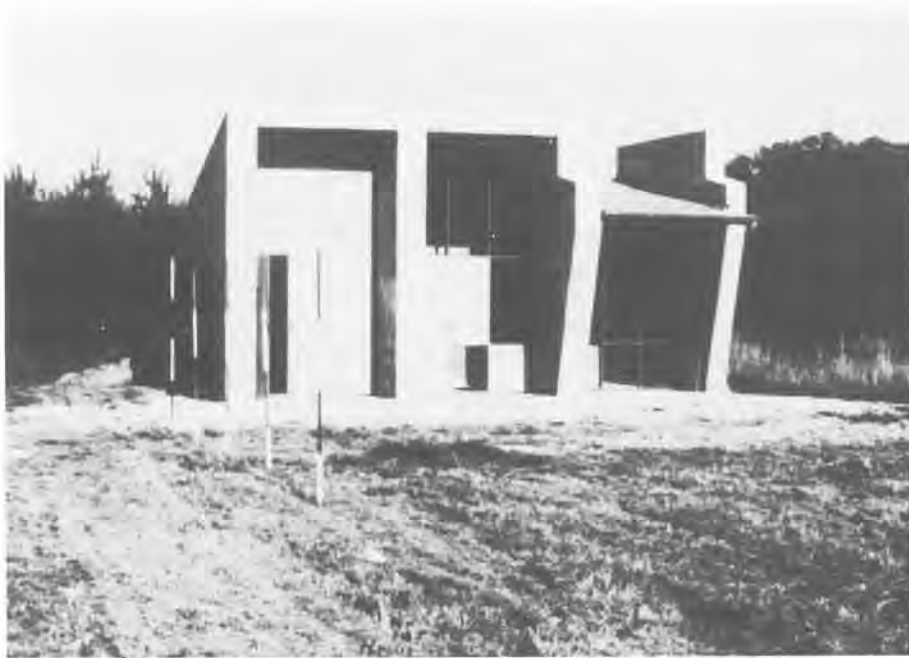


Bild 1

Modellgebäude in Ausblasebauart mit zwei Räumen mit schwerer und einem Raum mit leichter Dachausführung

in Lehre bei Braunschweig errichteten Modellgebäude (Bild 1) untersucht werden. Die Ergebnisse der Untersuchungen, die teilweise mit finanzieller Unterstützung der pyrotechnischen Industrie durchgeführt wurden, sind in zwei Forschungsberichten mitgeteilt worden [6,7] und konnten in der Zwischenzeit wiederholt als experimentelle Grundlage für Genehmigungsverfahren dienen. Im Rahmen des vorliegenden Forschungsvorhabens wurden die Versuchsreihen zu den o.g. Berichten erweitert, auf den Raum mit leichter Dachausführung übertragen und in vielfacher Hinsicht ergänzt. Um eine geschlossene Darstellung der z.Z. vorliegenden Ergebnisse zu erreichen, sind die Ergebnisse der alten Berichte [6,7] den neuen, im Rahmen des vorliegenden Vorhabens erhaltenen Ergebnissen unter Angabe der Quelle hinzugefügt. Dadurch ergeben sich für den Teil I dieses Berichtes in stofflicher Hinsicht drei Abschnitte, die sich mit

- Schwarzpulver in seiner Eigenschaft als pyrotechnischer Satz,
- anderen pyrotechnischen Sätzen und
- pyrotechnischen Mitteln (Gegenständen)

befassen.

2. Allgemeiner Versuchsaufbau

Hier werden die experimentellen Voraussetzungen beschrieben, die für alle Versuchsreihen gleich sind. Das sind zum einen die widerstandsfähigen Bauteile des Modellgebäudes und zum anderen die Meßmethoden, die allerdings nicht immer gleichzeitig eingesetzt wurden. Die Beschreibung der weiteren Materialien und der speziellen Versuchsaufbauten ist den Versuchsergebnissen zu den einzelnen Stoffgruppen direkt vorangestellt.

2.1 Modellgebäude

Die Ausblasebauart als Bauweise für Gebäude mit Explosionsgefahr versucht zwei Schutzziele auf konstruktive Weise zu verwirklichen.

Erstens sollen Ausblasewände und -dächer aus leichten Baustoffen im Falle eines unerwünschten Ereignisses im Inneren eines Raumes durch einen ansteigenden Innendruck möglichst leicht zerstört und Druckentlastungsflächen freigegeben werden. Damit soll der Druckaufbau im Raum so gering gehalten werden, daß die Belastbarkeit der Widerstandswände nicht überschritten wird. Die Druckentlastung ist besonders bei deflagrierenden Stoffen wirkungsvoll, da die Umsetzungsgeschwindigkeit dieser Stoffe mit steigendem Druck anwächst. Im Gegensatz dazu ist die Umsetzungsgeschwindigkeit der Detonation, bei der Stoßwellen auftreten, druckunabhängig.

Zweitens soll die Wirkung einer Explosion in einem Raum durch die Ausblaseflächen in bestimmte Richtungen gelenkt werden, in denen die Umgebung allerdings in einem höheren Maße gefährdet ist, als beispielsweise bei leichter Bauart eines Gebäudes. Zur Erreichung dieser Ziele haben sich, in der Einleitung wurde bereits darauf hingewiesen, in der Praxis zwei Ausblasebauarten durchgesetzt.

Die Ausblasebauart mit schwerer Dachausführung verursacht höhere Baukosten als die mit leichter Dachausführung, sie weist dafür - bei sonst gleicher Beschaffenheit der Wände - wegen der dreiseitigen Einspannung der Trennwände eine höhere Widerstandsfähigkeit auf.

Die Ausblasebauart mit leichter Dachausführung hat eine grundsätzlich größere Ausblasefläche und daraus resultierend eine weniger gerichtete Wirkung in Ausblaserichtung. Durch das zur Ausblasewand hin geneigte Dach ist ein besserer Wetterschutz des Eingangs gegeben.

Grundriß und Schnitte des hier für Versuche benutzten Modellgebäudes finden sich in Bild 2 (vgl. auch Bild 1). Die wesentlichen Maße sind in den Zeichnungen angegeben. Bei Versuchen ohne Ausblasewand, also im offenen Raum, reicht das relevante Volumen bei schwerer Dachausführung bis an die Vorderkante des Gebäudes und beträgt dann etwa 21 m^3 , die Fläche der Ausblasewand bzw. der Druckentlastungsfläche des offenen Raumes beträgt etwa 21 % bzw. 16 % der inneren Oberfläche (sechs Flächen). Die Ausblaseflächen des Raumes mit leichter Dachausführung teilen sich in jeweils etwa 12 % für die Ausblasewand und 12 % für das leichte Dach - zusammen also 24 % - auf, die Angabe von Druckentlastungsfläche und Volumen bei offener Vorderseite ist hier nicht ohne weiteres möglich, da das Dach weiterhin als zusätzliche, aber nicht gleich wirksame Entlastungsfläche fungiert.

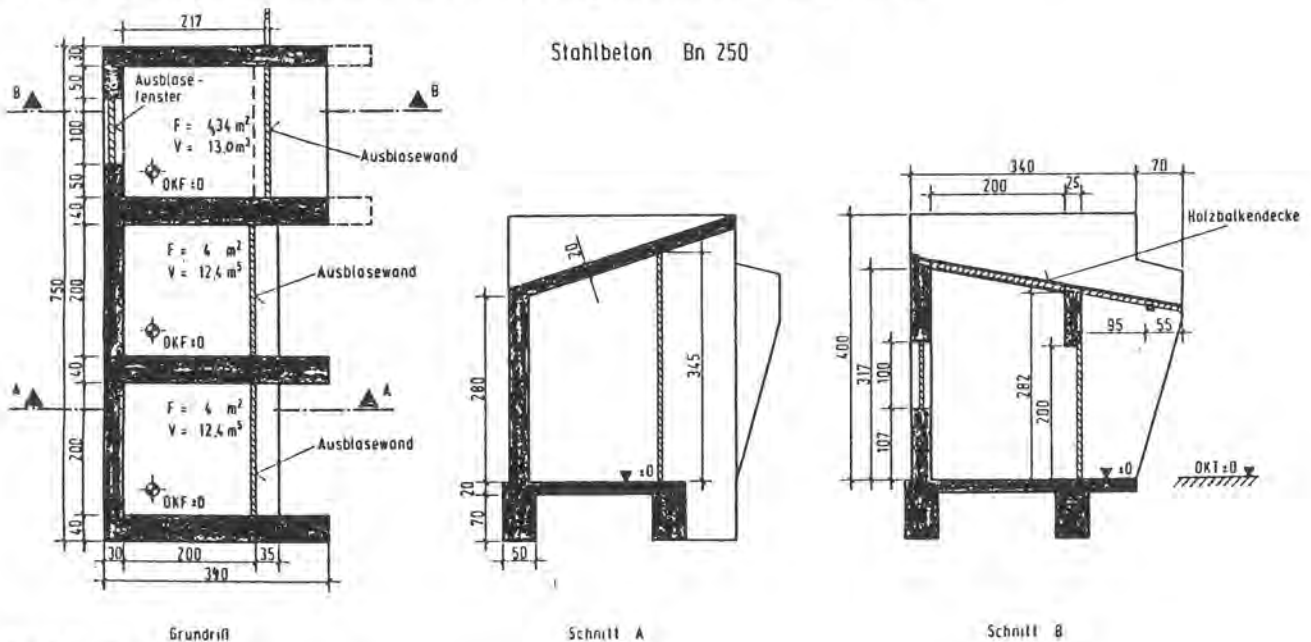


Bild 2

Modellgebäude in Ausblasebauweise

(Maße in cm)

Auf die Bewehrung der Widerstandselemente wird hier im einzelnen nicht eingegangen. Das schwächste Bauelement in den Räumen mit schwerer Dachausführung ist die Decke selbst, was wohl nach der UVV 46 a [8] zulässig war, die zur Zeit der

Errichtung des Modellgebäudes gegolten hatte, nicht aber mehr nach der neuen UVV 46 a [5], die 1978 erschienen war. Für diese Räume des Modellgebäudes und ähnlich ausgelegte Räume liegen verschiedene statische Berechnungen vor. Danach sollte die Bruchlast des schwächsten Bauteiles bei quasistatischer Belastung und gleichmäßiger Verteilung eines Innendruckes über die gesamte Fläche der Wände und Decke etwa 1,5 bar betragen. In [6] ist eine Abschätzung ausgeführt, die unter Annahme eines idealisierten Last-Zeit-Verlaufes für die Deflagration von Schwarzpulver in einem derartigen Raum die dynamische Belastbarkeit für verschiedene Plastifizierungsgrade, d.h. für verschiedene Schadenstufen, ermittelt [9]. So sollte die dynamische Belastbarkeit bei vollständiger Wiederverwendbarkeit aller Bauteile 1,4 bar bis 2,1 bar betragen, ein Bruch von Bauteilen ist bei Druckbelastungen von 2,8 bar bis 2,9 bar nicht auszuschließen [10].

Die Wände des Raumes mit leichter Dachausführung sind laut statischer Berechnung nicht für einen Innendruck bemessen, sondern sie wurden nach konstruktiven Gesichtspunkten bewehrt.

2.2 Meßmethoden

Der Druckverlauf im Raum wurde mit Quarzkristall-Druckaufnehmern Typ 601 und Ladungsverstärkern Typ 5001 (Kistler Instrumente GmbH) in Verbindung mit einem Transienten-Rekorder Explorer III mit 5,25"-Diskettenlaufwerk gemessen (Nicolet Instrument Corporation). Die Druckaufnehmer waren in Kunststoffadaptern montiert und zum Schutz vor Erwärmung der Membran während der Druckmessung mit 5 mm Silicon-Kautschuk (Bild 3) beschichtet. Die Druckaufnehmer wurden jeweils zusammen mit dem Ladungsverstärker in dem erwarteten Meßbereich kalibriert, nach einem in [11] beschriebenen Verfahren. Die Kunststoffadapter wurden in kleine Stahlkästen eingesetzt, die ihrerseits an den Seitenwänden und der Rückwand der Räume, jeweils unterhalb der Flächenmitte, in 1 m Höhe befestigt waren.

Da trotz der Verwendung von Kunststoffadaptern die Druck-Zeit-Kurven mitunter von hochfrequenten Schwingungen überlagert waren, wurden die gespeicherten Messungen dann entweder

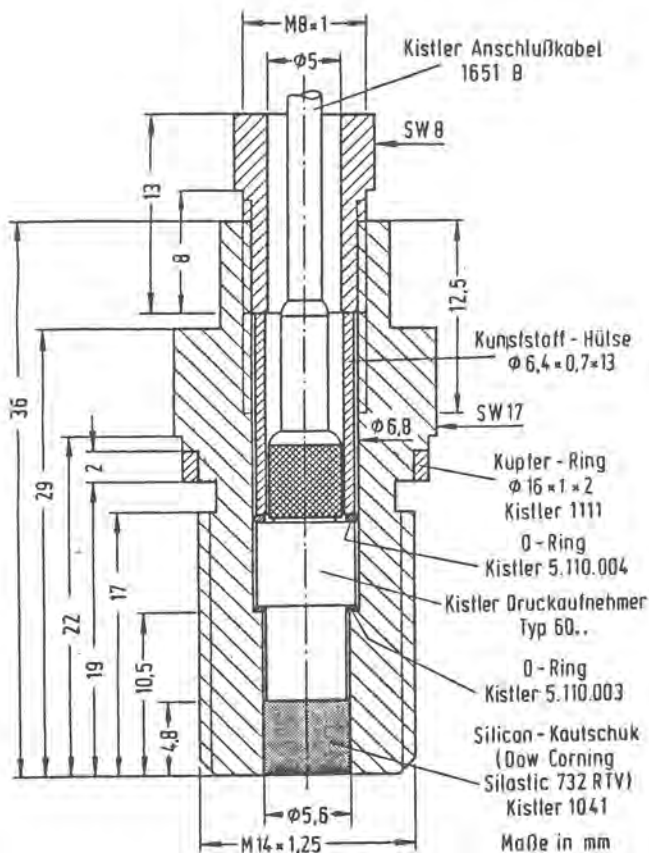


Bild 3

Druckaufnehmer mit Kunststoffadapter

nachträglich elektronisch gefiltert (Dual Hi/Lo Filter, Model 852, Rockland Systems Corporation) oder mittels Mikrocomputer geglättet (Commodore CBM 8096) oder blieben beim Ermitteln des Maximaldruckes unberücksichtigt. Alle angegebenen Drücke sind Überdrücke. Die Fläche unter der Druck-Zeit-Kurve $\int p dt$ - Druckimpuls genannt und dimensionsgleich mit Impuls pro Flächeneinheit - wurde z.T. als weiterer Parameter bestimmt, und zwar entweder mit Hilfe eines Bildauswertegerätes Digiplan (Kontron Meßgeräte GmbH) oder wiederum mittels Mikrocomputer. Auf die Darstellung des Druckimpulses $\int p dt$ wird in diesem Bericht verzichtet, da er erstens nur für sehr kurze Druckphasen eine wesentliche Größe für die Bauteilbelastung ist und zweitens prinzipiell die gleiche Mengenabhängigkeit zeigt wie der Maximaldruck, nur mit geringerer experimenteller Streuung. Das Bildauswertegerät wurde im übrigen auch zum Einlesen alter Messungen, die nur in Form von Diagrammen vorlagen, in den Mikrocomputer benutzt.

Druckmessungen in größeren Entfernungen außerhalb des Modellgebäudes konnten mit einem Präzisions-Impuls-Schallpegelmessgerät (Typ 2209, Brüel & Kjaer) und 1"- bzw. 1/4"-Mikrofonen durchgeführt werden.

Für Schwingungsmessungen am Modellgebäude standen Beschleunigungsaufnehmer (Typ 808 A, Kistler Instrumente GmbH) und Schwinggeschwindigkeitsaufnehmer (Typen B5 h und B5 z, Hottinger Baldwin Meßtechnik) in Verbindung mit den genannten Transientenrekordern zur Verfügung.

Für Temperaturmessungen bis 1250°C wurden Philips-Miniatur-Mantel-Thermoelemente (Typ 2 AB AT 5 T I; Chromel-Alumel) verwendet. Gemessen wurde gegen eine elektronische Vergleichsstelle (Typ VS 2.3.3.3, Bühler), welche die Thermospannung des Chromel-Alumel-Elementes bei 0°C liefert, und aufzeichnet mit einem Kompensationsschreiber Servogor (Typ RE 520, Metrawatt).

Die Wärmestrahlung (Bestrahlungsstärke) konnte mit einem pyroelektrischen Detektor (Rs-304-1, Laser-Precision Corp.) gemessen, auf einem Transienten-Rekorder (Quantalog 4100, Exatron) aufgezeichnet und wie oben angegeben integriert werden. Die Anstiegszeit dieses Detektors ist $\approx 150 \mu\text{s}$, die Empfindlichkeit mit einem 3 mm dicken CaF_2 -Fenster $42 \text{ V}/(\text{W}/\text{cm}^2)$, kalibriert gegen eine Moll'sche Thermosäule (Typ CAL, Kipp & Zonen). Das CaF_2 -Fenster ist durchlässig für Strahlung zwischen $0,13 \mu\text{m}$ und $9,8 \mu\text{m}$ Wellenlänge (Absorptionskanten, 50 % Transmission). Nakao und Mizushima [12] berechnen, daß 97 % bis 99,5 % der Wärmestrahlung eines schwarzen Strahlers mit Temperaturen von 1500 K bis 3000 K zwischen $0,2 \mu\text{m}$ und $10 \mu\text{m}$ ausgesendet werden und sehen somit ein CaF_2 -Fenster als geeignet für die Messung der Wärmestrahlung bei der Reaktion pyrotechnischer Sätze an. Der Detektor ist mikrofonisch, d.h. er reagiert auf Druckwellen, was bei ausreichender Entfernung vom Explosionsort wegen der unterschiedlichen Ausbreitungsgeschwindigkeiten von Licht und Schall nicht stört.

Die Flammenausbreitung in Druckentlastungsrichtung wurde durch eine seitlich stehende 8-mm-Kamera (Nizo S 480, 54 Bilder/s) oder 16-mm-Kamera (Bolex H 16, 64 Bilder/s) erfaßt. Zu diesem Zweck wurden zwischen Kamera und Versuchsgebäude Markierungsstäbe in 2 m bis 4 m Abstand aufgestellt. Die Genauigkeit der Auswertung wird trotz Einbeziehens der Parallaxe bestenfalls auf $\pm 0,5 \text{ m}$ geschätzt und ist bei der Angabe der Werte berücksichtigt.

Ferner standen zur Dokumentation der Versuche eine weitere 16-mm-Kamera (Bolex H 16 RX-matic, 64 Bilder/s) und eine Kleinbildkamera mit Motorantrieb (Nikon F 2 S Photonic, 5 Bilder/s) zur Verfügung.

3. Versuchsergebnisse

Der überwiegende Teil der vorliegenden Meßergebnisse ist an Schwarzpulver ermittelt worden. Zum einen, weil der klassische Explosivstoff Schwarzpulver als pyrotechnischer Satz bei der Herstellung pyrotechnischer Gegenstände von großer Bedeutung ist (pro Jahr werden in deutschen pyrotechnischen Fabriken etwa 500 t Schwarzpulver verarbeitet), zum anderen weil mit ihm der typische Vertreter deflagrierender Explosivstoffe in relativ gleichbleibender Qualität preiswert zu erwerben ist. Hinzu kommt, daß die anwendungstechnischen Eigenschaften dieses Stoffes allgemein bekannt sind und dergleichen die Risiken beim Umgang mit ihm.

So war es naheliegend, grundlegende Versuche zunächst mit Schwarzpulver durchzuführen und sie später auf andere Stoffe oder speziell pyrotechnische Sätze zu erweitern. Dergleichen wird auch bei zukünftigen Untersuchungen an anderen Stoffen das Schwarzpulver als Standard oder Bezugsstoff immer wieder eingesetzt werden.

3.1 Versuche mit Schwarzpulver

Sofern in den folgenden Unterabschnitten nichts anderes gesagt ist, sind die nachstehenden Versuchbedingungen eingehalten worden:

Das Schwarzpulver ist ein Feuerwerkspulver mit der Zusammensetzung 75 % Kaliumnitrat, 15 % Holzkohle und 10 % Schwefel, Korngröße 0,5 mm bis 1,2 mm und unpoliert (Dynamit Nobel AG). Es wird lose auf die Tischplatte (19 mm Preßspanplatte, meist quadratisch mit 61 cm bis 66 cm Kantenlänge) eines in der Raummitte stehenden, 80 cm hohen Stahlgestells geschüttet und bildet dabei einen Kegel mit etwa 33° Basiswinkel. In der Mitte unter dieser Schwarzpulverschüttung befindet sich eine Zündpille (Brückenzünder A mit Montage-Kunststoffhülse, Fr. Sobbe GmbH), die elektrisch ausgelöst wird. Durch diese Anordnung ist wegen der Eigenverdämmung die stärkste Druckwirkung des Schwarzpulvers ohne zusätzliche Verdämmung - d.h. Einschluß in eine mehr oder minder feste Umhüllung - gewährleistet.

Die im folgenden angegebenen Druckwerte verstehen sich als Mittelwerte aus gleichzeitigen Messungen mit Druckaufnehmern an den Seitenwänden und der Rückwand des jeweiligen Raumes (es liegen keine statistisch gesicherten Unterschiede zwischen den einzelnen Meßstellen vor) und aus den in einem Versuchszeitraum unter gleichen Bedingungen durchgeführten Versuchen mit Schwarzpulver einer Lieferung. Letzteres gilt auch für die Messung anderer Explosionsparameter.

3.1.1 Raum mit schwerer Dachausführung

Die UVV 46 k "Herstellen pyrotechnischer Gegenstände" [13] unterscheidet im allgemeinen bei der Festlegung von Höchstmengen an Schwarzpulver in Räumen nicht zwischen den zulässigen Bauarten und somit auch nicht zwischen den Ausblasebauarten mit schwerer und mit leichter Dachausführung. Je nach Arbeitsvorgang und abhängig davon, ob sich Personen im Raum befinden oder ob maschinell unter Sicherheit gearbeitet wird, sind pro Raum 0,5 kg bis 20 kg Satz der Gruppe 2, zu welcher auch das Schwarzpulver gehört, zulässig. Für das Abstellen in Versandpackung in Gebäuden in Ausblasebauart sind es 25 kg bzw. 50 kg, abhängig von der Lage des Abstellraumes.

Anders die geltende UVV 46 b "Herstellung von Schwarzpulver" [14], die je nach Bedingung bis zu 350 kg oder 500 kg Schwarzpulver pro Arbeitsraum oder -gebäude in Ausblasebauart mit leichter Dachausführung zuläßt, gegenüber 100 kg oder 150 kg bei schwerer Ausblasebauart; eine Unterscheidung, die nicht mehr gerechtfertigt erscheint, und auf die in der in Überarbeitung befindlichen Fassung dieser UVV verzichtet wird.

Die Mengenbereiche für die nachfolgend beschriebenen Versuchsreihen sind entsprechend den erwarteten Maximaldrücken im Vergleich zur Widerstandsfähigkeit des Gebäudes gewählt und sind nicht an den Höchstmengen der UVV'en orientiert.

3.1.1.1 Offener Raum

Die Bilder 4 und 5 zeigen frühe Phasen der Umsetzung einer von unten gezündeten Schwarzpulverschüttung im offenen Raum, vergrößert aus einer Filmaufzeichnung mit 64 Bildern pro Se-

kunde. Die erste der beiden Fotografien läßt in der Mitte der Flammen noch die Schwarzpulverschüttung erkennen. Die Flammen treten in drei Bereichen auf: über der Schüttung, zwischen Tischplatte und Schüttung sich horizontal ausbreitend und unter der Tischplatte, die zu diesem Zeitpunkt infolge des Überdruckes (etwa 8 bar, vgl. Teil III Abschnitt 3.2.2) in der Schüttung bereits gebrochen ist. Freifeldversuche haben diese Beobachtungen bestätigt (vgl. Teil III Abschnitt 3.1.2). Die darauf folgende Fotografie - 15,6 ms später - zeigt, wie sich die Flammen weiter im Raum ausbreiten. Über die Ausbreitung der Flammen außerhalb des Raumes wird an anderer Stelle in diesem Abschnitt berichtet. In beiden Fotografien ist der Stahlrahmen zu erkennen, an dem bei den ersten Versuchen mit Ausblasewänden die Spanplatten befestigt wurden.



Bild 4

Deflagration von 10 kg Schwarzpulver auf einem Tisch mit Preßspanplatte [6]

Bild 5

wie Bild 4, 15,6 ms später

Ein typisches Druck-Zeit-Diagramm ist in Bild 6 gezeigt. Der Druck verläuft nicht gleichmäßig, sondern er hat ein erstes Maximum p_1 nach wenigen Millisekunden bevor ein erneuter Druckanstieg zu dem wesentlichen Druckmaximum p_{max} führt, welches mehr oder weniger von kürzeren Druckschwingungen überlagert ist. Das Druckmaximum p_1 , das mitunter aus mehreren Druckspitzen besteht, wird auf die Reaktion des unter Einschluß in der Schüttung reagierenden Schwarzpulvers zu-

rückgeführt. Es wird im Teil I des Berichtes nur in den Tabellen aufgeführt und später in Teil V zusammen mit Ergebnissen aus den Teilen II und III diskutiert werden. Für die Belastung des Gebäudes ist hier nur das zweite Druckmaximum P_{max} von Bedeutung, welches auf die Reaktion des nicht unter Einschluß reagierenden, größtenteils aufgewirbelten Schwarzpulvers zurückgeführt wird. Die kurzen Druckspitzen werden bei der Festlegung von P_{max} vernachlässigt, da sie gleichfalls für die Belastung des Gebäudes unerheblich sind.

Die Ergebnisse aller vorliegenden Versuche sind in Tabelle 1 zusammengestellt. Außer dem üblichen Schwarzpulver wurde noch ein Feuerwerkspulver gleicher Zusammensetzung, aber poliert und mit Korngrößen von 2 mm bis 4 mm, benutzt (WANO Schwarzpulver GmbH & Co. Kunigunde KG).

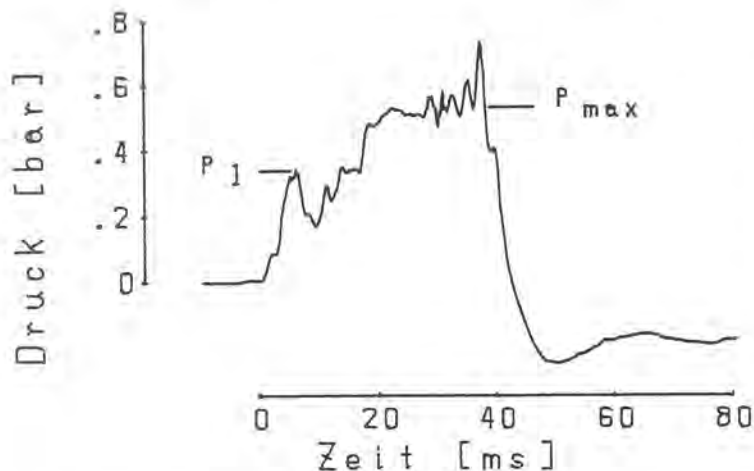


Bild 6

Druck-Zeit-Verlauf bei der Deflagration von 18 kg Schwarzpulver im offenen Raum mit schwerer Dachausführung

Auf die Angabe von Standardabweichungen in dieser und den folgenden Tabellen wurde verzichtet, da den einzelnen Mittelwerten stark schwankende Anzahlen von Einzelmessungen (beginnend mit 2 Messungen) zugrundeliegen. Da die Druckanstiegszeit - Zeit vom Beginn des ersten Druckanstieges bis zum Erreichen des Maximaldruckes - wegen des teilweise sehr unregelmäßigen Druckverlaufes oft nicht bestimmt werden konnte, ist hier die Dauer der positiven Druckphase t_+ angegeben, die vom Beginn des Druckanstieges bis zum Sinken des Druckes unter Atmosphärendruck (0 bar Überdruck) reicht.

In Bild 7 sind die Drücke P_{max} in Abhängigkeit von der Schwarzpulvermenge m grafisch dargestellt, zusammen mit der Potenzfunktion $P_{max} = 0,029 \cdot m^{1,1}$ als Ausgleichskurve. Derartige Potenzfunktionen haben sich allgemein als zur Beschreibung der Mengenabhängigkeit von Maximaldrücken gut ge-

Tabelle 1

Maximaldrücke p_1 und p_{max} und Dauer der positiven Druckphase t_+ bei der Deflagration von Schwarzpulver im offenen Raum mit schwerer Dachausführung

Schwarzpulvermenge [kg]	p_1 [bar]	p_{max} [bar]	t_+ [ms]	
2	0,014	0,06	50	*
4	0,05	0,13	44	*
6	0,11	0,24	40	*
6 ¹⁾	0,31	0,44	33	*
8	0,23	0,37 0,15	37 49	*
9	0,30	0,64	35	*
10	0,28 0,13 0,10 0,17 0,13 0,24 - -	0,50 0,31 0,24 0,29 0,26 0,48 0,41 0,36	38 43 48 43 48 37 40 41	*
10 ²⁾	0,11	0,27	36	
11	0,22	0,43	40	*
18	0,32	0,68	43	

- 1) Stahltisch, ϕ 38 cm
 2) Schwarzpulver, Korngröße 2 mm - 4 mm
 *) [6]

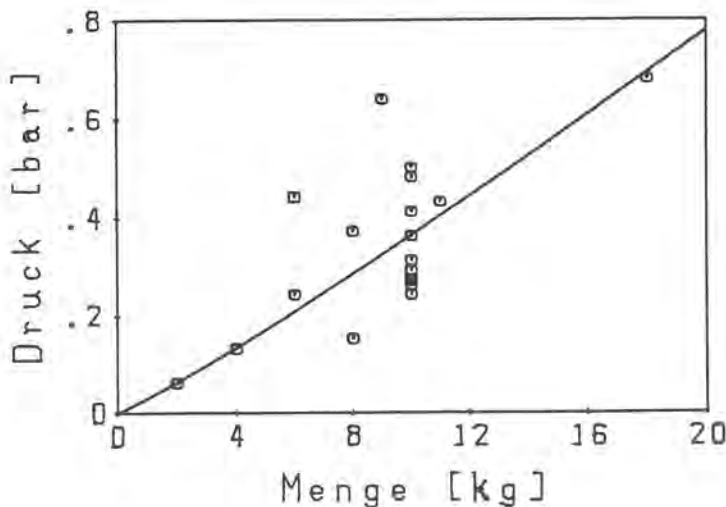


Bild 7

Maximaldrücke in Abhängigkeit von der Schwarzpulvermenge im offenen Raum mit schwerer Dachausführung (□ Stahltisch, ■ Korngröße 2 mm - 4 mm, sonst Korngröße 0,5 - 1,2 mm)

eignet erwiesen. Die Messungen zeigen, daß selbst mit einem derart standardisierten pyrotechnischen Satz wie Schwarzpulver stark voneinander abweichende Werte erhalten werden. So reicht die Spanne der erhaltenen Mittelwerte für 10 kg Schwarzpulver von 0,24 bar bis 0,50 bar und schließt die Werte ein, die mit dem wesentlich gröberen, polierten Schwarzpulver gemessen wurden, von dem eigentlich eine langsamere Umsetzung und damit ein geringerer Druck erwartet wurde. Der einzige Versuch auf einem Stahltisch führte zu einem erhöhten Maximaldruck, die Abweichung liegt jedoch noch innerhalb der Streuung der anderen Druckwerte. Die Dauer der positiven Druckphase zeigt keine signifikante Mengenabhängigkeit, der Mittelwert beträgt $41 \text{ ms} \pm 5 \text{ ms}$ über alle Werte.

Der Schalldruck außerhalb des Versuchsraumes sollte mit den Drücken im Raum in Beziehung gesetzt werden können. Die Amplitude einer kugelförmigen Schallwelle nimmt mit steigender Entfernung r von der Schallquelle mit $1/r$ ab. Bei Versuchen im 1-m^3 -Stahlkasten (Teil II Abschnitt 3.1.1) konnte dies auch für die Ausblaserichtung bei Abständen zwischen 20 m und 80 m bestätigt werden. Die Schalldrücke vor dem Modellgebäude wurden in wechselnden Entfernungen gemessen [6]. Allerdings sind diese Spitzendrücke, wie durch Bandaufzeichnungen festgestellt werden konnte, den negativen Druckphasen (Unterdruck) im Verlauf des Schalldruckes zuzuordnen.

Nimmt man einen Abstand von 1 m für die Druckmessung im Raum an, so müßte der Schalldruck in der Entfernung r vor dem Raum im Verhältnis $1/r$ zu dem Druck im Raum stehen. Für den Abstand 90 m wurden Werte zwischen $1/86$ und $1/128$ gefunden und $1/74$ bzw. $1/112$ für den Abstand 108 m, jeweils schwankend um das erwartete Verhältnis. Damit ist eine einfache Möglichkeit zur Abschätzung der Druckausbreitung außerhalb des Versuchsraumes gegeben.

Die thermische Wirkung der Deflagration von Schwarzpulver in einem offenen Raum mit schwerer Dachausführung wurde anhand verschiedener Phänomene beobachtet. Diese sind die Flammenausbreitung in Ausblaserichtung, die Temperaturen an der Ausblasewand des Nebenraumes und die Wärmestrahlung in Ausblaserichtung.

Als Flammenausbreitung l_{F1} in Ausblaserichtung wurde die Ausdehnung der Schwadenwolke zu dem Zeitpunkt angesehen, an welchem in der Filmaufzeichnung aus seitlicher Sicht aus der Verfärbung des Feuerballes vor dem Raum das Erlöschen der Rotglut zu erkennen war. In Tabelle 2 und Bild 8 sind die erhaltenen Werte zusammengestellt. Die Anpassung einer Potenzfunktion ergibt einen nahezu linearen Verlauf ($l_{F1} = 0,47 \cdot m^{0,98}$). Es muß darauf hingewiesen werden, daß sich die Schwadenwolke noch wesentlich weiter in Druckentlastungsrichtung ausbreitet, wobei über deren Temperaturabfall in Abhängigkeit von der Ausdehnung nichts Näheres bekannt ist.

Tabelle 2

Flammenausbreitung l_{F1} in Ausblaserichtung bei der Deflagration von Schwarzpulver im offenen Raum mit schwerer Dachausführung

Schwarzpulvermenge [kg]	2	4	6	8	9	10	11	18
Flammenausbreitung [m]	0,7	2,5	3,0	3,5	4,5	4,0 4,0 5,5 5,5 4,5	4,5	6,5

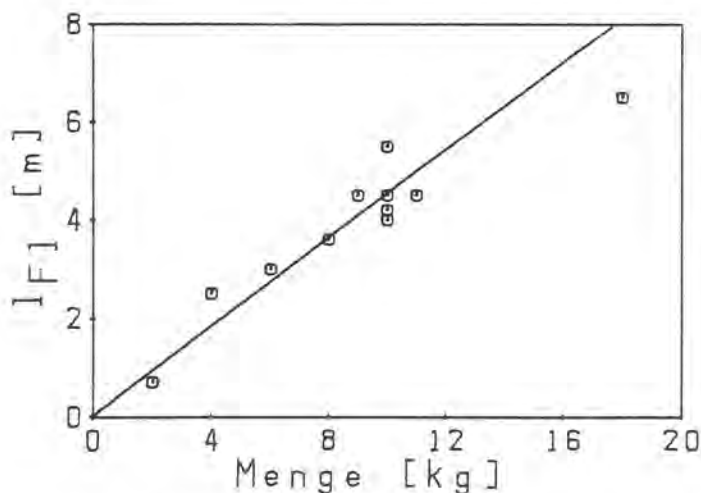


Bild 8

Flammenausbreitung l_{F1} in Abhängigkeit von der Schwarzpulvermenge im offenen Raum mit schwerer Dachausführung

An der Ausblasewand des Nebenraumes, die etwa einen Meter hinter den vorgezogenen Trennwänden montiert war, wurden nur unerhebliche Temperaturerhöhungen gemessen, zwischen 1 K und 15 K (bzw. °C) [6]. Diese Werte stimmen mit der Beobachtung überein, daß die Flammen praktisch nicht um die Trennwände herum oder über die Dachkante zurückschlagen, sofern nicht starker Gegenwind herrscht.

Die Wärmestrahlung wurde im allgemeinen entgegen der Druckentlastungsrichtung in 80 m Entfernung von der Gebäudevorderseite gemessen. Waren aus meßtechnischen Gründen andere Entfernungen erforderlich, so wurden die Meßergebnisse auf den Abstand 80 m umgerechnet. Die Wärmestrahlung nimmt bei kugelförmiger Ausbreitung mit steigender Entfernung r von der Wärmequelle mit $1/r^2$ ab. Bei Versuchen im 1-m³-Stahlkasten wurde diese Gesetzmäßigkeit auch für die Ausbreitung in Ausblaserichtung in Entfernungen zwischen 20 m und 80 m gefunden (Teil II Abschnitt 3.1.1).

Der pyroelektrische Detektor mißt die Bestrahlungsstärke, die hier in der Einheit mW/cm^2 (Leistung pro Flächeneinheit) angegeben wird. Der zeitliche Verlauf der Bestrahlungsstärke ist nicht unbedingt gleichmäßig, ein Beispiel zeigt Bild 9; Schultern oder ein nochmaliger Anstieg der Kurve sind aber auch nach dem Erreichen der maximalen Bestrahlungsstärke möglich. Der unregelmäßige Verlauf kann dadurch erklärt werden, daß sich der Abstand des Flammenballes vom Detektor im Laufe der Umsetzung verringert und möglicherweise auch durch eine spätere Umsetzung mit Luftsauerstoff, da das Schwarzpulver unterbilanziert ist, d.h. es enthält etwa 20 % Sauerstoff weniger, als es zur vollständigen Umsetzung benötigt. Nach etwa 240 ms erreichten die Schallwellen den Detektor und verursachten die im späteren Verlauf der Bestrahlungsstärke auftretenden Störungen.

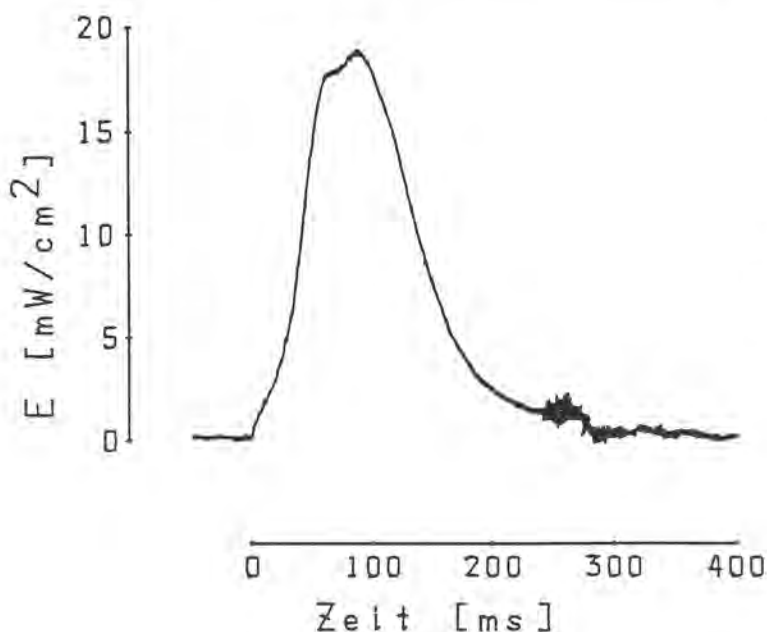


Bild 9

Verlauf der Bestrahlungsstärke E bei der Deflagration von 10 kg Schwarzpulver im offenen Raum mit schwerer Dachausführung

Tabelle 3

Maximale Bestrahlungsstärke E_{\max} und Bestrahlung H in 80 m Entfernung, Anstiegszeit t_{\max} und Strahlungsanteil an der Explosionswärme Q bei der Deflagration von Schwarzpulver im offenen Raum und mit schwerer Dachausführung

Schwarzpulvermenge [kg]	E_{\max} [mW/cm ²]	H [mJ/cm ²]	t_{\max} [ms]	Q [%]	
2	4,5	0,59	82	8,2	*
4	8,2	0,83	59	5,8	*
6	10,2	1,03	54	4,8	*
9	15,7	1,51	47	4,6	*
10	19,8	1,81	47	5,0	*
	20,6	2,34	75	6,5	
	19,7	2,54	80	7,1	
11	20,3	2,10	65	5,3	*
10 ¹⁾	13,9	3,14	100	8,7	2)
	12,1	2,82	67	7,9	
	11,4	4	85	10	

* [6]

1) Schwarzpulver, Korngröße 2 mm - 4 mm

2) seitliche Abweichung von der üblichen Meßrichtung 22,5°

3) wie 2) jedoch 45°

In der Tabelle 3 sind neben der maximalen Bestrahlungsstärke E_{\max} und der Zeit t_{\max} vom ersten Anstieg der Bestrahlungsstärke bis zum Erreichen von E_{\max} noch die Fläche unter dem Verlauf der Bestrahlungsstärke, die Bestrahlung $H = \int E dt$ in mJ/cm², angegeben. Ferner ist aus der Bestrahlung durch Multiplikation mit der Kugeloberfläche (Radius = Meßabstand) die gesamte Strahlungsenergie berechnet und mit der Explosionswärme (negative Standardreaktionsenergie) ins Verhältnis gesetzt worden. Diese beträgt für Schwarzpulver etwa 2900 kJ/kg [15]. Allerdings wird zumindest teilweise die Verbrennung mit Luftsauerstoff zur Wärmeentwicklung beitragen; die Verbrennungswärme beträgt etwa 6200 kJ/kg, berechnet für die Reaktionsprodukte K_2SO_4 , K_2CO_3 , CO_2 und N_2 .

Die maximale Bestrahlungsstärke E_{\max} ist in Bild 10 in Abhängigkeit von der Schwarzpulvermenge m aufgetragen, die Ausgleichskurve ($E_{\max} = 2,3 \cdot m^{0,92}$) ist ohne den Wert für das Schwarzpulver mit der Korngröße 2 mm bis 4 mm berechnet,

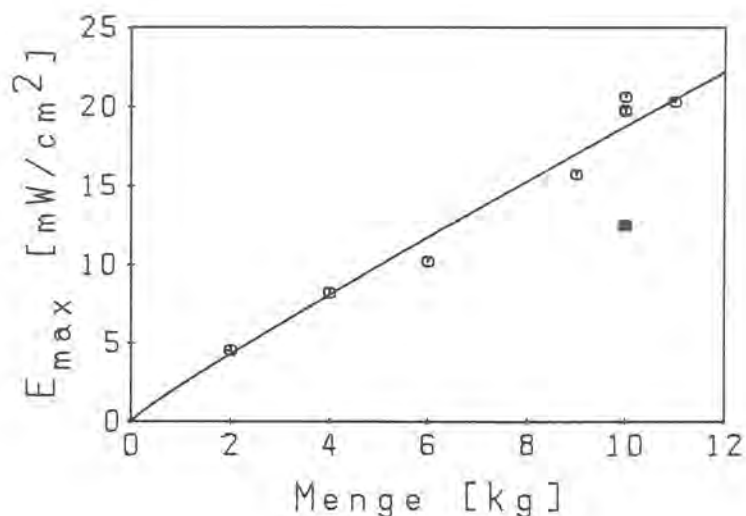


Bild 10

Maximale Bestrahlungsstärke E_{max} in Abhängigkeit von der Schwarzpulvermenge im offenen Raum mit schwerer Dachausführung

(■ Korngröße 2 mm - 4 mm)

der wegen der langsameren Umsetzung dieses Pulvers niedriger ausfällt. Bei diesem Schwarzpulver wurde ein weiteres niedriges Maximum der Bestrahlungsstärke nach 0,7 s bis 1,8 s beobachtet, welches dem Nachbrennen in Luft zuzuordnen ist. Dieses weitere Maximum wurde höher, als der Detektor abweichend von der üblichen Meßrichtung 45° seitlich von der Druckentlastungsrichtung aufgestellt wurde (vgl. H bzw Q). Dies zeigt übereinstimmend mit den Ergebnissen von Freifeldmessungen (Teil III, Abschnitt 3.1.2), daß erhebliche Strahlungsanteile in den Schwarzpulverschwadern, die sich in Druckentlastungsrichtung ausbreiten, absorbiert werden. Während hier Strahlungsanteile zwischen 4 % und 9 % der Explosionswärme gefunden wurden, wurden bei Freifeldmessungen, bei denen die Schwaden nach oben abziehen, Strahlungsanteile bis fast 30 % der Explosionswärme gefunden.

3.1.1.2 Ausblasewände aus Holz

Ausblasewände, die ausschließlich aus Holz bestehen, werden üblicherweise nur in Räume eingesetzt, die keine Arbeitsräume sind, z.B. in Räume von Trockenhäusern. In Arbeitsgebäuden befinden sich in den Ausblasewänden Fenster, die entweder verglast oder mit Kunststofffolien bespannt sind.

Die hier verwendeten ursprünglichen Ausblasewände des Modellgebäudes bestanden aus Stahlrahmen (Vierkantrohr 80 mm x 50 mm x 3 mm), die an den Wänden befestigt waren und aus 16 mm dicken Preßspanplatten, die mit den Stahlrahmen fest verschraubt wurden (vgl. Bild 1). Dieses Konzept (Typ I) hatte sich schon nach den ersten Versuchen als nicht lang-

fristig brauchbar erwiesen, da sich Schweißnähte öffneten und bei Versuchen mit größeren Mengen Schwarzpulvers sich der Rahmen im ganzen nach außen wölbte.

Das neue Konzept (Typ II) ist in gleicher Weise zur Befestigung von Ausblasewänden aus Holz wie von solchen aus Folie, Drahtgitter u.ä. geeignet. An den Innenwänden sind zunächst Vierkantrohre (80 mm x 80 mm x 4 mm) senkrecht befestigt. Vor diese Vierkantrohre werden Kanthölzer (80 mm x 100 mm) geschraubt, die vom Boden bis zur Decke reichen. Ein weiteres Kantholz wird in der Mitte zwischen den seitlichen Kanthölzern senkrecht in die freie Raumöffnung gestellt und in dafür vorgesehenen stählernen Aufnahmen an Boden und Decke befestigt. Auf diese Kanthölzer können nun Preßspanplatten in zwei Reihen à 6 Platten mit je 4 Holzschrauben (4,5 mm x 45 mm) befestigt werden. Die Ausblasewand für den Raum mit leichter Dachausführung ist entsprechend kleiner (2 x 4 Platten). Im allgemeinen bricht das mittlere Kantholz bei den Versuchen, sofern es zu einem plötzlichen Druckaufbau im Raume kommt, während die äußeren Kanthölzer mehrfach verwendet werden können.

Der Typ III der Ausblasewände ist ein Nachbau der Ausblasewand eines Trockenhauses einer deutschen pyrotechnischen Fabrik und wurde nur für Versuche mit Feuerwerkssternen und für zwei vergleichende Versuche mit Schwarzpulver verwendet. Diese Ausblasewand ist im einzelnen in Abschnitt 3.2.1.1 beschrieben.

Die Ergebnisse der Druckmessungen sind in Tabelle 4 zusammengestellt, ein Beispiel für den Druck-Zeit-Verlauf ist in Bild 11 zu sehen. Der Druck verläuft im Raum mit Ausblasewand im allgemeinen gleichmäßiger als im offenen Raum.

Bild 12 zeigt die Maximaldrücke in Abhängigkeit von der Schwarzpulvermenge; die Ausgleichsfunktion $p_{\max} = 0,91 \cdot m^{1,0}$ ist für alle Werte ermittelt worden, da der Maximaldruck im Rahmen der Meßgenauigkeit unabhängig von den untersuchten Ausblasewandtypen ist. Die Dauer der positiven Druckphase betrug im Mittel $51 \text{ ms} \pm 7 \text{ ms}$.

Tabelle 4

Maximaldrücke p_1 und p_{max} und Dauer der positiven Druckphase t_+ bei der Deflagration von Schwarzpulver im Raum mit schwerer Dachausführung - Ausblasewände Typen I, II und III

Schwarzpulvermenge - [kg]	p_1 [bar]	p_{max} [bar]	t_+ [ms]	
4	0,04	0,40	51	*
6	0,09	0,54	49	*
	0,07	0,61	49	1)
	0,02	0,58	64	2)
8	0,11	0,67	48	*
10	0,22	0,94	45	*
	0,17	1,14	45	1)
	0,08	1,00	59	2)

* [6] Typ I
 1) Typ II
 2) Typ III

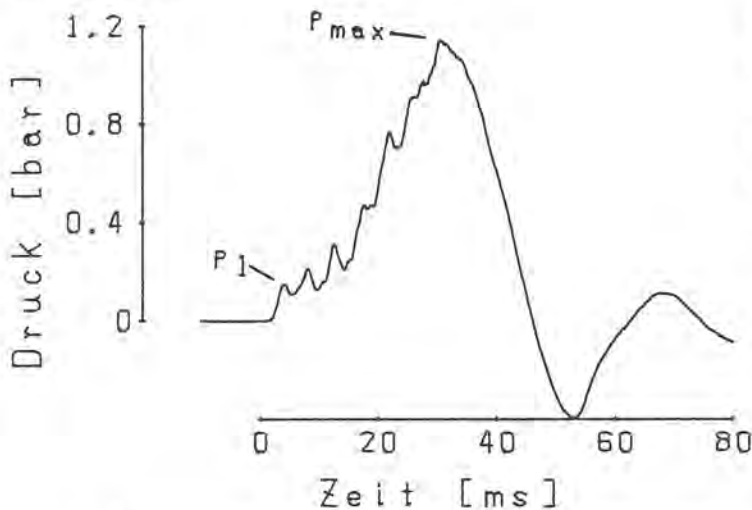


Bild 11

Druck-Zeit-Verlauf bei der Deflagration von 10 kg Schwarzpulver im Raum mit schwerer Dachausführung - Ausblasewand Typ II

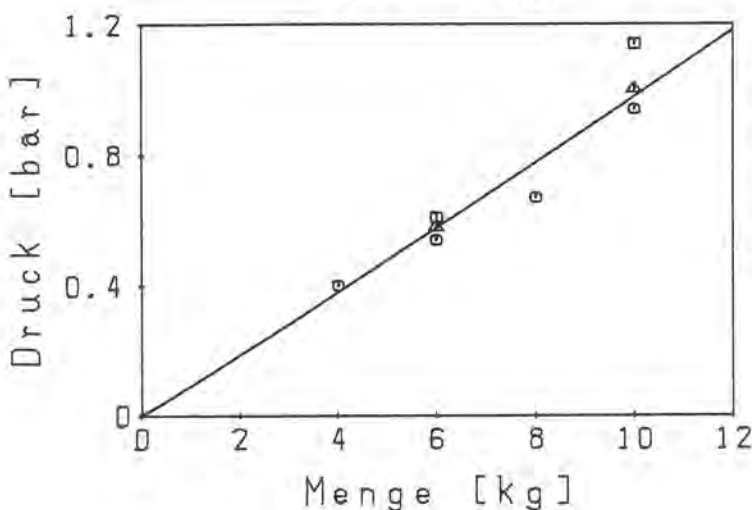


Bild 12

Maximaldrücke in Abhängigkeit von der Schwarzpulvermenge im Raum mit schwerer Dachausführung - Ausblasewand Typ I O, Typ II □, Typ III Δ

Die Schalldruckmessungen in der Entfernung $r = 90$ m vor dem Versuchsraum [6] ergaben hier 1/112 bis 1/170 der Maximaldrücke im Versuchsraum. Dies bedeutet aber nur eine geringe

Abweichung von der angenommenen kugelförmigen Schallausbreitung (vgl. Abschnitt 3.1.1.1), da sich aus den angegebenen Werten im Mittel eine Abnahme der Schallamplitude mit $1/r^{1,1}$ ergibt.

Zu den mechanischen Auswirkungen gehören bei diesen Versuchen noch die Wurfstücke der Ausblaserwände. Die Flugweite der mehr oder minder zerbrochenen Spanplatten oder der Bruchstücke der Wand Typ III betrug in Ausblaserichtung im allgemeinen etwa 70 m. Einzelne Bruchstücke wurden gelegentlich mit größerer Geschwindigkeit bis zu 130 m weit geschleudert, wodurch ein eventuell getroffener Mensch hätte erheblich gefährdet werden können. Die Spanplattenbruchstücke hatten im übrigen im Anfangsbereich ihrer Flugbahn eine mittlere Geschwindigkeit von etwa 80 m/s (10 kg Schwarzpulver, [6]). Die Wurfstückverteilung wurde nicht ermittelt.

Von den thermischen Auswirkungen ist zunächst die Flammenausbreitung in Tabelle 5 und Bild 13 dargestellt.

Tabelle 5

Flammenausbreitung l_{F1} in Ausblaserichtung bei der Deflagration von Schwarzpulver im Raum mit schwerer Dachausführung - Ausblaserwände Typen I, II und III

Schwarzpulvermenge [kg]	4	6	8	10	Ausblaserwand
Flammenausbreitung [m]	3,5	4,0	4,0	4,5 5,0 6,0	Typ I [6] Typ II Typ III

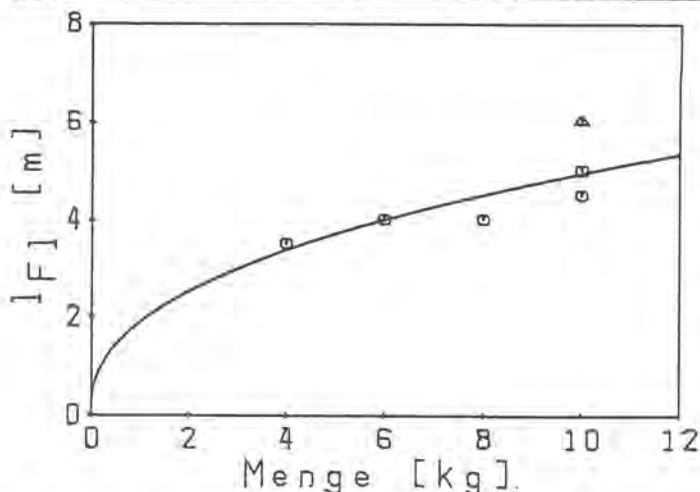


Bild 13

Flammenausbreitung l_{F1} in Abhängigkeit von der Schwarzpulvermenge im Raum mit schwerer Dachausführung - Ausblaserwände Typ I O, Typ II □, Typ III Δ

Die verschiedenen Ausblaserwände führen nicht zu signifikanten Abweichungen der Flammenausbreitung bei gleicher Schwarz-

pulvermenge. Im Gegensatz zu den Versuchen im offenen Raum ist hier im untersuchten Bereich ein deutlich nichtlineares Anwachsen der Flammenausbreitung mit der Schwarzpulvermenge zu verzeichnen ($l_{F1} = 1,9 \cdot m^{0,42}$).

Die Temperaturerhöhungen an der Ausblasewand des Nebenraumes betragen 1 K bis 12 K [6], sind also zu vernachlässigen. Anders die Druckwirkung auf die benachbarte Ausblasewand, die an dieser Stelle erwähnt werden soll. Die benachbarte Ausblasewand ist von Versuch zu Versuch weiter zerstört worden, vermutlich durch die Sogwirkung wurden einzelne Spanplatten-segmente zerbrochen und abgerissen.

Die Ergebnisse der Wärmestrahlungsmessungen sind in Tabelle 6 zusammengestellt (zu den angegebenen Größen vgl. Abschnitt 3.1.1.1), Bild 14 zeigt das Anwachsen der maximalen Bestrahlungsstärke mit der Schwarzpulvermenge.

Tabelle 6

Maximale Bestrahlungsstärke E_{max} und Bestrahlung H in 80 m Entfernung, Anstiegszeit t_{max} und Strahlungsanteil Q bei der Deflagration von Schwarzpulver im Raum mit schwerer Dachausführung - Ausblasewände Typen I und III

Schwarzpulvermenge [kg]	E_{max} [mW/cm ²]	H [mJ/cm ²]	t_{max} [ms]	Q [%]
4	4,3	0,29	52	2,0 *
6	7,1	0,41	50	1,9 *
	8,6	0,36	30	1,6 Typ III
8	10,1	0,71	39	2,5 *
10	11,7	0,79	45	2,2 *
	13,5	0,65	28	1,8 Typ III

* [6], Typ I

Die maximalen Bestrahlungsstärken waren bei den Versuchen mit der Ausblasewand Typ III etwas größer als bei denen mit Typ I, wobei die Anstiegszeiten entsprechend kürzer und die Bestrahlungen kleiner waren. Über alle Werte ergibt sich ein näherungsweise linearer Anstieg der maximalen Bestrahlungsstärke mit der Schwarzpulvermenge ($E_{max} = 0,98 \cdot m^{1,1}$).

Der Quotient aus der Strahlungsenergie und der Explosionswärme Q ist mit ca. 2 % sehr niedrig, was auf die zeitweilige Abschirmung der Wärmestrahlung durch die noch im Sicht-

feld des Detektors befindlichen Wurfstücke der Ausblasewand zurückzuführen ist.

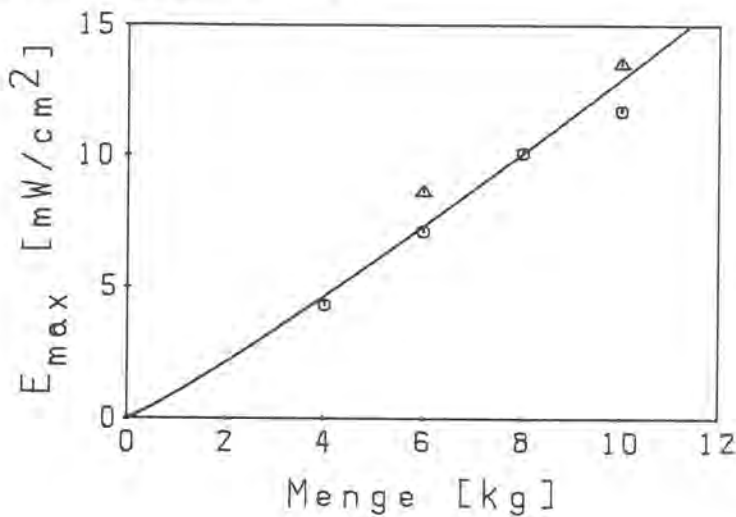


Bild 14

Maximale Bestrahlungsstärke E_{max} in Abhängigkeit von der Schwarzpulvermenge im Raum mit schwerer Dachausführung - Ausblasewand Typ I O, Typ III Δ

3.1.1.3 Ausblasewände aus Kunststoffolie

Kunststoffolien werden in der pyrotechnischen Industrie sowohl als Fenstermaterialien als auch als Material für vollständige Ausblasewände verwendet. Üblich sind verschiedenste Gitterfolien (kunststoffarmierte Folien), die in ein oder zwei Lagen auf Holzrahmen gespannt werden und im Falle von zwei Lagen teilweise noch Dämmmaterial zwischen sich einschließen.

Die Berstfestigkeit derartiger Kunststoffolien ist höher als allgemein erwartet wird (vgl. Teil III Abschnitt 2.2.3), sie lösen sich aber abhängig von der Art ihrer Befestigung mehr oder minder leicht von den jeweiligen Rahmen.

Hier wurde eine PVC-Gitterfolie verwendet (J.W. Benecke, ca. 0,4 mm dick und 0,05 g/cm²) und mit Heftklammern (19 mm lang) in Abständen von etwa 10 cm angeschossen, wobei auf die Gitterfolie noch eine Holzleiste (20 mm x 5 mm) gelegt wurde. Zusätzlich zu den seitlichen Kanthölzern und dem mittleren Kantholz wurden zur Befestigung der Gitterfolie noch oben und unten Querleisten (60 mm x 40 mm) mit 6 bis 8 Nägeln (100 mm lang) an den Kanthölzern angebracht.

Die Folien sind bei keinem der Versuche geplatzt, sondern lediglich aus der Befestigung herausgerissen und mit steigender Menge verstärkt angesengt bzw. im Einzelfall auch durchgebrannt worden.

Die erhaltenen Druckwerte sind der Tabelle 7 zu entnehmen, auf die Darstellung des Druck-Zeit-Verlaufes ist verzichtet worden, da dieser dem Druck-Zeit-Verlauf gleicht, der mit Ausblasewänden aus Holz erhalten wurde. In Bild 15 ist der Maximaldruck in Abhängigkeit von der Schwarzpulvermenge dargestellt ($P_{\max} = 0,054 \cdot m^{0,93}$), die Dauer der positiven Druckphase betrug durchschnittlich $41 \text{ ms} \pm 2 \text{ ms}$.

Tabelle 7

Maximaldrücke p_1 und p_{\max} und Dauer der positiven Druckphase t_+ bei der Deflagration von Schwarzpulver im Raum mit schwerer Dachausführung - Ausblasewand aus Kunststoffolie

Schwarzpulvermenge [kg]	p_1 [bar]	P_{\max} [bar]	t_+ [ms]
6	0,08	0,29	43
8	0,10	0,36	43
10	0,15	0,47	39
12	0,20	0,51	42
16	0,23	0,73	40

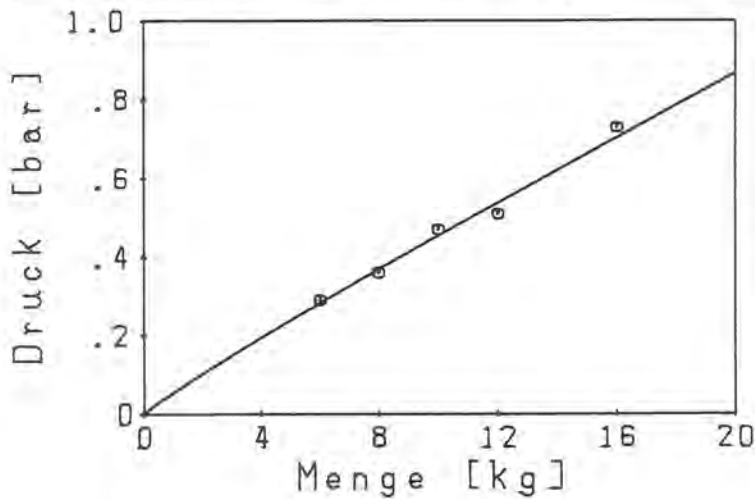


Bild 15

Maximaldrücke in Abhängigkeit von der Schwarzpulvermenge im Raum mit schwerer Dachausführung - Ausblasewand aus Kunststoffolie

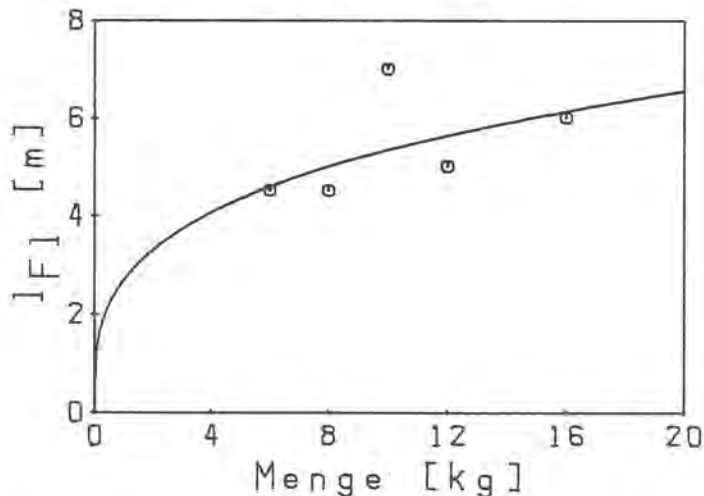


Bild 16

Flammenausbreitung l_{F1} in Abhängigkeit von der Schwarzpulvermenge im Raum mit schwerer Dachausführung - Ausblasewand aus Kunststoffolie

Außer dem Druckverlauf wurde bei diesen Versuchen nur noch die Flammenausbreitung registriert, deren Werte in Tabelle 8 zusammengestellt sind. Bild 16 zeigt die Zunahme der Flammenausbreitung in Ausblaserichtung mit der Schwarzpulvermenge ($l_{F1} = 2,7 \cdot m^{0,30}$). Wie bei den Versuchen mit Ausblasewänden aus Holz weicht l_{F1} hier stark von einer linearen Abhängigkeit ab.

Tabelle 8

Flammenausbreitung l_{F1} in Ausblaserichtung bei der Deflagration von Schwarzpulver im Raum mit schwerer Dachausführung - Ausblasewand mit Kunststoffolie

Schwarzpulvermenge [kg]	6	8	10	12	16
Flammenausbreitung [m]	4,5	4,5	7,0	5,0	6,0

3.1.1.4 Schwarzpulver auf Horden

In Abschnitt 3.2.1 sind Versuche mit Feuerwerkssternen beschrieben, die möglichst genau die Explosionswirkungen bei einer Entzündung dieser Feuerwerkssterne in einem Trockenhaus erfassen sollen. Die Trocknung findet auf sogenannten Horden statt, die wiederum in Regalen untergebracht sind. Der Versuchsaufbau ist im einzelnen in dem betreffenden Abschnitt wiedergegeben. Da es für das Verhalten von Stoffen von entscheidender Bedeutung ist, in welcher Konfiguration der Stoff zur Reaktion kommt - ob in loser Schüttung, unter festem Einschluß oder in mehr oder minder dünnen Schichten - wurden Versuche mit Schwarzpulver unter den Bedingungen der Versuche mit Feuerwerkssternen durchgeführt.

Abweichend von den Versuchen mit Feuerwerkssternen wurden hier Ausblasewände Typ I verwendet und das Regal stand quer im Raum. Auf jeder Horde wurden 6 kg bis 6,3 kg Schwarzpulver verteilt, das ergibt eine Schichtdicke von etwa 2 cm. Jeweils ein bis drei Horden wurden in 2 bis 4 Lagen übereinander in dem Regal verteilt. Das Schwarzpulver wurde in der Mitte der untersten Lage gezündet, so daß sich die Zündung möglichst schnell auf alle Horden übertragen konnte.

Die Regale selbst bestanden aus unterschiedlichen Materialien, hatten aber immer Maße, die eine gleichbleibende Lage der Horden zueinander gewährleisteten.

In Bild 17 ist zu erkennen, daß der Druck-Zeit-Verlauf Maxima aufweist, die auf verschiedene Reaktionsphasen zurückzuführen sind. Das erste Druckmaximum $P_{max,1}$ ist hierbei auf die Druckentlastung durch die Ausblasewand zurückzuführen. In die darauffolgende negative Druckphase fällt ein zweites Druckmaximum $P_{max,2}$, das durch die Umsetzung des restlichen Schwarzpulvers verursacht wird, welches zum Zeitpunkt der Druckentlastung noch nicht umgesetzt ist und vermutlich durch die Druckentlastung aufgewirbelt wird. Dieses Druckmaximum überschreitet erst bei Mengen über 30 kg den Umgebungsdruck und wächst dann stark an. In der Tabelle 9 sind die Ergebnisse der Druckmessungen zusammengestellt. Da die Dauer der positiven Druckphase wegen des zweiten Druckmaximums sich sprunghaft ändert, sind hier die Druckanstiegszeiten - Zeit vom ersten Druckanstieg bis zum jeweiligen Maximaldruck - angegeben. Ferner enthält die Tabelle noch die Ergebnisse eines Versuches mit 12 kg Schwarzpulver im offenen Raum.

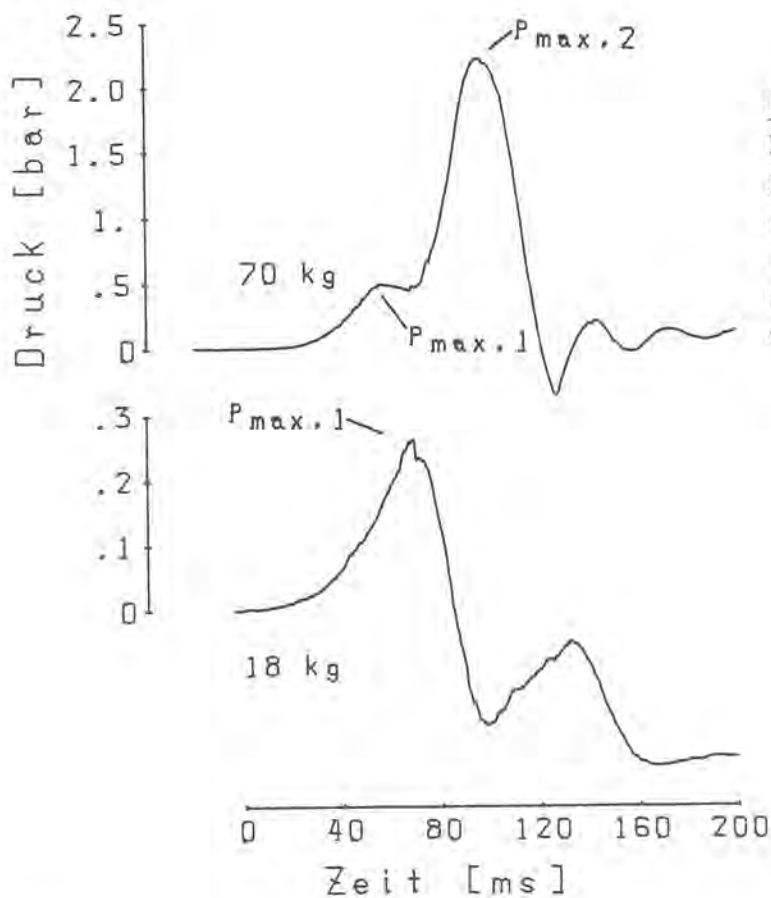


Bild 17
 Druck-Zeit-Verlauf bei der Deflagration von 18 kg und 70 kg Schwarzpulver auf Horden im Raum mit schwerer Dachausführung und Ausblasewand aus Holz

Tabelle 9

Maximaldrücke p_{max} und Druckanstiegszeiten t_{max} bei der Deflagration von Schwarzpulver auf Horden im Raum mit schwerer Dachausführung und Ausblasewand aus Holz

Schwarzpulvermenge [kg]	$p_{max,1}$ [bar]	$t_{max,1}$ [ms]	$p_{max,2}$ [bar]	$t_{max,2}$ [ms]
12	0,24	-	-	-
18	0,25	74	-	-
24	0,19	64	-	-
30	0,33	71	-	-
50	0,31	48	1,00	113
70	0,44	50	2,2	90
12 ¹⁾	0,09	69	-	-

1) im offenen Raum

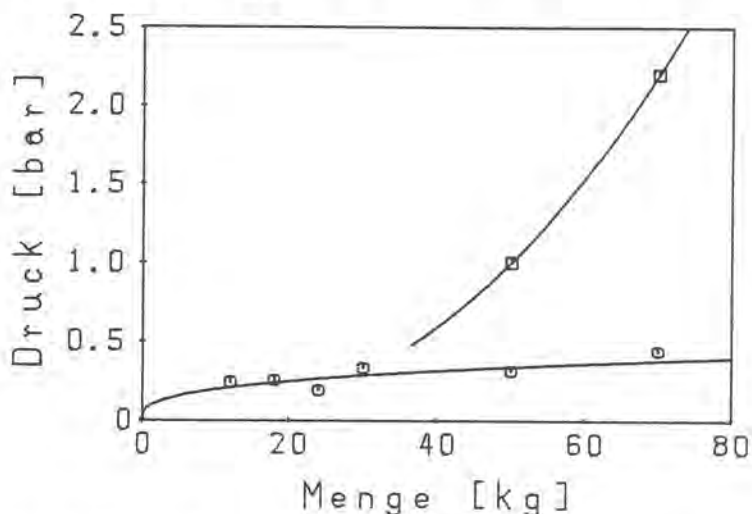


Bild 18

Maximaldrücke in Abhängigkeit von der Schwarzpulvermenge auf Horden im Raum mit schwerer Dachausführung und Ausblasewand aus Holz - $p_{max,1}$ ○ , $p_{max,2}$ □

In Bild 18 sind die Maximaldrücke in Abhängigkeit von der Schwarzpulvermenge eingetragen. Die angepaßte Potenzfunktion $p_{max,1} = 0,090 \cdot m^{0,34}$ repräsentiert die Tatsache, daß der Maximaldruck $p_{max,1}$ zunächst mit der Menge steil ansteigt, solange die Druckbelastbarkeit der Ausblasewand noch nicht erreicht ist, danach aber wegen der Druckentlastung nur noch geringfügig mit der Menge wächst. Legt man eine Ausgleichsgerade durch diese Druckwerte, so erhält man als Ordinatenabschnitt 0,18 bar und damit einen Anhaltswert für den Berstdruck der verwendeten Spanplatten. Dieser Druck wird in dem geschlossenen Raum mit etwa 0,7 kg Schwarzpulver erreicht (1 kg Schwarzpulver liefert in 1 m³ Volumen etwa 3 bar Überdruck, vgl. Teil II Abschnitt 3.1.1).

Die Ausgleichskurve $p_{\max,2} = 1,0 \cdot 10^{-4} \cdot m^{2,3}$ ist nur durch Messungen aus zwei Versuchen bestimmt und daher nicht zuverlässig, sie zeigt jedoch deutlich das steile Ansteigen des Maximaldruckes $p_{\max,2}$ ab einer bestimmten Menge Schwarzpulvers.

Die Flammenausbreitung l_{F1} in Ausblaserichtung ist in Tabelle 10 und Bild 19 dargestellt. Die Flammenausbreitung wächst mit der Schwarzpulvermenge mit $l_{F1} = 1,4 \cdot m^{0,64}$; der bei offenem Raum erhaltene Wert entspricht, im Rahmen der Meßgenauigkeit, den mit Ausblasewänden gefundenen Werten. Die Filmaufnahmen der seitlich aufgestellten Kamera zeigten bei Versuchen mit Mengen bis zu 30 kg Schwarzpulver außerdem, daß die Flammen neben dem Gebäude bis zu einen Meter weit um die vorgezogene Wand herum zurückschlügen. Die Temperaturerhöhung am Ort der Ausblasewand im Nebenraum betrug allerdings nur 5 K bis 26 K (12 kg bis 30 kg Schwarzpulver).

Tabelle 10

Flammenausbreitung l_{F1} in Ausblaserichtung bei der Deflagration von Schwarzpulver auf Horden im Raum mit schwerer Dachausführung und Ausblasewand aus Holz

Schwarzpulvermenge [kg]	12 ¹⁾	18	24	30	50	70
Flammenausbreitung [m]	5,5	9,0	9,5	12,5	20,0	18,5

1) offener Raum

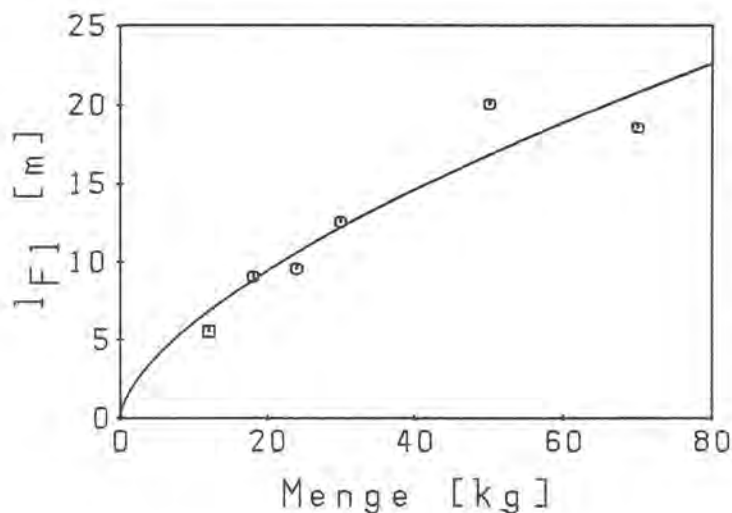


Bild 19

Flammenausbreitung l_{F1} in Abhängigkeit von der Schwarzpulvermenge auf Horden im Raum mit schwerer Dachausführung und Ausblasewand aus Holz
- □ offen

Die Ergebnisse der Wärmestrahlungsmessungen (80 m Abstand) sind in Tabelle 11 zusammengestellt. Der Verlauf der Wärmestrahlung weist keine systematischen Besonderheiten auf, lediglich bei dem Versuch im offenen Raum mit zwei Horden à 6 kg Schwarzpulver ist zu erkennen, daß der Detektor zunächst die Umsetzung des Schwarzpulvers in der unteren Horde registriert und erst im weiteren Verlauf die Umsetzung der zweiten Horde hinzukommt; auf eine bildliche Darstellung wird verzichtet.

Schwarzpulvermenge [kg]	E_{max} [mW/cm ²]	H [mJ/cm ²]	t_{max} [ms]	Q [%]
18	19,0	4,72	185	7,3
24 ²⁾	ca. 30	ca. 9	187	ca. 10
30	59,3	12,6	153	11,6
50	74,8	16,5	119	9,2
12 ¹⁾	12,4	2,44	181	5,6

Tabelle 11

Maximale Bestrahlungsstärke E_{max} und Bestrahlung H in 80 m Entfernung, Anstiegszeit t_{max} und Strahlungsanteil Q bei der Deflagration von Schwarzpulver auf Horden im Raum mit schwerer Dachausführung und Ausblasewand aus Holz

1) offener Raum

2) Maximalwert aus dem Kurvenverlauf abgeschätzt

In Bild 20 ist die Zunahme der maximalen Bestrahlungsstärke mit der Schwarzpulvermenge dargestellt. Die Ausgleichsfunktion ist hier wegen des unsicheren Wertes für 24 kg Schwarzpulver und wegen der großen Streuung der Meßwerte gleichfalls unsicher und deshalb gestrichelt eingezeichnet ($E_{max} = 0,41 m^{1,4}$).

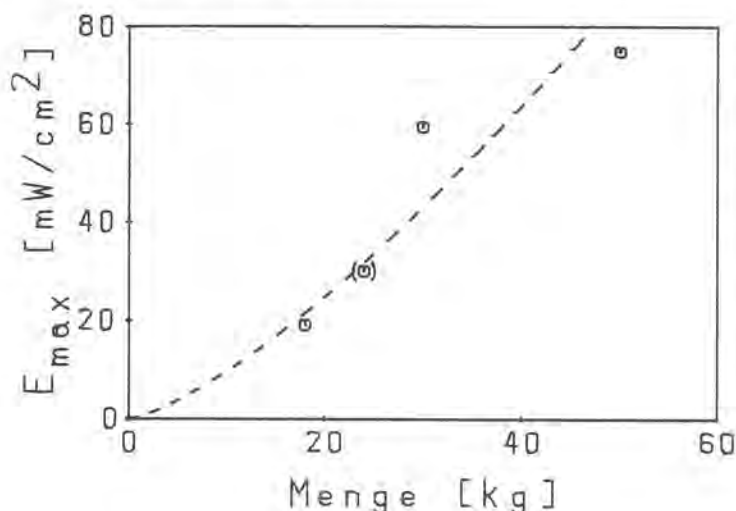


Bild 20

Maximale Bestrahlungsstärke E_{max} in Abhängigkeit von der Schwarzpulvermenge auf Horden im Raum mit schwerer Dachausführung und Ausblasewand aus Holz - (o) aus dem Kurvenverlauf abgeschätzt

3.1.1.5 Schwingungsmessungen an Gebäuden

Der in Abschnitt 2.1 angegebenen Abschätzung der dynamischen Belastbarkeit des Modellgebäudes wurden Annahmen über die Eigenschwingzeiten der Bauteile (Wände, Decke) $t_e \approx 10 \dots 50$ ms zugrundegelegt. Diese Annahmen sollten durch Messungen überprüft werden.

Zu diesem Zweck wurde ein Beschleunigungsaufnehmer mittels eines handelsüblichen Kunststoffdübels außen fest in eine der Wände des Raumes geschraubt, jeweils etwa in der Flächenmitte. Die Messungen wurden im äußeren Raum mit schwerer Dachausführung mit unterschiedlichen Anregungen (Schwarzpulver verschiedener Korngrößen im offenen Raum und Schwarzpulver auf Horden mit Ausblasewand aus Holz) durchgeführt.

Bild 21 zeigt ein typisches Beschleunigungsdiagramm, die Meßwerte sind in Tabelle 12 zusammengestellt.

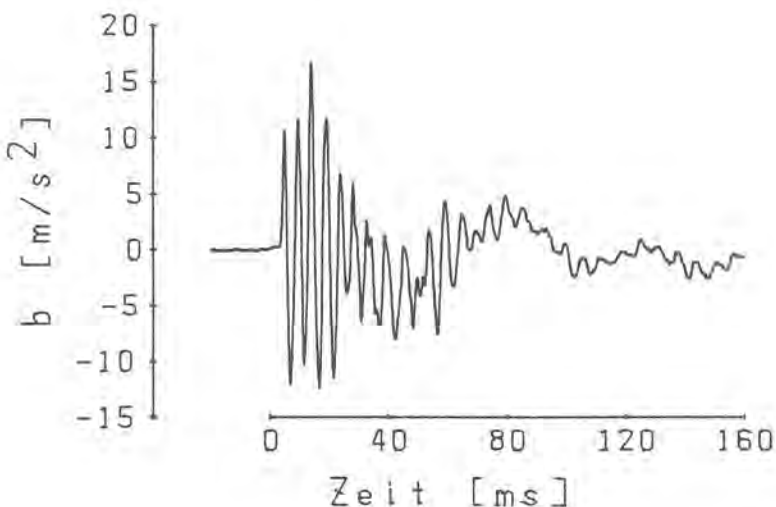


Bild 21

Verlauf der Beschleunigung b an der Rückwand, gemessen bei der Deflagration von 10 kg Schwarzpulver im offenen Raum mit schwerer Dachausführung

Neben sehr kurzen Schwingungen - die als Gebäudebelastung unerheblich und in der bildlichen Darstellung durch Filterung (1 kHz) unterdrückt sind - wurden kürzere (5 ms - 16 ms) und längere (37 ms - 66 ms) Schwingungen gefunden. Um die Annahme zu belegen, daß die längeren Schwingungen auf Nickbewegungen des ganzen Gebäudes zurückzuführen sind, wurden bei einigen Messungen Schwinggeschwindigkeitsaufnehmer hinter dem Gebäudefundament auf dem festgestampften Lehm aufgestellt. Diese Meßaufnehmer sind z. B. zum Messen von Bodenschwingungen und für seismische Messungen geeignet. Wie Bild 22 zeigt - die Meßwerte sind gleichfalls in Tabelle 12 aufgeführt -

Tabelle 12

Schwingungsdauer t von verschiedenen Bauteilen des Modellgebäudes und vom Boden hinter dem Modellgebäude bei der Deflagration von Schwarzpulver im Raum mit schwerer Dachausführung

Anregung	Wandschwingungen		Bodenschwingungen ³⁾		
	Bauteil	$t_{kurz1)}$ $t_{lang2)}$ [ms]	horizontal	vertikal [ms]	
10 kg Schwarzpulver im offenen Raum, Korngröße 2 mm - 4 mm	Innenwand	6,0	42	-	-
	Außenwand	6,3	37	-	-
	Rückwand	5,1	66	-	-
10 kg Schwarzpulver im offenen Raum	Außenwand	6,2	schwach) ca.65	ca. 65
	Rückwand	4,8	66		
	"	4,9	66		
Schwarzpulver auf Boden ⁴⁾ 12 kg 18 kg 30 kg	Außenwand	16	-	-	-
	"	14	-	-	-
	"	15	-	-	-

- 1) Mittelwerte aus jeweils bis zu 10 vollen Schwingungen
- 2) Mittelwerte aus jeweils bis zu 3 vollen Schwingungen (kurze Schwingungen für die Auswertung in einigen Fällen durch Filterung unterdrückt)
- 3) Je nach Auswahl der Einzelschwingungen (z.B. von Maximum zu Maximum oder von Minimum zu Minimum) zwischen 51 ms und 75 ms
- 4) Ausblasewand Typ I

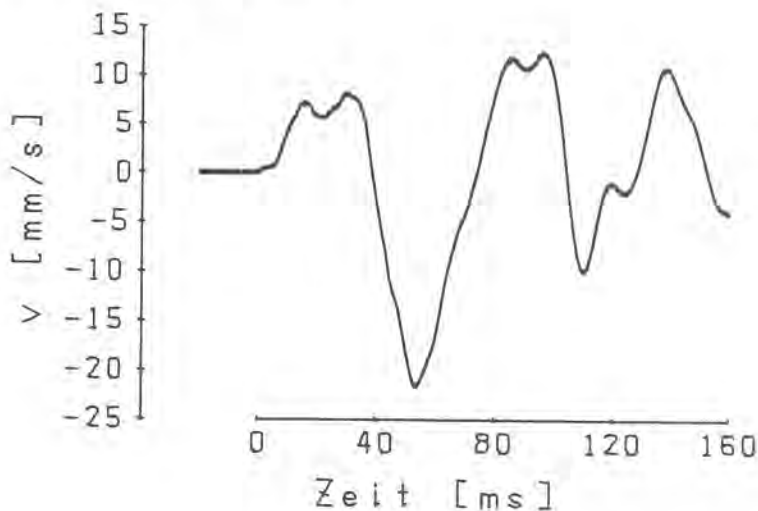


Bild 22
Verlauf der Schwinggeschwindigkeit v auf dem Lehm Boden hinter dem Modellgebäude, gemessen bei der Deflagration von 10 kg Schwarzpulver im offenen Raum mit schwerer Dachausführung

deckt sich die Dauer der Bodenschwingungen mit denen der längeren Schwingungen, die an den Gebäudewänden gemessen wurden. Die kleineren Werte, die für t_{lang} an den seitlichen

Wänden gefunden wurden, werden darauf zurückgeführt, daß der Beschleunigungsaufnehmer nicht für seitlich (aufgrund der Nickbewegung) angreifende Kräfte konstruiert und deshalb auch die Amplitude dieser Schwingung teilweise nur schwach ausgeprägt ist.

Als Eigenschwingungen der Bauteile sind nur die kürzeren Schwingungen zwischen 5 ms und 16 ms anzusehen. Die Dauer dieser Schwingungen ist von der Art der Anregung abhängig (vgl. Schwarzpulver in loser Schüttung und Schwarzpulver auf Horden) und ferner von der Masse des Bauteiles und seiner Einspannung in das Gebäude. Hier führt eine kleinere Masse und eine festere Einspannung (Rückwand) zu einer kürzeren Schwingungsdauer.

3.1.2 Raum mit leichter Dachausführung

Die folgenden Abschnitte geben im einzelnen die Ergebnisse der Messungen wieder, die in dem Raum mit leichter Dachausführung durchgeführt wurden. Die Versuchsbedingungen entsprechen - abgesehen vom Raum selbst - denen der Versuche im Raum mit schwerer Dachausführung, damit die Ergebnisse und damit die Bauweisen miteinander verglichen werden können (vgl. Abschnitt 3.1.3).

Die verwendeten Ausblasewände entsprechen gleichfalls - bis auf die Größe - den in den vorangegangenen Abschnitten beschriebenen Ausblasewänden. Der Dachaufbau wurde nach den ersten Versuchen dem Aufbauprinzip der Ausblasewand Typ II angepaßt, mit dem Unterschied, daß statt der Spanplatten 24 mm dicke Schalbretter unterschiedlicher Breite verwendet wurden. Die Schalbretter wurden in einer der Raumbreite entsprechenden Länge mit 3 bis 6 Nägeln (2,8 mm x 65 mm) auf den Kanthölzern des Tragwerkes befestigt. Bei den ersten Versuchen waren die Bretter zusätzlich mit Dachpappe abgedeckt und ferner eine rückwärtige Druckentlastungsöffnung (siehe Bild 2) - verschlossen entsprechend der Ausblasewand aus Holz Typ I - vorhanden, worauf noch im einzelnen hingewiesen wird.

3.1.2.1 Offener Raum

Die Ergebnisse der Druckmessungen sind in Tabelle 13 und Bild 23 zusammengestellt. Auf die Wiedergabe des Druck-Zeit-Verlaufes wird - wie auch in den nachfolgenden Abschnitten - verzichtet, da kein grundsätzlicher Unterschied zu den Messungen im Raum mit schwerer Dachausführung besteht. Die Abhängigkeit des Maximaldruckes von der Schwarzpulvermenge ist im untersuchten Bereich durch die Ausgleichsfunktion $p = 0,014 \cdot m^{1,6}$ beschrieben, die Dauer der positiven Druckphase beträgt im Mittel $49 \text{ ms} \pm 6 \text{ ms}$.

Tabelle 13

Maximaldrücke p_1 und p_{max} und Dauer der positiven Druckphase t_+ bei der Deflagration von Schwarzpulver im offenen Raum mit leichter Dachausführung und rückwärtiger Druckentlastungsöffnung

Schwarzpulvermenge [kg]	p_1 [bar]	p_{max} [bar]	t_+ [ms]	Bemerkungen
2	-	0,04	55	1) 2) 3)
4	0,024	0,13	56	1) 2) 3)
6	0,14	0,33	42	2)
8	0,16	0,41	44	2) 4) 11 m
10	0,12	0,48	49	1) 4) 12 m

- 1) Dach mit Dachpappe
- 2) Spanplatte vor rückwärtiger Druckentlastungsöffnung nicht gebrochen
- 3) Dach nur beschädigt
- 4) Streuradius der Wurfstücke des Daches

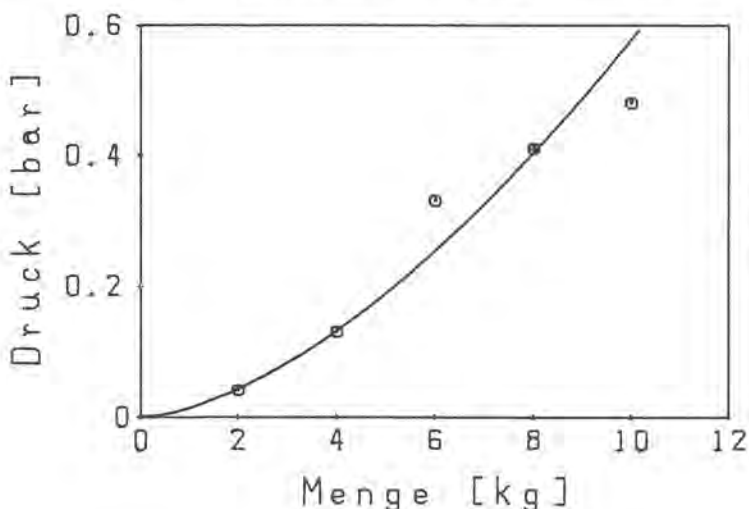


Bild 23
Maximaldrücke in Abhängigkeit von der Schwarzpulvermenge im offenen Raum mit leichter Dachausführung

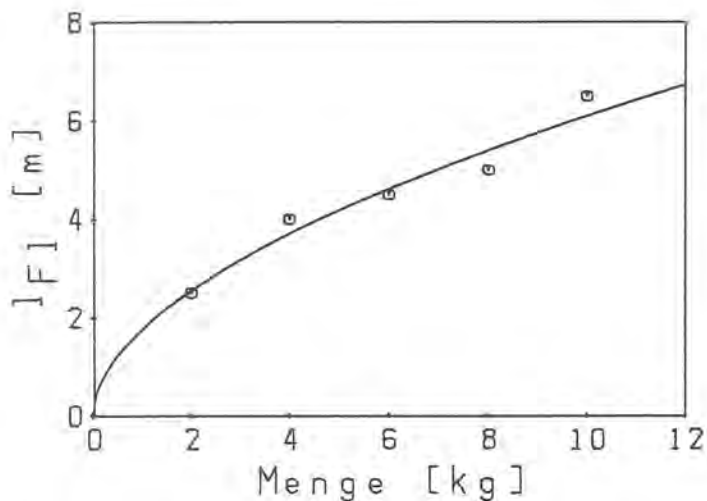


Bild 24

Flammenausbreitung l_{F1} in Abhängigkeit von der Schwarzpulvermenge im offenen Raum mit leichter Dachausführung

Die Flammenausbreitung in Ausblaserichtung betrug für die in Tabelle 13 angegebenen Mengen ansteigend 2,5 m, 4,0 m, 4,5 m, 5,0 m und 6,5 m, die Meßwerte sind in Bild 24 zusammen mit der Ausgleichsfunktion $l_{F1} = 1,8 \cdot m^{0,54}$ grafisch dargestellt.

Die Ergebnisse der Wärmestrahlungsmessungen sind der Tabelle 14 und dem Bild 25 zu entnehmen, die Ausgleichsfunktion ist $E_{max} = 1,5 \cdot m^{1,2}$.

Tabelle 14

Maximale Bestrahlungsstärke E_{max} und Bestrahlung H in 80 m Entfernung, Anstiegszeit t_{max} und Strahlungsanteil an der Explosionswärme Q bei der Deflagration von Schwarzpulver im offenen Raum mit leichter Dachausführung

Schwarzpulvermenge [kg]	E_{max} [mW/cm ²]	H [mJ/cm ²]	t_{max} [ms]	Q [%]
2	3,3	0,47	85	6,6
4	8,4	0,88	72	6,1
10	24,0	2,88	80	8,0

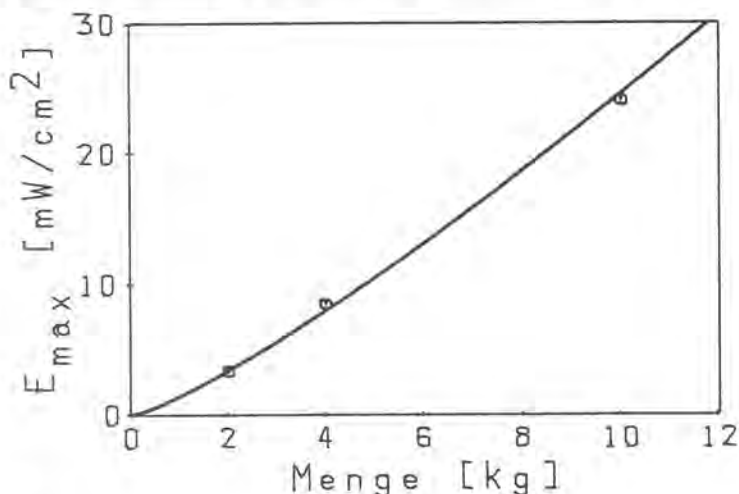


Bild 25

Maximale Bestrahlungsstärke E_{max} in Abhängigkeit von der Schwarzpulvermenge im offenen Raum mit leichter Dachausführung

3.1.2.2 Ausblasewände aus Holz

Aufgrund der vergleichsweise zum offenen Raum höheren Drücke, die im geschlossenen Raum erhalten wurden, war auch die Wirkung auf die einzelnen Druckentlastungsflächen weitaus stärker. Das Dach wurde bei allen Versuchen abgetragen, die einzelnen Bretter wurden dabei bis etwa 20 m hoch geschleudert und im Umkreis von etwa 50 m verstreut (Bild 26). Beim Versuch mit 10 kg Schwarzpulver wurde der Stahlrahmen (mit acht



Bild 26

Umsetzung von 10 kg
Schwarzpulver im Raum mit
leichter Dachausführung
und Ausblasewand aus Holz

M8-Schaftschrauben im Beton verankert) der rückwärtigen Druckentlastungsöffnung weggedrückt und daraufhin diese Öffnung für die weiteren Versuche mit einer Stahlplatte verschlossen. Die Wurfweite von Bruchstücken der Ausblasewände aus Holz betrug teilweise über 110 m und entsprach im übrigen den Wurfweiten, die bei Versuchen im Raum mit schwerer Dachausführung beobachtet werden konnten. Die Ergebnisse der Druckmessungen sind in der Tabelle 15 wiedergegeben und die Maximaldrücke in Abhängigkeit von der Schwarzpulvermenge in Bild 27 dargestellt ($p_{\max} = 0,21 \cdot m^{0,57}$). Die Dauer der positiven Druckphase beträgt im Mittel $41 \text{ ms} \pm 2 \text{ ms}$. Ein deut-

licher Einfluß der rückwärtigen Druckentlastungsfläche auf die Druckentwicklung kann den vorliegenden Meßwerten nicht entnommen werden.

Tabelle 15

Maximaldrücke p_1 und p_{max} und Dauer der positiven Druckphase t_+ bei der Deflagration von Schwarzpulver im Raum mit leichter Dachausführung - Ausblasewände Typ I und Typ II

Schwarzpulvermenge [kg]	p_1 [bar]	p_{max} [bar]	t_+ [ms]	
4	0,06	0,44	42	1)
6	0,07	0,58	43	2)
8	0,10	0,68	42	2)
10	0,24	0,81	36	1)
	0,16	0,85	40	2)
12	0,16	0,79	42	2)
16	0,20	0,98	43	2)

1) Ausblasewand Typ I mit rückwärtiger Druckentlastungsöffnung

2) Ausblasewand Typ II

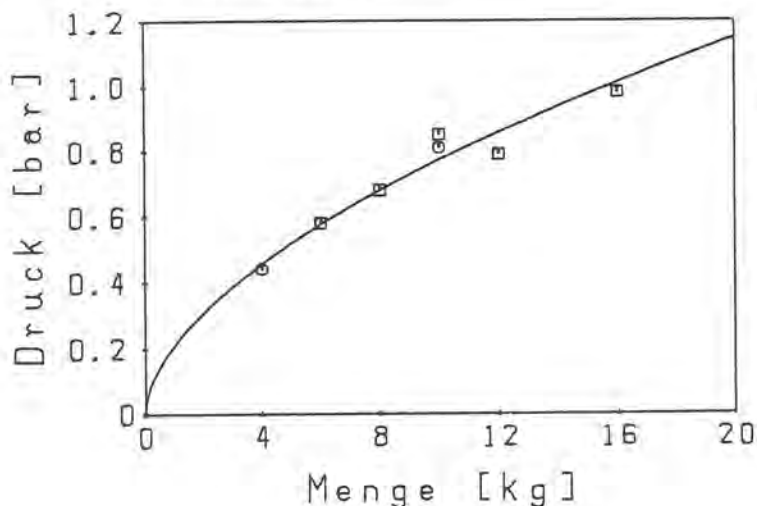


Bild 27

Maximaldrücke in Abhängigkeit von der Schwarzpulvermenge im offenen Raum mit leichter Dachausführung - Ausblasewand Typ I \circ , Typ II \square

Die Flammenausbreitung in Ausblaserichtung l_{F1} betrug mit den in Tabelle 15 angegebenen steigenden Schwarzpulvermengen 4,0 m, 1,5 m, 3,0 m, 4,5/4,0 m, 4,0 m, (4,0 m). Der Wert in Klammern ist aufgrund von Mängeln in der Filmqualität unsicher. Bild 28 zeigt, daß hier wahrscheinlich ein starker Einfluß der Druckentlastung durch das Dach auf die horizontale Flammenausbreitung vorliegt und daher l_{F1} im untersuchten Bereich ab einer bestimmten Menge nur noch schwach anwächst ($l_{F1} = 1,7 m^{0,32}$). Dem wurde in der Abbildung durch

die Darstellung von zwei Geraden statt der oben angegebenen Ausgleichsfunktion Rechnung getragen.

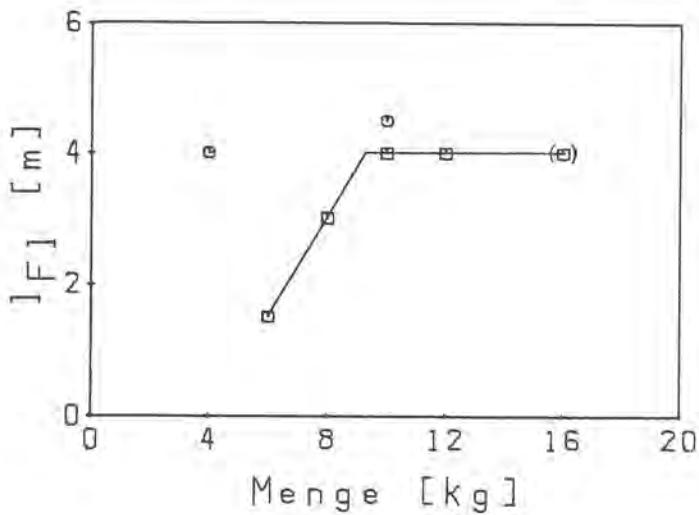


Bild 28

Flammenausbreitung l_{F1} in Abhängigkeit von der Schwarzpulvermenge im Raum mit leichter Dachausführung - Ausblasewand Typ I O, Typ II □ - (unsicher)

3.1.2.3 Ausblasewände aus Kunststoffolie

Zum Vergleich mit den Ergebnissen, die am Raum mit schwerer Dachausführung erhalten wurden (Abschnitt 3.1.1.3), sind zwei Versuche im Raum mit leichter Dachausführung durchgeführt worden. Auf eine grafische Darstellung der wenigen Meßwerte kann verzichtet werden. Im einzelnen wurden mit 10 kg/16 kg Schwarzpulver erhalten:

- Druck P_1 : 0,12 bar/0,25 bar
- Maximaldruck P_{max} : 0,51 bar/0,58 bar und
Ausgleichsfunktion $P_{max} = 0,27 \cdot m^{0,27}$
- Dauer der positiven Druckphase t_+ : 41 ms/42 ms
- Flammenausbreitung l_{F1} : 6,5 m/8,0 m und
Ausgleichsfunktion $l_{F1} = 2,4 \cdot m^{0,44}$

Die Ausgleichsfunktionen sind bei nur zwei Meßwerten nicht vertrauenswürdig und dienen nur zum Vergleich der Meßwerte im Diskussionsteil (Abschnitt 3.1.3)! Die Potenzfunktion wurde aus Analogiegründen gewählt und weil sie den Punkt 0 kg/0 bar berücksichtigt.

3.1.3 Diskussion

In den vorangehenden Abschnitten sind verschiedene Parameter der Deflagration von Schwarzpulver in einem Gebäude in Ausblaseweise zusammengestellt. Diese Parameter ermöglichen zum einen, die Wirkung von potentiellen Unfällen abzuschätzen

und zum anderen, die beiden untersuchten Bauweisen zu vergleichen.

Generell ist festzustellen, daß die beiden Ausblasebauarten mit schwerer und mit leichter Dachausführung im untersuchten Bereich nur im Explosionsparameter Druck und darin auch nur für die Praxis unbedeutend voneinander abweichen. Es wird daher weiterhin durch andere Gesichtspunkte bestimmt werden, welcher Bauweise der Vorzug gegeben wird. Für die leichte Dachausführung sprechen wirtschaftliche Gesichtspunkte (Baukosten) und der bessere Witterungsschutz durch das nach vorn geneigte Dach, die schwere Dachausführung ermöglicht die Auslegung eines Raumes für vergleichsweise höhere Innendrucke und der Schutz des Raumes vor äußerem Brand ist im Bereich des Daches von vornherein gewährleistet. Ebenso bleibt den Explosionswirkungen bei der Bauweise mit schwerer Dachausführung nur eine einzige Vorzugsrichtung, während bei der leichten Dachausführung in allen Richtungen Wurfstücke des Daches zu gegenwärtigen sind. Im einzelnen lassen sich die erhaltenen Ergebnisse folgendermaßen zusammenfassen:

Die Maximaldrücke sind von der Festigkeit der Ausblasewände (Holz- bzw. Folienwand) abhängig (Bild 29), wobei die hier benutzten Folienwände dem Innendruck gegenüber dem offenen Raum keinen oder einen nur geringfügig erhöhten Widerstand entgegensetzen. Dies gilt aber nur unter der Einschränkung, daß sich die Folie im ganzen leicht aus dem Rahmen löst und damit der Druck im Raum nicht bis zum Berstdruck der Folie ansteigen muß, bevor Druckentlastung eintreten kann. Ferner hat es den Anschein, als ob die Ausblasebauart mit leichter Dachausführung bei kleinen Schwarzpulvermengen zu höheren

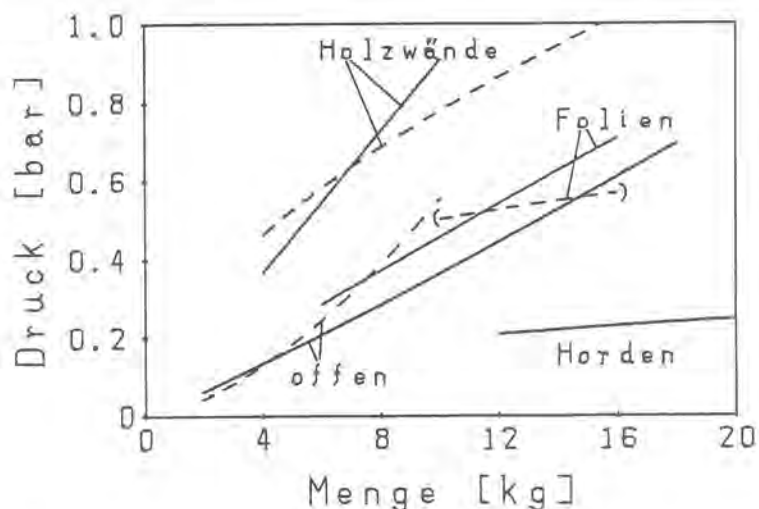


Bild 29

Maximaldruck in
Abhängigkeit von der
Schwarzpulvermenge -
durchgezogene Linien:
schwere Dachausführung
unterbrochene Linien:
leichte Dachausführung

Drücken führt, als die mit schwerer Dachausführung; dies wäre durch die Neigung des Daches und die kleinere vordere Ausblasefläche zu begründen. Bei größeren Schwarzpulvermengen findet man jedoch kleinere Drücke gegenüber den Versuchen mit schwerer Dachausführung, da anscheinend das Dach erst ab einer gewissen Menge erheblich zur Druckentlastung beiträgt.

Von großem Einfluß ist die Verteilung des Schwarzpulvers. Die Versuche mit Schwarzpulver auf Trockenhorden ergaben bis 30 kg Schwarzpulver einen vergleichsweise niedrigen und kaum ansteigenden Maximaldruck. Ab 50 kg Schwarzpulver kommt es zu einem steilen Anwachsen des Maximaldruckes, da sich nun ein rasch wachsender Anteil des Schwarzpulvers - vermutlich aufgewirbelt - gleichzeitig im Raum umsetzt. Der mit 70 kg Schwarzpulver erhaltene Maximaldruck von 2,2 bar, den das Gebäude ohne Schäden überstanden hat, liegt knapp oberhalb der dynamischen Belastbarkeit, auf die in Abschnitt 2.1 eingegangen wurde. Die Eigenschwingzeit t_e der Bauteile, die dieser Belastbarkeitsabschätzung zugrunde gelegt wurden, konnten durch Messungen ($t_e \approx 5$ ms bzw. 15 ms, abhängig von der Lastanstiegszeit $t_1 \approx 20 \dots 25$ ms bzw. 50 ... 75 ms) präzisiert werden. Die Quotienten t_1/t_e sind daher ≥ 4 bzw. ≥ 3 , d. h. nach [9] ist zumindest für das Schadensbild "vollständige Wiederverwendbarkeit" der statische Grenzfall ($t_1 \gg t_e$) bereits annähernd erreicht. Die Belastbarkeit beim statischen Grenzfall entspricht dem oberen Wert des in Abschnitt 2.1 angegebenen Bereiches der dynamischen Belastbarkeit - was durch den o. g. Versuch bestätigt wurde.

Zu den Ergebnissen der Druckmessungen ist noch zu bemerken, daß die Dauer der positiven Druckphase - mit Ausnahme der Versuche mit Schwarzpulver auf Horden - unabhängig von den speziellen Versuchsbedingungen im Mittel 41 ms bis 51 ms beträgt und daß der positiven Druckphase generell eine negative Druckphase folgt. Die Amplitude der negativen Druckphase ist zwar deutlich geringer als die der positiven Druckphase, sie kann aber eine wesentliche Rolle bei der Zerstörung von leichten Bauteilen benachbarter Räume durch Unterdruck (Sog) spielen.

In der Umgebung in größerer Entfernung vom Versuchsraum bestimmten diese negativen Druckphasen den Spitzenwert des

Schalldruckes. Der Schalldruck außerhalb des Versuchsraumes und der Druck im Raum konnten näherungsweise miteinander in Beziehung gesetzt werden. Praktische Bedeutung erhält dieser Befund im Bereich der Unfallaufklärung, wo aus den Folgen des Spitzendruckes außerhalb eines Raumes (Fensterscheibenbruch in anderen Gebäuden) auf den Druck im Innern eines Gebäudes, in dem eine ungewollte Reaktion stattfand, geschlossen werden kann und damit auch auf die Art der Umsetzung.

Die Flammenausbreitung in Ausblaserichtung scheint nur wenig von den verschiedenen Versuchsparametern beeinflusst zu sein (Bild 30), so daß eine einheitliche Funktion für die Mengenabhängigkeit bei der vorliegenden Raumgröße angegeben werden kann: $l_{F1} \approx m^{0,7}$. Üblicherweise werden für den Radius r_{F1} von Feuerbällen bei Deflagrationen oder Detonationen von Feststoffen im Freien Funktionen angegeben, z. B. [16], in die ähnlich der Mengenabhängigkeit des Druckes die Stoffmasse in der dritten Wurzel eingeht, $r_{F1} \sim m^{1/3}$. Hier jedoch wird offensichtlich auch der Exponent der Masse durch die Vorzugsrichtung beeinflusst.

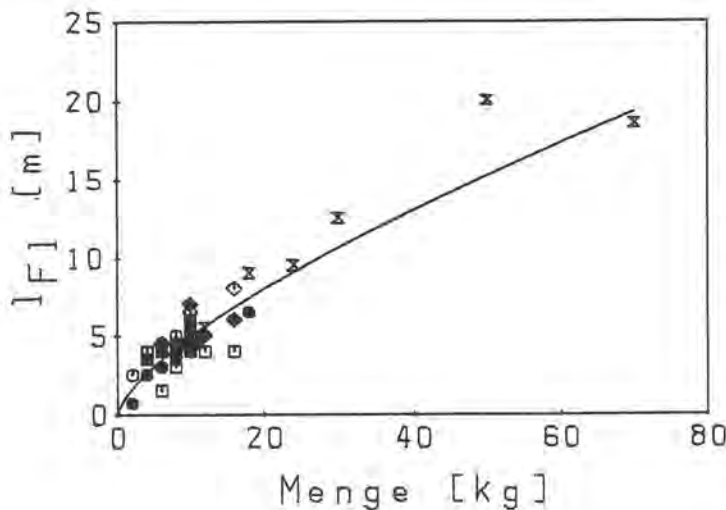


Bild 30

Flammenausbreitung l_{F1} in Abhängigkeit von der Schwarzpulvermenge -
 ○ offen, □ Holzwände,
 ◇ Folien, × Horden
 leere Symbole:
 Raum mit leichter
 Dachausführung
 ausgefüllte Symbole:
 Raum mit schwerer Dachausführung

In rückwärtiger Richtung war die Flammenausbreitung - sofern nicht der Wind wesentlich dazu beitrug - vernachlässigbar, in Übereinstimmung mit den Temperaturen, die an der Ausblasewand des Nachbarraumes gemessen wurden. Sie liefern den Beweis für die Richtigkeit der entsprechenden Bauvorschriften der UVV 46a.

Die Wärmestrahlung in Ausblaserichtung ist in Bild 31 unter verschiedenen Versuchsbedingungen verglichen. Die Potenzfunktionen weichen im allgemeinen nicht wesentlich von einer linearen Mengenabhängigkeit ab. Bei Versuchen im offenen Raum

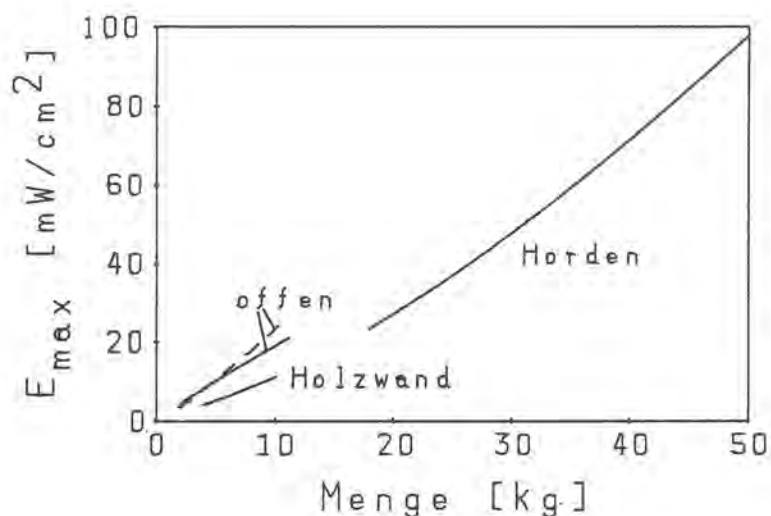


Bild 31

Maximale Bestrahlungsstärke E_{max} in Abhängigkeit von der Schwarzpulvermenge - durchgezogene Linien:
 schwere Dachausführung
 unterbrochene Linien:
 leichte Dachausführung

werden insgesamt 4 % bis 9 % der Explosionswärme als Wärmestrahlung gemessen, bei Versuchen mit Ausblasewänden aus Holz nur 1,5 % bis 2,5 %. Als Erklärung wird angenommen, daß ein wesentlicher Teil der Wärme abgestrahlt wird, während die Holzwände die Flammen gegenüber dem Detektor noch abdecken. Dies macht auch plausibel, daß bei der langsameren Reaktion des Schwarzpulvers auf Horden wiederum 7 % bis 12 % der Explosionswärme gefunden werden (wobei die Umsetzung mit Luftsauerstoff nicht außer acht gelassen werden darf). In dem Zusammenhang ist auch auf die Schwächung der Wärmestrahlung durch die Schwaden hinzuweisen, die durch Messung seitlich von der Druckentlastungsrichtung nachgewiesen wurde. Eine einfache Möglichkeit zur Bestimmung der Aufteilung der Reaktionsenergie in einen mechanischen und einen thermischen Anteil ist auf diesem Wege folglich nicht gegeben.

Ein weiteres Gefahrenmoment außerhalb des Raumes, in dem eine Deflagration stattfindet, sind Wurfstücke leichter Bauteile, die in Ausblaserichtung erhebliche Wurfweiten (über 100 m) unabhängig von der Bauweise aufweisen können. Sowohl die Bruchstücke von Holzwänden als auch heiße Folien können Menschen und Sachen gefährden. Bei der Ausblasebauart mit leichter Dachausführung traten zusätzlich Wurfstücke des Daches auf, die aus etwa 20 m Höhe im Umkreis von 50 m niederfielen. Grundsätzlich lassen sich die Befunde über Wurfweiten derartiger Bruchstücke leichter Bauteile kaum verallgemeinern, da neben dem eigentlichen Wurf auch ein Segeln dieser Bruchstücke berücksichtigt werden muß.

3.2 Versuche mit pyrotechnischen Sätzen

Mit anderen explosionsgefährlichen Stoffen als Schwarzpulver sind Versuche mit Feuerwerkssternen [7] - die in Abschnitt 3.1.1.4 bereits erwähnt wurden - im Raum mit schwerer Dachausführung und Versuche mit Leucht- und Überzündsätzen im Raum mit leichter Dachausführung durchgeführt worden.

3.2.1 Versuche mit Feuerwerkssternen

Die Versuche mit Feuerwerkssternen sollten die Frage beantworten, wie sich größere Mengen von Feuerwerkssternen verhalten, die in einem Raum eines Trockengebäudes in Ausblasebauart mit schwerer Dachausführung in getrocknetem Zustand in Brand geraten. Sie gehen direkt auf den in der Einleitung zu diesem Teil des Berichts erwähnten Unfall zurück. Der Versuchsaufbau und die verwendeten Materialien wurden im einzelnen mit dem Verband der Hersteller pyrotechnischer Gegenstände verabredet. Die untersuchten Höchstmengen sind nach Maßgabe geplanter Genehmigungsverfahren gewählt worden. Untersucht werden sollten Feuerwerkssterne auf der Basis Bariumnitrat-Aluminium und solche mit Chlorat als Oxidationsmittel, beides Sätze der Gruppe 3 der UVV 46 k [8].

3.2.1.1 Materialien und Versuchsaufbau

Der äußere Raum mit schwerer Dachausführung wurde mit der Ausblasewand aus Holz Typ III verschlossen. Diese Ausblasewand (197 cm x 350 cm x 6 cm) mit einer am linken Rand angeschlagenen Tür (98 cm x 199 cm) besteht aus einem Gerüst aus Dachlatten (60 mm x 35 mm) und ist auf einer Seite mit 16 mm dicker Spanplatte und auf der anderen mit 12 mm dicken Schattennutbrettern verkleidet. Sie wurde mit 15 Nägeln (100 mm x 4 mm) an einer Art Holzrahmen befestigt, wodurch sich eine Raumbreite von 2,3 m (Volumen 14,5 m³, Ausblasefläche 19 %) ergab. Zusätzlich zu den in [7] beschriebenen Versuchen wurde noch ein Versuch mit einer Ausblasewand Typ I zum Vergleich durchgeführt.

Das Versuchsmaterial waren rote Feuerwerkssterne (55 % KClO₃, 14 % SrC₂O₄·H₂O, 14 % SrCO₃, 13 % Akaroidharz, 4 % Dextrin) und silberne Feuerwerkssterne (25 % Ba(NO₃)₂, 29 % 2K-Mehl-

pulver aus 80 % KNO_3 und 20 % Holzkohle, 20 % Al, 7 % KNO_3 , 3 % Akaroidharz und 3 % Dextrin). Die thermochemisch abgeschätzten Explosionswärmen betragen etwa 3000 kJ/kg für den roten und etwa 6000 kJ/kg für den silbernen Sternsatz. Die Sterne hatten eine Korngröße von 5 mm bis 8 mm. Sie waren (rot bzw. silber) jeweils mit einer Anfeuerung aus Schwarzpulver von etwa 15 % der Sternmasse überzogen.

Die Feuerwerkssterne wurden auf 7, 14, 21 bzw. 28 Horden verteilt (7,1 kg bis 7,2 kg Sterne pro Horde), entsprechend den 50 kg, 100 kg, 150 kg bzw. 200 kg der roten bzw. silbernen Feuerwerkssterne pro Versuch. Eine Trockenhorde besteht aus einem Holzrahmen (45 cm x 100 cm), ist quer geteilt, mit Maschendraht (Messing) bespannt und zusätzlich mit Natronkraftpapier belegt. Ein Stahlregal (Höhe 190 cm, Tiefe 80 cm, lichte Auflagelänge 185 cm) konnte auf 7 Etagen 28 Horden aufnehmen, beginnend in 46 cm Höhe mit einem Etagenabstand von 24 cm. Das Regal stand an der rechten Seitenwand (Abstand ca. 10 cm), so daß die Horden mit einer Schmalseite an die Wand stießen.

Das Regal wurde derart belegt, daß bei Zündung in der untersten Lage eine möglichst gleichzeitige Reaktion aller Sterne erreicht wird. Die Zündpille wurde mit einem etwa 5 cm langen Stoppinenstück verbunden.

Der Druckverlauf wurde an der linken Seitenwand und an der Rückwand gemessen. Zum zusätzlichen Schutz vor Wärmebelastung waren die Druckaufnehmer im Abstand von 1 cm mit einer Stahlplatte (130 mm x 80 mm x 2 mm) abgedeckt. Der Einfluß dieser Schutzplatte wurde durch Druckmessungen bei Explosionen von 8 kg Schwarzpulver im offenen Raum untersucht.

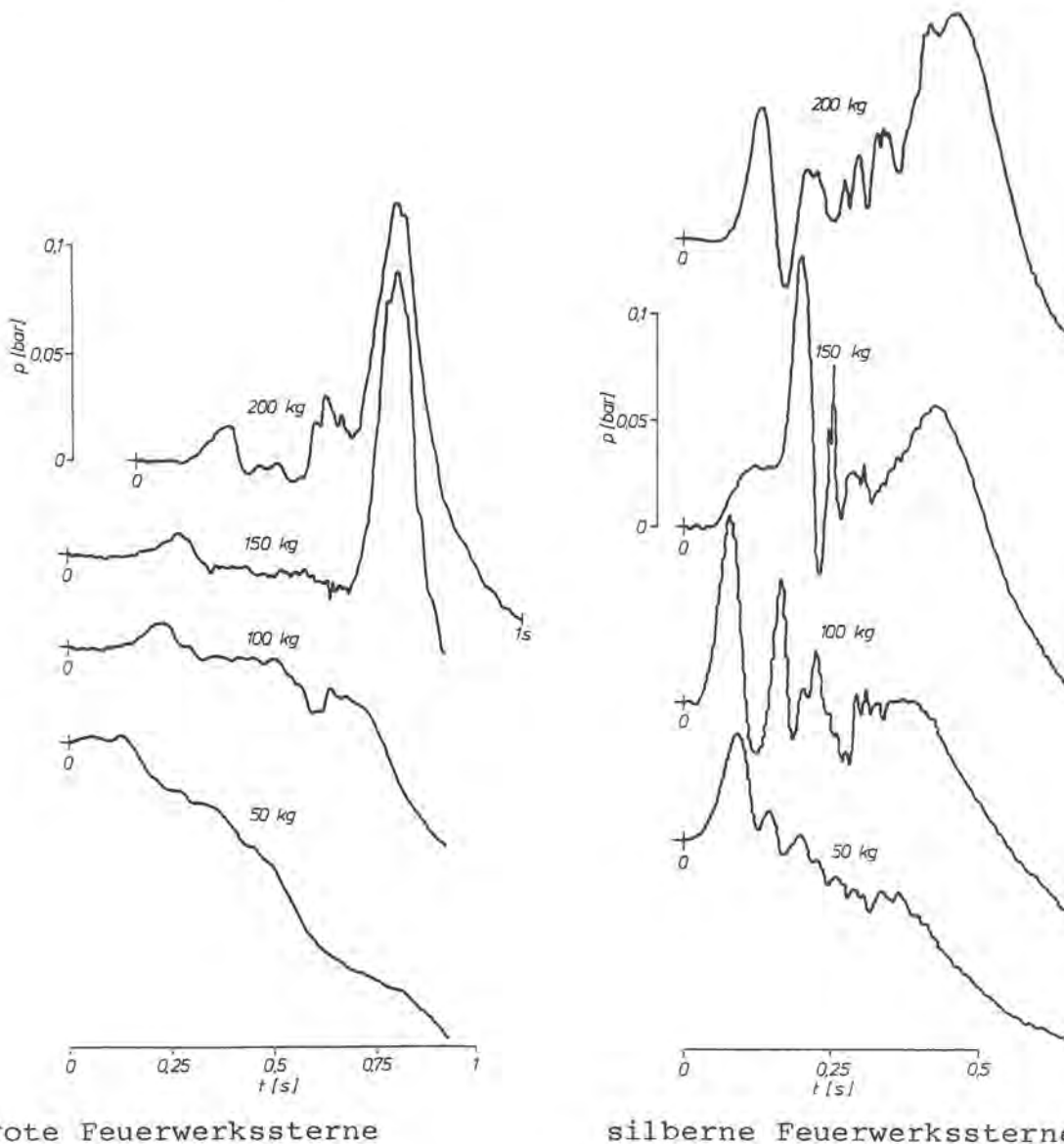
Die Unterschiede zwischen ungeschützten und abgedeckten Druckaufnehmern liegen innerhalb der Standardabweichungen der Meßwerte, so daß die Abdeckung der Druckaufnehmer weder zu einer Verfälschung des Maximaldruckes p_{\max} noch zu Abweichungen im zeitlichen Verlauf des Druckes, hier dargestellt durch die Dauer der positiven Druckphase t_+ , führt.

Aufgrund der relativ langen Dauer des Druckmeßvorganges (0,5 s bis 2 s) machen sich die Erwärmung der Membran der Druckaufnehmer und die Drift im Ladungsverstärker in einer Absenkung der Grundlinie nach etwa 300 ms bemerkbar. Diese

Absenkung der Grundlinie wurde bei der Auswertung der Versuche mit größeren Mengen, bei denen in diesem Bereich wesentliche Druckmaxima auftraten, berücksichtigt.

3.2.1.2 Meßwerte

Der Ablauf der Umsetzung nach Zündung der Sterne ist am einfachsten anhand des Druckverlaufs (Bild 32) zu erläutern.



rote Feuerwerkssterne

silberne Feuerwerkssterne

Bild 32

Druck-Zeit-Verlauf bei Versuchen mit Feuerwerkssternen
(0 s ist hier der Zündzeitpunkt)

Die erste Druckspitze (vgl. Tabelle 16) ist auf die Zerlegung der Ausblasewand oder zumindest auf das Aufgehen der Tür zurückzuführen. Auch die Filmaufzeichnungen ließen erkennen, daß eine derartige Druckentlastung im Falle der roten Sterne

Tabelle 16

Maximaldrücke p und Zeiten nach der Zündung t
bei Versuchen mit Feuerwerkssternen

Menge [kg]		1. Druckspitze		höchste Druckspitze	
		p [bar]	t [ms]	p [bar]	t [ms]
50	rote Sterne	0,01	235	0,01	235
100		0,01	280	0,02	715
150		0,01	285	0,14	820
200		0,02	255	0,11	705
50	silberne Sterne	0,05	145	0,05	145
100		0,09	110	0,09	110
100 ¹⁾		0,02	290	0,10/0,08	435/690
150		0,03	145	0,11	215
200		0,06	145	0,11	485

1) Ausblasewand Typ I, Sterne 1 Jahr gelagert

nach mehr als 0,2 s und im Falle der silbernen Sterne nach weniger als 0,2 s eintrat. Danach ist die Umsetzung mehr oder weniger ungleichmäßig, lediglich die letzte, meist höchste Druckspitze ist der gleichzeitigen Reaktion eines größeren Teils der Sterne zuzuordnen. Auf die Darstellung des Maximaldruckes in Abhängigkeit von der Menge wird verzichtet, da diese Maximalwerte aus verschiedenen Reaktionsphasen stammen und eine allgemeine Extrapolation der Maximaldrücke zu großen Mengen nicht erlauben.

Der Versuch mit der Ausblasewand Typ I wurde ein Jahr später als die anderen durchgeführt. Offensichtlich hat sich die Umsetzungsgeschwindigkeit der silbernen Sterne während der Lagerung derart verlangsamt, daß entsprechende Reaktionsphasen gegenüber den anderen Versuchen nach etwa der doppelten Zeit zu finden sind. Ansonsten tritt kein Unterschied im Verhalten der silbernen Sterne mit verschiedenen Ausblasewänden auf. Dies deckt sich mit den entsprechenden Versuchen mit Schwarzpulver und verschiedenen Ausblasewänden aus Holz. Der Druck p_1 ist - wie auch der Versuch mit der Wand Typ I zeigt - in erster Linie von der Druckanstiegsgeschwindigkeit (vgl. t_1) abhängig.

Tabelle 17

Flammenausbreitung l_{F1} und Reichweite von Brandspuren l_{Br} bei Versuchen mit Feuerwerkssternen

Menge [kg]	rote Sterne		silberne Sterne	
	l_{F1}	l_{Br} [m]	l_{F1}	l_{Br}
50	9		10	
100	13		‡ 22	
100 ¹⁾			24	
150	ca. 22	14	‡ 22	24
200	‡ 22	18	‡ 22	32

1) Ausblasewand Typ I, Sterne 1 Jahr gelagert

Wurfstücke der Ausblasewand flogen bei den Versuchen mit 50 kg und 100 kg der Sterne bis ca. 15 m weit, während bei den Versuchen mit den größeren Mengen selbst große Teile 40 m bis 70 m weit geschleudert wurden.

Die Flammenausbreitungen l_{F1} in Ausblaserichtung sind in Tabelle 17 zusammengestellt. Bei den größeren Mengen (150 kg und 200 kg) reichte der Bildausschnitt der 8-mm-Kamera nicht zur Erfassung der Flammenfront aus. Zum Vergleich sind daher die Reichweiten l_{Br} der Brandspuren an der Bodenvegetation angegeben. Die maximale Flammenausbreitung kann daher auf etwa 25 m für rote Sterne und etwa 40 m für silberne Sterne geschätzt werden.

Die rückwärtige Flammenausbreitung um die äußere Widerstandswand herum betrug 0,5 m bis mehr als 2 m.

Bemerkenswert waren die hohen Temperaturen, die an der Ausblasewand des Nachbarraumes gemessen wurden. Sie waren bei den silbernen Sternen höher als bei den roten und stiegen mit der Menge an. So wurden z.T. über 500°C gemessen, wobei die Temperatur einige Sekunden lang höher als ihr halber Maximalwert - also von relativ langer Einwirkdauer - war.

Die Ergebnisse der Wärmestrahlungsmessungen sind in Tabelle 18 und Bild 33 dargestellt. Der Meßabstand betrug 105 m.

Tabelle 18

Maximale Bestrahlungsstärke E_{\max} und Bestrahlung H in 105 m Entfernung, Anstiegszeit t_{\max} und Strahlungsanteil an der Explosionswärme Q bei Versuchen mit Feuerwerkssternen

Menge [kg]		E_{\max} [mW/cm ²]	H [mJ/cm ²]	t_{\max} [s]	Q [%]
100		29,3	19,7	0,63	8,9
150	rote	46,9	29,5	0,48	8,9
200	Sterne	41,4	30,0	0,54	6,8
50		61,9	56,0	0,41	25,2
100	sil-	151	113	0,42	25,3
100 ¹⁾	berne	102	96,1	0,56	22,3
150	Sterne	224	163	0,46	24,5
200		282	230	0,38	25,8

1) Ausblasewand Typ I, Sterne 1 Jahr gelagert

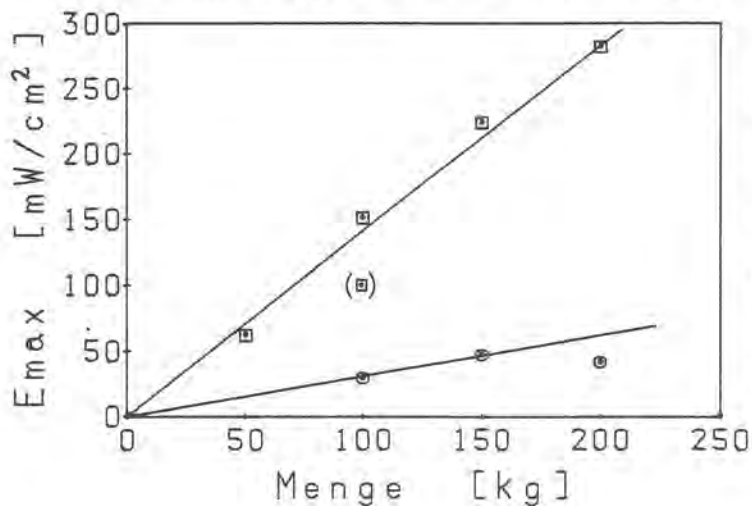


Bild 33

Maximale Bestrahlungsstärke E_{\max} in Abhängigkeit von der Menge bei Versuchen mit Feuerwerkssternen -
 ○ rote Sterne, □ silberne Sterne, (□)
 Ausblasewand Typ I und Sterne 1 Jahr gelagert

Die maximale Bestrahlungsstärke nimmt linear mit der Menge zu. Das Abweichen des Meßwertes für 200 kg roter Sterne kann dadurch erklärt werden, daß zum Zeitpunkt des Strahlungsmaximums der Detektor nicht mehr den gesamten Flammenball erfaßte. Während die Aufnahmen der 8-mm-Kamera bei den Versuchen mit silbernen Sternen zu diesem Zeitpunkt maximal 9 m hohe Flammenbälle zeigen, findet man bei den Versuchen mit roten Sternen schon bei 150 kg eine Höhe von 10 m und bei 200 kg einen darüber hinausgehenden Wert. Bei einem Öffnungswinkel von 7°

ist das Blickfeld des Detektors an der Vorderkante des Versuchsgebäudes auf 8,4 m Höhe begrenzt.

3.2.2 Versuche mit Leuchtsätzen

In dem Raum mit leichter Dachausführung wurden zur Überprüfung der im Betrieb einer pyrotechnischen Fabrik üblichen Mengen Versuche mit Leuchtsätzen durchgeführt. Diese Sätze sind aufgrund ihrer Zusammensetzungen nach der Beispielsammlung der UVV 46 k (Anlage 1) [8] der Gruppe 3 zuzuordnen. Sie dürfen in Mengen bis zu 10 kg von Hand gemischt werden, und in Räumen zum Verarbeiten dieser Sätze ist für das Einfüllen von Hand in Gegenstände gleichfalls diese Menge zulässig.

3.2.2.1 Materialien und Versuchsaufbau

Die Leuchtsätze waren ein grüner Leuchtsatz auf der Basis Bariumnitrat-Magnesium, ein weißer Leuchtsatz auf der Basis Bariumnitrat-Kaliumnitrat-Magnesium und ein Überzündsatz, bestehend aus einer Mischung aus dem weißen Leuchtsatz und einem Zwischensatz auf der Basis Bariumnitrat-Kaliumnitrat-Silicium. Die thermochemisch abgeschätzten Explosionswärmen betragen 3400 kJ/kg für den grünen Leuchtsatz, 6500 kJ/kg für den weißen Leuchtsatz und 4900 kJ/kg für den Überzündsatz. Die Sätze wurden entweder, wie üblich, in loser Schüttung auf einem Tisch oder in einer Papptrommel (29 cm oder 14,5 cm hoch, 30 cm Durchmesser, 3 mm Wanddicke), die auf dem Tisch steht, von unten gezündet. Dadurch ist die stärkste Wirkung unter den jeweiligen Versuchsbedingungen gewährleistet.

Der Raum mit leichter Dachausführung war mit Ausblasewänden aus Holz (Typ II) und entsprechendem Dach verschlossen.

3.2.2.2 Meßwerte

Die Ergebnisse der Druckmessungen sind in Tabelle 19 zusammengestellt. Bis auf einen Versuch (Bild 34) war in allen Fällen nur ein Druckmaximum festzustellen.

In Übereinstimmung mit dem langsamen Druckanstieg und dem geringen Maximaldruck blieben die Ausblaseeinrichtungen (Dach und Front) bei den Versuchen mit grünem Leuchtsatz und mit

Tabelle 19

Maximaldruck P_{max} , Zeit nach der Zündung t_{max} und Dauer der positiven Druckphase t_+ bei Versuchen mit Leuchtsätzen

Stoff	Anordnung	Menge [kg]	P_{max} [bar]	t_{max} [ms]	t_+ [ms]
Leuchtsatz, weiß	lose Schüttung	5	0,06	166	./.
	Trommel	5	0,07	137	55
			0,15	344	4
			0,28	367	16
	Trommel	10	2,16	62	25
Leuchtsatz, grün	lose Schüttung	5	nicht meßbar		
	Trommel	5	0,01	698	355
Überzündsatz	lose Schüttung	5	0,09	344	50
	Trommel	5	0,02	547	331

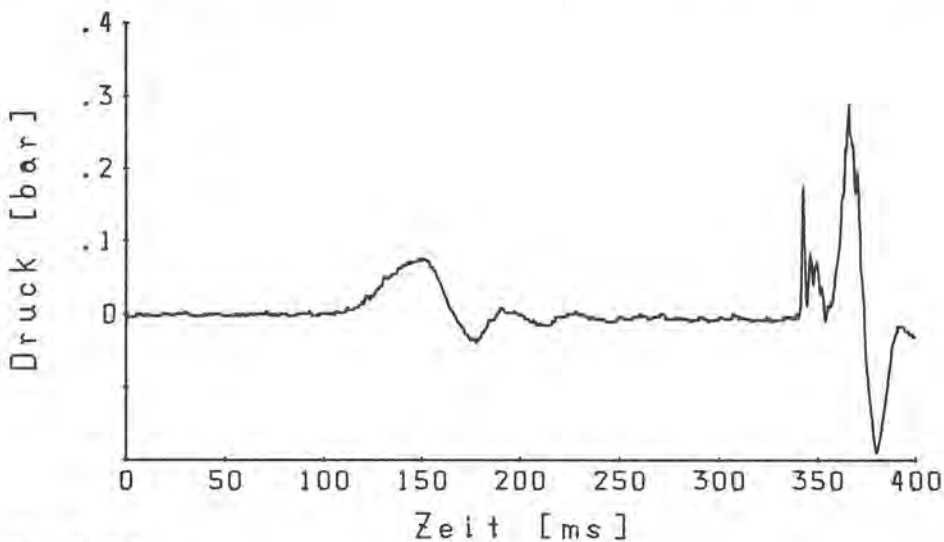


Bild 34

Druck-Zeit-Verlauf beim Versuch mit 5 kg weißen Sternsatzes in einer Papptrommel

Überzündsatz in der Trommel völlig oder fast unbeschädigt. Es ist hier von einem Abbrand zu sprechen. Die Druckentlastung setzt bei Drücken ab etwa 0,06 bar ein; soweit sie gemessen wurden, liegt die Dauer der positiven Druckphase, bedingt

durch den Entlastungsvorgang, bei etwa 50 ms (Versuche mit losen Schüttungen weißen Leuchtsatzes und Überzündsatzes).

Diese Druckentlastung findet auch bei dem in Bild 34 dargestellten Versuch statt (1. Druckmaximum). Hier brennt offensichtlich etwa 200 ms lang der Satz in der Trommel lediglich ab. Dann setzen steile Druckspitzen ein, die als Oszillationen gedeutet werden könnten. Anschließend beendet die höchste Druckspitze, mit der spätestens die Trommel zerlegt wurde, den Druck-Zeit-Verlauf. Bei Verdoppelung der Satzmenge (10 kg) setzt die Deflagration mit Zerlegung der Trommel sofort nach einer Zündverzugszeit von 65 ms ein. Der Maximaldruck von mehr als 2 bar führte zu Ribildungen an den Stahlbetonbauteilen des Raumes, im wesentlichen an der Rückwand oberhalb des Fensters und an dem Unterzug der Vorderseite.

Die beobachteten Abbrandzeiten - Dauer der Flammerscheinungen - stimmen gut mit den Druckmessungen überein. So brannte der weiße Leuchtsatz am schnellsten ab (5 kg in ca. 1 s bis 3 s, 10 kg deflagrierten), der Überzündsatz brannte etwa 4 s bis 5 s und der grüne Sternsatz etwa 15 s bis 20 s.

Die Wirkung der Versuche mit Leuchtsätzen auf die Umgebung entspricht ungefähr der Höhe des jeweiligen Innendruckes. Erhebliche Wurfweiten von Spanplattenbruchstücken (über 20 m) sind nur beim Versuch mit 10 kg weißen Sternsatzes aufgetreten. Desgleichen die Flammenausbreitung in Ausblaserichtung, die allgemein nur 1 m bis 2 m und mit 10 kg des weißen Sternsatzes etwa 10 m betrug.

3.2.3 Diskussion

Während in Abschnitt 3.1 die Untersuchung äußerer Einflußgrößen im Vordergrund stand, sind bei den Versuchen mit pyrotechnischen Sätzen die Stoffeigenschaften von besonderer Bedeutung. Dies läßt sich besonders leicht an den unterschiedlichen Umsetzungsgeschwindigkeiten zeigen, die unter anderem auch durch die Explosionswärme bestimmt werden. Für die Leuchtsätze (einschließlich Überzündsatz) untereinander galt, daß die Brenndauer und die Dauer der Überdruckphase umgekehrt proportional zur Explosionswärme war, für die Feuerwerksster-

ne galt dies grundsätzlich auch (Druck, Wärmeentwicklung), nur nicht hinsichtlich der sichtbaren Flammerscheinungen. Will man die Reaktionen aufgrund der Umsetzungsgeschwindigkeiten klassifizieren [5], so reicht das Verhalten vom eindeutigen Abbrand des grünen Leuchtsatzes über die langsame Deflagration, z. B. der Feuerwerkssterne, bis hin zur schnellen Deflagration der 10 kg weißen Sternsatzes in der Papptrommel. Entsprechend unterschiedlich ist auch die Belastung des Versuchsgebäudes. Abbrand und langsame Deflagration belasten das Gebäude bzw. seine widerstandsfähigen Bauteile mechanisch praktisch nicht. Gerade die Versuche mit Leuchtsätzen zeigen aber, wie stark mengenabhängig das Verhalten der Stoffe und die resultierende Gebäudebelastung sein kann, welche dann in einem Fall zur Beschädigung widerstandsfähiger Bauteile des Versuchsraumes führte. (Auf diese Mengenabhängigkeit - bedingt durch die mit der Menge steigende Eigenverdämmung - wird in den anderen Teilen des Berichtes noch eingegangen werden). Daher ist ein Übertragen von Versuchsergebnissen, die mit kleinen Mengen bzw. Ladedichten (Stoffmenge pro Volumen des betrachteten Raumes) erhalten wurden, auf größere Maßstäbe ohne genaue Kenntnisse des Verhaltens der jeweiligen Stoffe problematisch. So ist bei Anwendung derartiger Versuchsergebnisse in der Praxis stets zu überlegen, wie weit die Bedingungen im Versuch und in der Praxis vergleichbar sind, damit nicht unter abweichenden Bedingungen ein völlig anderes Verhalten des betrachteten Stoffes eintritt. Die Mengensteigerung hat z. B. bei dem weißen Sternsatz eine Änderung des Reaktionsmechanismus hervorgerufen, die bei einem Stoff der Gruppe 3 der UVV 46 k nicht auftreten sollte.

Die Flugweite von Bruchstücken der Ausblasewand ist stark von der Menge des umgesetzten Stoffes und nicht nur vom Druck im Raum abhängig. So sind bei den Versuchen mit Feuerwerkssternen teilweise erhebliche Wurfweiten aufgetreten, während bei den Versuchen mit Leuchtsätzen bei ähnlich niedrigen Drücken die Wurfweiten wesentlich kleiner waren. Entscheidend ist also auch die freiwerdende Gasmenge.

Dies ist ebenfalls der Fall bei der Flammenausbreitung in Ausblaserichtung. In Bild 35 sind die mit pyrotechnischen Sätzen

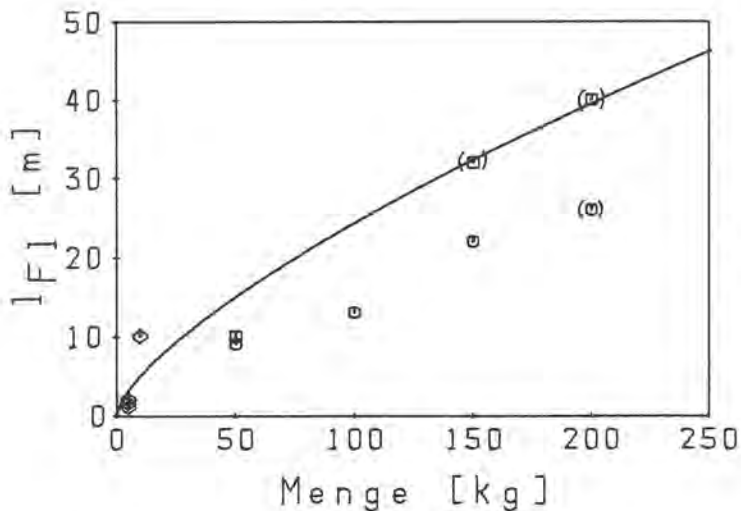


Bild 35

Flammenausbreitung l_{F1} pyrotechnischer Sätze im Vergleich zur Flammenausbreitung bei Versuchen mit Schwarzpulver (Kurve) - ◇ Leuchtsätze, ○ rote Feuerwerkssterne, □ silberne Feuerwerkssterne, (geschätzt aufgrund der Reichweite von Brandspuren)

gemessenen Werte der Ausgleichskurve gegenübergestellt, die aus allen mit Schwarzpulver erhaltenen Werten berechnet wurde. Obwohl zu den Schwarzpulverwerten ein vielfach höherer Druck gehört, gleichen die Flammenausbreitungen sich in der Größenordnung. Ein wesentliches Zurückschlagen der Flammen ist nur bei den Versuchen mit Feuerwerkssternen beobachtet worden. Dies ist in Übereinstimmung mit den langanhaltenden und hohen Temperaturen, die an der Ausblasewand des Nebenraumes gemessen wurden. Bei derartig großen Mengen müssen also Anforderungen an die Feuerwiderstandsfähigkeit der Ausblasewände gestellt werden, wenn verhindert werden soll, daß bei einem Unfall in einem Reihengebäude die Reaktion von einem Raum zum anderen übertragen werden kann. Bei Ausblasewänden aus Kunststoffolien ist diese Feuerwiderstandsfähigkeit sicherlich nicht gegeben.

Die Wärmestrahlungsmessungen an Feuerwerkssternen ergaben wesentlich höhere Strahlungsanteile an der Explosionswärme (etwa 9 % bzw. 25 %, rot bzw. silber), als bei vergleichbaren Versuchen mit Schwarzpulver in loser Schüttung in Ausblaserichtung gefunden wurden (1,5 % - 2,5 %). Die Größe des Strahlungsanteils könnte unter anderem umgekehrt proportional zu der freiwerdenden Gasmenge sein, wobei die geleistete Volumenarbeit, die nur einen kleinen Teil der Explosionswärme ausmacht, nicht der Grund für den Einfluß der Gasmenge sein kann. Das Normalgasvolumen (0°C, 1 bar)

beträgt thermochemisch berechnet für den roten Sternsatz etwa 260 l/kg und für den silbernen Sternsatz etwa 100 l/kg. Das Normalgasvolumen von Schwarzpulver entspricht etwa dem des roten Sternsatzes. Hier kommt bei der schnellen Umsetzung

des Schwarzpulvers zum Tragen, daß die Sicht des Detektors auf die Reaktionszone zeitweilig verdeckt ist, was für die langsame Reaktion der Sterne nicht gilt. Der Raum ist bei der langsameren Reaktion der Sterne als praktisch offen anzusehen, so daß mit den Strahlungsanteilen verglichen werden muß, die für Schwarzpulver im offenen Raum gefunden wurden (4 % bis 9 %), oder mit dem langsamer reagierenden Schwarzpulver auf Horden (7 % bis 12 %). Ferner sei auch an den größeren Einfluß der Reaktion mit dem Luftsauerstoff bei langsameren Reaktionen erinnert.

3.3 Versuche mit pyrotechnischen Mitteln

Pyrotechnische Mittel sind sowohl pyrotechnische Gegenstände, die dem Sprengstoffgesetz unterliegen als auch pyrotechnische Munition, die Gegenstand des Waffengesetzes ist. Das Verhalten pyrotechnischer Mittel in großen Mengen im Falle einer ungewollten Zündung interessiert meist im Zusammenhang mit der Lagerung bzw. dem Transport. Auch hier ist zum einen die Belastung z. B. eines Lagergebäudes von Interesse und zum anderen die Gefährdung der Umgebung. Die Lagerung pyrotechnischer Gegenstände ist durch die 2. SprengV [1] geregelt. Die Zuordnung dieser Gegenstände zu Lagergruppen (vgl. Abschnitt "Begründung") hilft, Aussagen über mögliche Gebäudebelastungen und Gefährdungen der Umgebung zu machen. So kann bei Gegenständen der Lagergruppe 1.1 (Massenexplosion) die gesamte Satzmenge (explosionsgefährliche Stoffe) einer derartigen Betrachtung zugrunde gelegt werden, während bei Gegenständen der Lagergruppe 1.2 (Sprengstücke) hinsichtlich der Gebäudebelastung die Satzmenge pro Gegenstand und hinsichtlich der Gefährdung der Umgebung noch die Zahl der Gegenstände zu berücksichtigen ist. Bei der Lagergruppe 1.3 (Massenfeuer) ist wiederum die gesamte Satzmenge zu betrachten, nur daß im Gegensatz zur Lagergruppe 1.1 keine wesentliche Druckwirkung neben der thermischen Wirkung auftritt. Gegenstände der Lagergruppe 1.4 sollten weder für ein Gebäude eine wesentliche Belastung bedeuten können, noch die Umgebung gefährden. Nähere Einzelheiten zu den Lagergruppen sind dem Teil IV dieses Berichtes zu entnehmen.

Das Waffenrecht kennt keine den Lagergruppen entsprechende Einteilung der pyrotechnischen Munition, ebensowenig wird

die Lagerung selbst geregelt, mit Ausnahme der Lagerung im Zusammenhang mit dem Vertrieb. (Der Hersteller hat die pyrotechnische Munition nach den Vorschriften der UVV 46 a [5] zu lagern, die innerbetrieblich mit den Vorschriften der 2. SprengV übereinstimmen; im übrigen unterliegt pyrotechnische Munition, z. T. in einer entsprechenden Einteilung [34], den einschlägigen Transportvorschriften). So erlaubt z. Z. die Erste Verordnung zum Waffengesetz (1. WaffV [18]) die Aufbewahrung im Verkaufsraum bis zu einem Bruttogewicht von insgesamt 20 kg, sofern die pyrotechnische Munition nicht mehr als jeweils 20 g Treibladung und pyrotechnischer Sätze und Geschosse nicht mehr als 10 g pyrotechnischer Sätze enthalten. In einem Nebenraum ist die Aufbewahrung dieser Gegenstände bis zu einem Bruttogewicht von insgesamt 60 kg zulässig. Ferner erlaubt die Allgemeine Verwaltungsvorschrift zum Waffengesetz (WaffVwV [19]) die Aufbewahrung pyrotechnischer Munition der Klasse PM I mit Genehmigung der zuständigen Behörde in einem besonderen Raum bis zu 200 kg Bruttogewicht. Da einerseits die 1. WaffV nicht zwischen der weniger gefährlichen Munition der Klasse PM I und der gefährlicheren Munition der Klasse PM II unterscheidet und andererseits Bestrebungen im Gange sind, die Bestimmungen der WaffVwV auch auf Munition der Klasse PM II zu erweitern, wurde das Verhalten eines typischen und verbreiteten Vertreters der Klasse PM II in den genannten Mengen bei Zündung in einem Raum untersucht.

3.3.1 Materialien und Versuchsaufbau

Das Versuchsmaterial waren pyrotechnische Knallgeschosse, 15 mm, deren Handelsnamen wie z. B. Vogelschreck oder Starenschreck auf die gedachte Verwendung im Obst- und speziell Weinanbau hinweist. Bild 36 zeigt das Aufbauprinzip des Geschosses, das keine eigene Treibladung besitzt und nur unter Verwendung von zusätzlichen Treibladungen (6-mm-Flobert-Platzpatronen) aus entsprechenden Waffen verschossen werden kann. Hier enthielt das Knallgeschosß jeweils 1,1 g Knallsatz (70 % Kaliumperchlorat und 30 % Aluminium) und 2,5 g Schwarzpulver als Anfeuerung (75 % Kaliumnitrat, 10 % Schwefel und 15 % Holzkohle). Der Knallsatz oder Blitzsatz bestimmt die hohe Gefährlichkeit dieser Munition, da er sich um ein Vielfaches schneller umsetzen kann als z. B. Schwarzpulver und er

wenigstens detonationsartig reagiert, d. h. er benötigt zumindest in etwas größeren Mengen keinen Einschluß, um sich derartig heftig umzusetzen, und bei seiner Reaktion können Druckstöße auftreten, die vergleichbar mit den Stoßwellen von Detonationen sind.

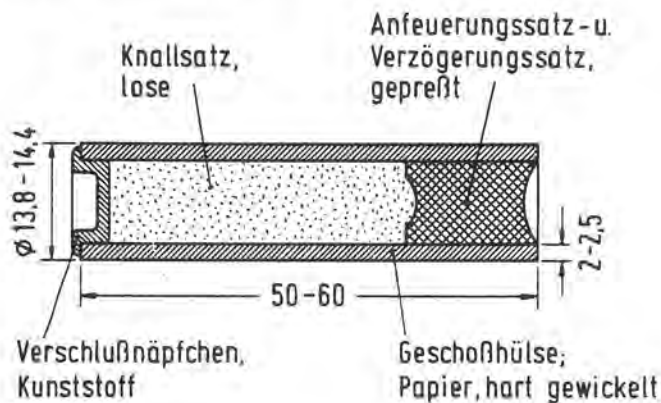


Bild 36

Knallgeschosß - schematisch

Maße in mm

Die Knallgeschosse waren auf zwei verschiedene Arten verpackt:

- Holzkiste (680 mm x 380 mm x 250 mm, Brettdicke 11 mm) mit 40 Faltschachteln aus Pappe (156 mm x 110 mm x 70 mm) mit je 100 Stück Knallgeschossen (Bild 37, geöffnet und mit Anzündung).
- Pappkarton (640 mm x 370 mm x 270 mm) mit 40 Faltschachteln aus Pappe (300 mm x 60 mm x 70 mm) mit je 100 Stück Knallgeschossen.

Obwohl aufgrund des Aufbaus der Knallgeschosse und ihrer Verpackung nicht mit einer Massenexplosion gerechnet wurde, sind zunächst orientierende Versuche mit steigenden Mengen und gleichzeitiger Druckmessung durchgeführt worden. Diese Versuche wurden mit einer Innenzündung eingeleitet. Die Montagekunststoffhülsen der üblichen Zündpillen wurden derart gekürzt, daß die eigentlichen Zündpillen (Glühbrücke mit Anzündsatz) freilagen und mit Klebeband über den Anfeuerungen von zwei Knallgeschossen in der Mitte einer Faltschachtel fixiert. Diese Faltschachtel wurde immer möglichst in der Mitte des gesamten Versuchsmaterials untergebracht (vgl. Bild 37). Die Mengen und die Anordnung des Versuchsmaterials sind im einzelnen in der Tabelle 20 aufgeführt, das Versuchsmaterial wurde auf dem üblichen Tisch liegend gezündet.

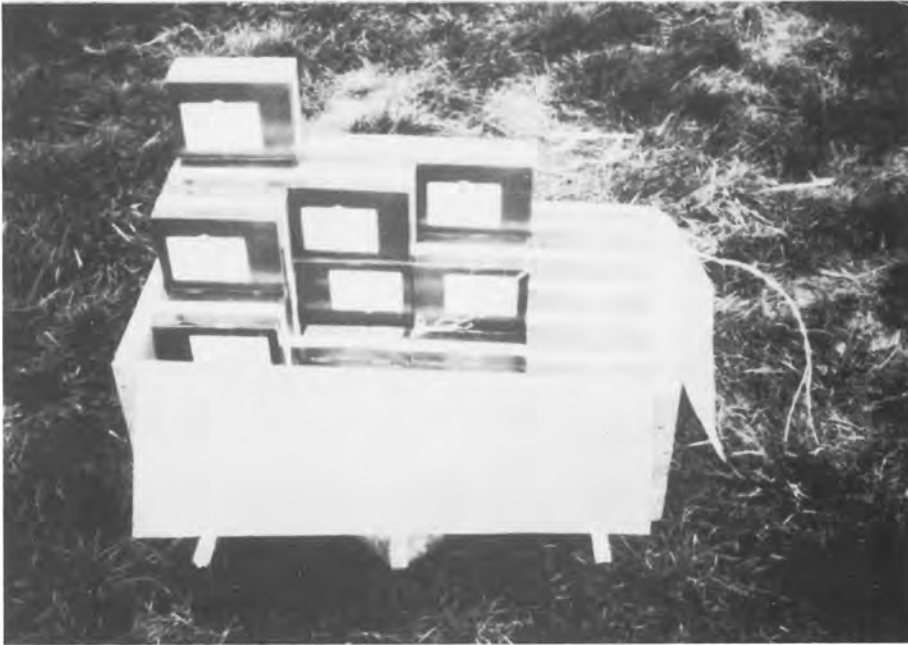


Bild 37

Holzkrise mit Knall-
geschossen und
Anzündung

Des weiteren wurden Versuche mit Knallgeschossen in ihren Ursprungsverpackungen (Verkaufsschachteln) in den in Verkaufs- und Nebenräumen zulässigen Mengen durchgeführt. Die Schachteln waren in einem Regal aus Winkelprofilen untergebracht, einer dieser Versuche wurde durch einen äußeren Brand von Verpackungsmaterial statt durch Innenzündung eingeleitet (Bild 38).



Bild 38

70 Schachteln mit
Knallgeschossen,
Brandzündung

Zuletzt wurden entsprechend den Bestimmungen für Munition der Klasse PM I für einen besonderen Raum sechs Kartons, in zwei Reihen übereinander auf dem Fußboden stehend, durch Innenzündung zur Reaktion gebracht.

Bei allen Versuchen war der Versuchsraum nur mit einem Maschendraht (Maschenweite 12,5 mm, Drahtstärke 1 mm) verschlossen, um die Hauptmenge der Knallgeschosse im Raum zurückzuhalten. Der Reaktionsablauf wurde durch Zeitmessung mit einer Stoppuhr und mittels Filmaufzeichnung verfolgt.

3.3.2 Meßwerte

Die Druckmessungen (Bild 39) zeigen ausschließlich eine Abfolge von Einzelereignissen, die auf die Explosion einzelner Knallgeschosse zurückzuführen sind. Das abgebildete Beispiel ist ein Ausschnitt aus einer Reihe aufeinanderfolgender Messungen. Anscheinend treten sowohl Druckspitzen als auch Schwingungen durch mechanische Anregung der Stahlkästen auf, in denen die Druckgeber montiert sind. Die Druckspitzen sind mehr oder minder steil, bestimmt durch die sicherlich nicht immer gleichartige Zerlegung der Knallgeschosse, und dauern etwa 1 bis 2 ms. Die Maximaldrücke sind - gleichartiges Verhalten der Knallgeschosse vorausgesetzt - vom jeweiligen Abstand des explodierenden Knallgeschosses von den einzelnen Druckaufnehmern abhängig. Die Druckspitzen wirken also nur örtlich in einem begrenzten Bereich. Ein Druckereignis, das im gesamten Raum oder in einem größeren Bereich auftritt - wie es bei einer Massenexplosion zu erwarten gewesen wäre -, fehlt völlig. Die widerstandsfähigen Bauteile des Versuchsraumes wurden daher mechanisch nicht belastet, wohl aber

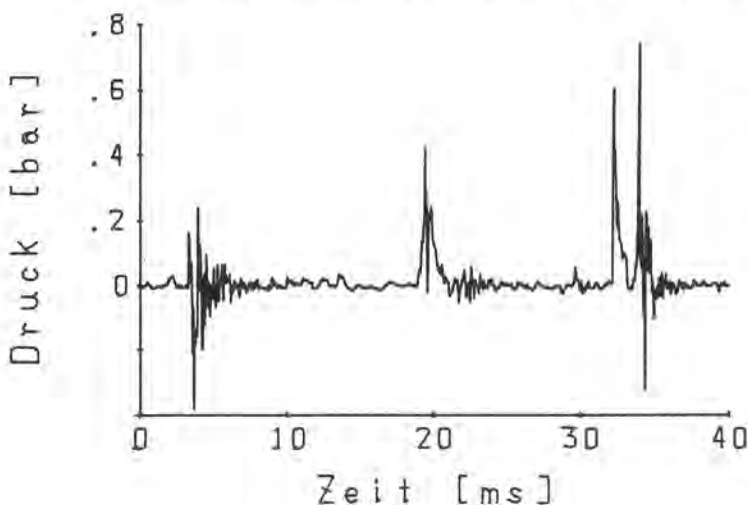


Bild 39
Ausschnitt aus der
Druckaufzeichnung beim
Versuch mit 70 Schachteln
mit Knallgeschossen -
Innenzündung

rissen einzelne Knallgeschosse Löcher in den vorgespannten Maschendraht.

Im Gegensatz zu der Druckbelastung war die thermische Wirkung erheblich. Dabei zeigte sich die Reaktionsdauer in erster Näherung unabhängig von der Stoffmenge - abgesehen von den Versuchen mit ein bis drei Schachteln (Tabelle 20). Ab 8 kg Bruttogewicht bis 200 kg Bruttogewicht beträgt die Flammendauer durchschnittlich $8,5 \text{ s} \pm 1,4 \text{ s}$ Standardabweichung, wobei die maximale Flammenintensität nach etwa 4 s erreicht wurde.

Tabelle 20

Versuche mit Knallgeschossen, Reaktionsablauf

Material	Bruttogewicht [kg]	Knallsatz/ Schwarzpulver [kg]	Zeit bis zur max. Flammenintensität [s]	Flammendauer [s]
1 Schachtel	0,85	0,11/0,25	2	3
3 Schachteln, umgeklebt	2,6	0,33/0,75	2	4
3 Schachteln, Karton	2,6	0,33/0,25	1,5	4
1 Lage mit 10 Schachteln, 1/4 Karton	8,5	1,1/2,5	4	6
2 Lagen mit je 10 Schachteln, 1/2 Karton	17	2,2/5,0	4	8
1 Karton mit 40 Schachteln	34	4,4/10,0	./.	9
1 Holzkiste mit 40 Schachteln	34	4,4/10,0	3	8
24 Schachteln im Regal	20	2,6/6,0	2	8
70 Schachteln im Regal	60	7,7/17,5	6	9
70 Schachteln im Regal, Brand- zündung 1)	60	7,7/17,5	ca.4	9
6 Kartons mit je 40 Schachteln	200	26,4/60,0	ca.5	11

1) in allen anderen Fällen Innenzündung

Die akustischen Erscheinungen (Knallen, Prasseln) endeten etwa 2 s früher als die optischen. Schon die Umsetzung einer einzigen Schachtel mit 100 Stück Knallgeschossen reichte aus, um den Versuchsraum kurzfristig mit Flammen zu füllen, die Reaktion von 70 Schachteln (60 kg brutto) führte zu 10 m bis 15 m hohen Flammen vor dem Versuchsraum, während die sechs Kartons (200 kg brutto) eine geschlossene Feuersäule von über 20 m Höhe verursachten, die sich dann vom Boden löste und pilzartig weiter aufstieg.

3.3.3 Diskussion

Sowohl die Versuche mit abgestuften Mengen bis zu einer Versandeinheit als auch die an der Praxis orientierten Versuche haben zu einheitlichen Ergebnissen geführt. Unter den vorliegenden Bedingungen trat keine Massenexplosion auf, da die explosionsgefährlichen Stoffe in den Gegenständen und Verpackungen stark unterteilt sind. Eine allgemeine Druckbelastung eines Raumes trat nicht auf, da die entstehenden Flammen und Reaktionsschwaden aus dem Raum austreten konnten - anderenfalls wäre eine Druckentlastung durch Bauteile mit geringer Widerstandsfähigkeit (Fenster, Türen) erfolgt.

Es muß aber darauf hingewiesen werden, daß die einzelnen Knallgeschosse in kurzer Entfernung erhebliche lokale Druckwirkungen verursachen. So werden bei der Verwendung dieser Gegenstände immer wieder Menschen schwer verletzt, z. B. wenn diese Knallgeschosse in der Hand zur Explosion kommen.

Die thermischen Wirkungen im Falle eines Unfalls mit einer größeren Menge an Knallgeschossen sind erheblich, und zwar sowohl in dem betreffenden Raum als auch in dem Teil der Umgebung, in den die Druckentlastung erfolgt. Es muß davon ausgegangen werden, daß normale Verkaufsräume durch eine Reaktion derartiger Knallgeschosse in der zulässigen Menge von 20 kg brutto einige Sekunden lang mit Flammen ausgefüllt sind, mit den entsprechenden Folgen für die im Verkaufsraum befindlichen Menschen.

Die Knallgeschosse zeigen im Vergleich zu Gegenständen des Sprengstoffrechtes in den vorliegenden Verpackungen und in

den untersuchten Mengen eindeutig das Verhalten von Explosivstoffen der Lagergruppe 1.3. Die Umsetzung ist ein Massenfeuer, wobei bemerkenswert ist, daß sich die Abbrandzeit selbst bei Erhöhung der Menge auf das mehr als 200 fache nur um den Faktor 4 verlängert. Dies ist eine Steigerung der Umsetzungsgeschwindigkeit um fast zwei Zehnerpotenzen.

4. Zusammenfassung

In einem Modellgebäude mit Räumen in Ausblasebauart mit schwerer und mit leichter Dachausführung wurden Explosions- bzw. Abbrandversuche mit Schwarzpulver in seiner Eigenschaft als pyrotechnischer Satz, mit anderen pyrotechnischen Sätzen und mit pyrotechnischer Munition durchgeführt. Dabei wurden mechanische und thermische Explosionsparameter wie Druck, Schalldruck, Gebäudeschwingungen und Verhalten leichter Bauteile bzw. Temperatur, Flammenausbreitung und Wärmestrahlung gemessen, im allgemeinen in Abhängigkeit von der Stoffmenge.

Diese Ergebnisse sind direkt für die Gefahrenabschätzung in der betrieblichen Praxis nutzbar, je ähnlicher die betriebliche Situation den Versuchsbedingungen ist, desto sicherer ist die Übertragung der Ergebnisse.

Im einzelnen sind die Parameter jeweils am Ende der Abschnitte 3.1 bis 3.3 diskutiert und auch teilweise für verschiedene Stoffe einander gegenübergestellt. Verglichen wurden auch die verschiedenen Ausblasebauarten, wobei keiner dieser Bauarten allgemein der Vorzug gegeben werden konnte.

Auf eine zusammenfassende Wiederholung der wichtigsten Ergebnisse wird hier verzichtet; insbesondere deshalb, weil im Teil V dieses Berichtes im Rahmen einer vergleichenden Betrachtung gerade auf die allgemeingültigen Ergebnisse aus verschiedenen Versuchsanordnungen und daraus abgeleiteten Beziehungen hingewiesen wird.

Teil II. Versuche in einem kleinen Stahlmodell

H. Andre und N. Pfeil

1. Einleitung

Im Teil I dieses Berichtes wurden die Ergebnisse von Explosions- und Abbrandversuchen mit pyrotechnischen Sätzen und Mitteln in einem Modellgebäude im Maßstab 1 : 1 mitgeteilt. Derartige Versuche liefern naturgemäß die zuverlässigsten Explosionsparameter, sind aber arbeits- und materialaufwendig und daher teuer.

Aus Versuchen im Labormaßstab mit wenigen Gramm läßt sich jedoch nur sehr bedingt mit hinreichender Sicherheit das Verhalten deflagrierender Stoffe in großen Mengen ableiten.

In der Hoffnung, eine Grundlage für eine kostengünstige und schnell durchzuführende Prüfmethode zur Abschätzung insbesondere der Druckbelastung bei Deflagrationen in Räumen mit Ausblasewänden zu erhalten, wurde daher ein kleines Stahlmodell eines derartigen Raumes für Versuche im Maßstab etwa 1 : 10 bis 1 : 100 gebaut. Nach grundlegenden Versuchen mit dem Standardstoff Schwarzpulver als typischem Vertreter pyrotechnischer Sätze sollten auch mit anderen Stoffen parallel zu Versuchen im Maßstab 1 : 1 entsprechende Versuche in diesem 1-m³-Stahlkasten durchgeführt werden. Die in verschiedenen Maßstäben erhaltenen Daten können dann direkt miteinander verglichen und die Übertragbarkeit überprüft werden. Im günstigsten Fall sind allgemeine Beziehungen abzuleiten, zumindest können aber die Grenzen der Anwendbarkeit von Modellversuchen in kleinerem Maßstab ermittelt werden.

Die Ergebnisse aus verschiedenen Maßstäben werden im Teil V dieses Berichtes verglichen. Im vorliegenden Teil werden die bisher mit dem 1-m³-Stahlkasten erhaltenen Daten mitgeteilt.

Über erste Ergebnisse mit Schwarzpulver wurde bereits am Anfang des Bearbeitungszeitraumes auf einer Vortragstagung berichtet [20], die Darstellung der ergänzten Ergebnisse wird in diesem Bericht aufgrund inzwischen gewonnener Kenntnisse in etwas geänderter Form erfolgen.

Neben diesen grundlegenden Versuchen über die Abhängigkeit des Druckverlaufes im Stahlkasten von der Schwarzpulvermenge und von der Größe der Ausblaseöffnung wurde einigen Phänomenen nachgegangen, die durch Modifikation der Versuchsbedingungen weitgehend geklärt werden konnten. Diese modifizierten Versuche sind z. B. solche mit geändertem Zündort, mit aufgewirbeltem Schwarzpulver und weitere, teilweise auch im Teil III dieses Berichtes dargestellte Versuche.

Ferner wurden auch im Stahlkasten entsprechend den Versuchen im Maßstab 1 : 1 verschiedene Ausblasewände und auch andere pyrotechnische Sätze untersucht und es wurden Explosionsparameter, die auf die Umgebung des untersuchten Raumes wirken, in Abhängigkeit von Stoffmenge und Entfernung gemessen, um auch hier vergleichbare Daten für die Interpretation der Versuche im Maßstab 1 : 1 zu erhalten.

2. Allgemeiner Versuchsaufbau

In diesem Abschnitt werden die experimentellen Voraussetzungen beschrieben, die für alle Versuchsreihen gleich sind: das sind der 1-m³-Stahlkasten und die Meßmethoden. Weitere Angaben zu den Versuchsmaterialien folgen in den entsprechenden Abschnitten unter 3. Versuchsergebnisse.

2.1 1-m³-Stahlkasten

Der 1-m³-Stahlkasten ist ein Modell eines Raumes in Ausblasebauart mit schwerer Dachausführung, Bild 1 zeigt die Konstruktionszeichnungen. Die offene Vorderseite hat eine relative Öffnung von 17 %, bezogen auf die gesamte innere Oberfläche (sechs Flächen). Mit Hilfe von Stahlbalken und Holzkeilen lassen sich Stahlrahmen oder Stahlplatten an der Vorderseite

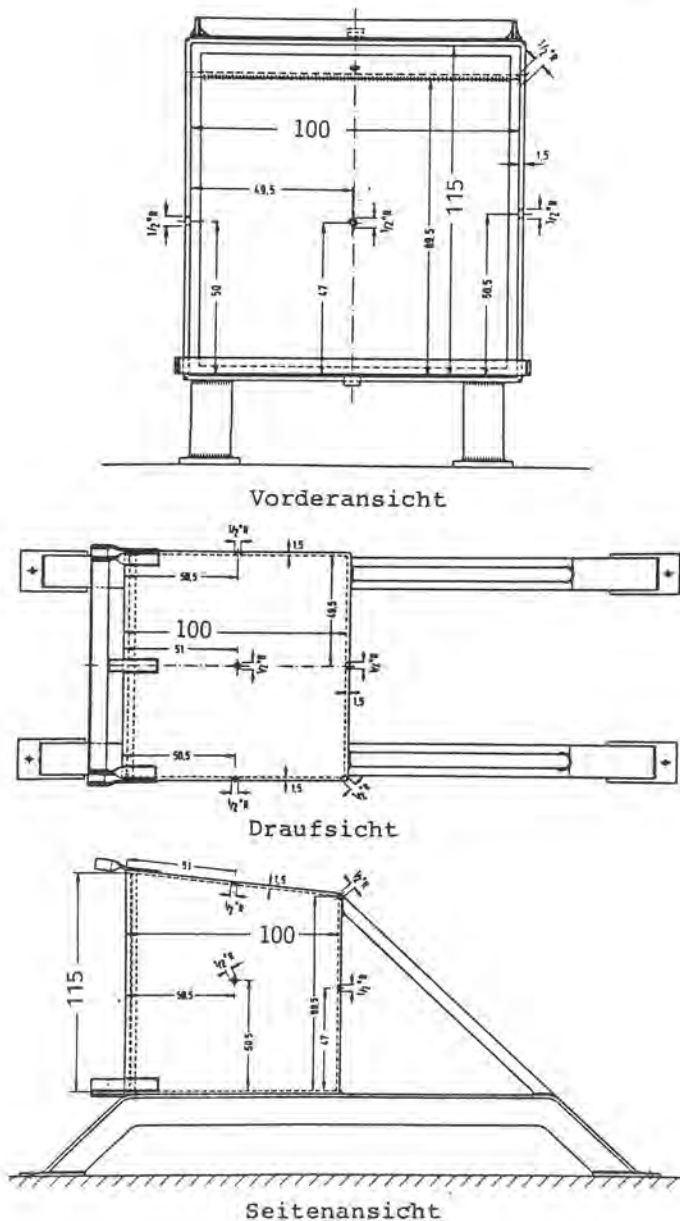


Bild 1
1-m³-Stahlkasten
Maße in cm

des Stahlkastens befestigen. Die kleineren, rechteckigen Öffnungen dieser Rahmen ergeben Ausblaseflächen von 10 %, 4 % und 1 % und (geschlossen) 0 %. Die 10-%-Öffnung kann mit unterschiedlichen nicht widerstandsfähigen Materialien verschlossen werden, zur Untersuchung verschiedener Ausblasewände in verkleinertem Maßstab. Bild 2 zeigt den Stahlkasten mit einer Spanplatte als Ausblasewand.



Bild 2
1-m³-Stahlkasten mit 10-%-Öffnung und Spanplatte

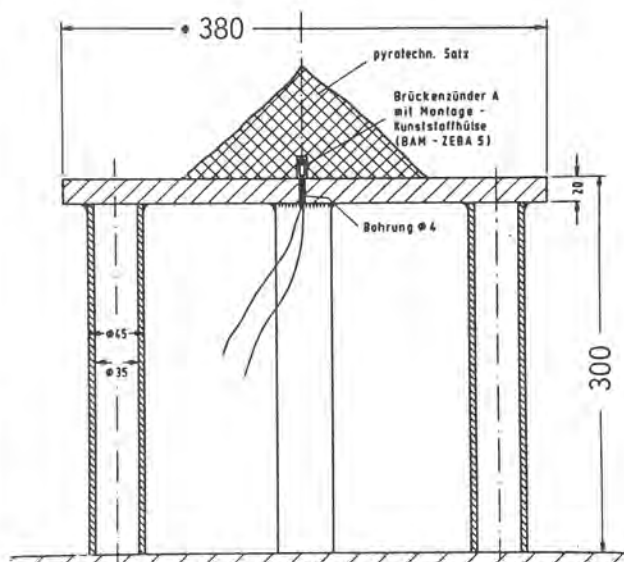


Bild 3
Versuchsaufbau im 1-m³-Stahlkasten - Zündung einer losen Schüttung von unten (Maße in mm)

Mit Ausnahme von zwei Versuchsreihen (Abschnitt 3.1.4) gilt der in Bild 3 dargestellte Versuchsaufbau. Der Stahltisch wird ohne weitere Befestigung mittig auf den Boden des Stahlkastens gestellt. Die Zündung von unten gewährleistet bei losen Schüttungen pyrotechnischer Sätze, daß die Wirkung aufgrund der Eigenverdämmung maximal ist. Bei größeren Stoffmengen, z. B. 4 kg Schwarzpulver und mehr, muß eine Papierkrempe um den Stahltisch gelegt werden.

Der Stahlkasten ist mit Bohrungen in den Flächenmitten und in einer Ecke versehen, die zur Befestigung der Druckaufnehmer oder zur Durchführung der Zündleitung für die elektrische Zündung mittels Zündpille (Brückenzünder A mit Montagekunststoffhülse, Fr. Sobbe GmbH) dienen oder verschlossen werden.

2.2 Meßmethoden

Hinsichtlich der Meßmethoden wird auf den Teil I Abschnitt 2.2 verwiesen. Zur Aufzeichnung des Druck-Zeit-Verlaufes dienten anfänglich Transienten-Rekorder der Firma Exatron (Quantalog 4100).

3. Versuchsergebnisse

Wie in Teil I sind auch hier die Versuchsergebnisse nach Stoffgruppen getrennt wiedergegeben. Der überwiegende Teil der Versuche, die der Untersuchung stoffunabhängiger Einflußgrößen dienen sollten, wurden aus Gründen, die in Teil I Abschnitt 3 genannt sind, wiederum mit Schwarzpulver durchgeführt. Über die restlichen Versuche wird im Abschnitt "Versuche mit pyrotechnischen Sätzen" berichtet.

3.1 Versuche mit Schwarzpulver

Hinsichtlich des benutzten Schwarzpulvers und der erhaltenen Explosionsparameter vgl. Teil I Abschnitt 3.1.

3.1.1 Verschiedene Öffnungen

Für die Abschätzung der Gebäudebelastungen, die bei Unfällen in der Industrie in Gebäuden in Ausblasebauart auftreten können, ist es erforderlich, den Einfluß der Größe von Ausblaseflächen auf den Druck-Zeit-Verlauf bzw. den Maximaldruck zu kennen. Aus diesem Grunde wurden systematische Untersuchungen mit relativen Öffnungen von 0 %, 1 %, 4 %, 10 % und 17 % und entsprechend gestaffelten Schwarzpulvermengen durchgeführt. Diese Öffnungen waren nicht durch leichtzerstörbare Materialien als Ausblasewände verschlossen, im Gegensatz zu den Versuchen, die in den folgenden Abschnitten 3.1.2 und 3.1.3 geschildert werden. Die Schwarzpulverschwaden (freiwerdende Gase und feste Umsetzungsprodukte) konnten also vom Beginn der Umsetzung an ungehindert durch die jeweilige Öffnung ausströmen, so daß der Druckaufbau im Inneren des Stahlkastens allein durch die Geschwindigkeit des druckerzeugenden Vorganges (Deflagration des Schwarzpulvers) und des druckmindernden Vorganges (Abströmen der Schwaden) bestimmt schien. Um so überraschender war es, daß - wie Bild 4 mit stark idealisierten Druckkurven verdeutlicht - wider Erwarten zwei Maxima im Druck-Zeit-Verlauf gefunden wurden, wobei das erste allerdings nur bei größeren Öffnungen deutlich in Erscheinung trat. Dieses erste Druckmaximum mit einer Druckanstiegszeit von etwa 6 ms entspricht dem ersten Druckmaximum p_1 , das bei Versuchen im Modellgebäude (vgl. Teil I, Abschnitt 3.1.1.1) gefunden wurde und das unter den dort beschriebenen Bedingun-

gen nicht für die Belastung eines realen Gebäudes von Bedeutung war. Da diese Aussage aber nicht generell gilt, wird das Druckmaximum p_1 hier nur tabellarisch aufgeführt und in dem Abschnitt 3.1.4 unter Heranziehung zusätzlicher Versuche gedeutet; eine allgemeine Betrachtung erfolgt dann im Teil V.

Tatsächlich weicht der Druck-Zeit-Verlauf mehr oder minder von der idealisierten Darstellung in Bild 4 ab. In Bild 5 sind Beispiele für die größtmögliche Öffnung dargestellt. Die Druckkurven sind generell von kurzen, etwa 500 Hz entsprechenden Schwingungen überlagert. Durch Versuche mit druckdicht abgedeckten Gebern wurde nachgewiesen, daß diese Schwingungen keine Druckschwingungen im Stahlkasten, sondern Schwingungen des Stahlkastens bzw. des Druckaufnehmers selbst sind. Ferner treten häufig zwischen den Druckmaxima p_1 und p_{max} kurze Druckspitzen auf. Diese Druckspitzen werden durch Schwarzpulverkörner oder Schlacken verursacht, die mit hoher Geschwindigkeit auf den Druckaufnehmer auftreffen. Bei Versuchen mit Druckaufnehmern, deren Meßflächen nicht parallel zu den Wänden des Stahlkastens sondern um 90° gedreht montiert waren, traten derartige Druckspitzen nämlich nicht auf. Über den Einfluß der Geberorientierung wird noch berichtet werden.

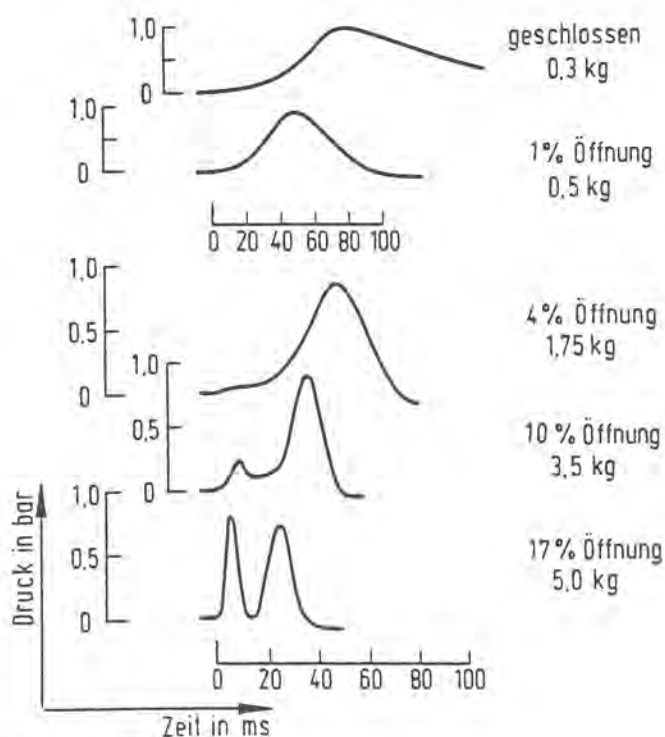


Bild 4

Druck-Zeit-Verlauf bei der Deflagration von Schwarzpulver im 1-m^3 -Stahlkasten mit unterschiedlichen Ausblaseflächen (idealisierte Kurvenverlauf)

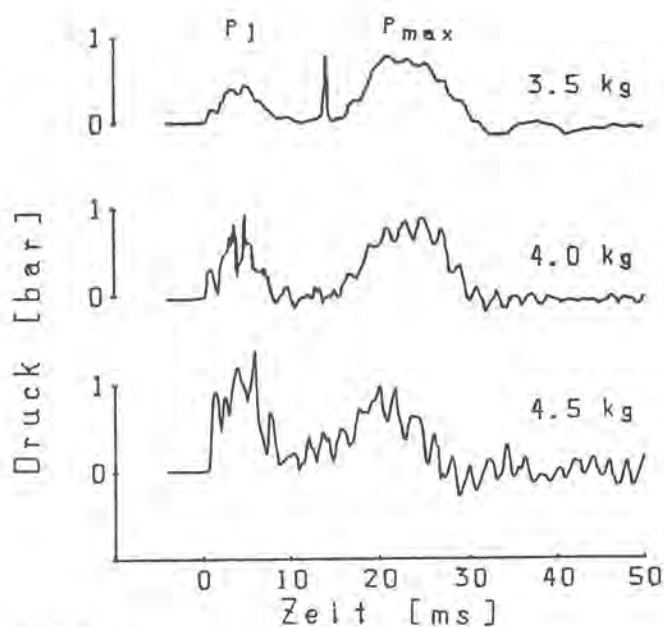


Bild 5

Druck-Zeit-Verlauf bei der Deflagration von Schwarzpulver im 1-m^3 -Stahlkasten mit einer relativen Öffnung von 17 %

Die Versuchsergebnisse sind im einzelnen unter Angabe der teilweise beträchtlichen Standardabweichungen in Tabelle 1 zusammengestellt, zusammen mit den Potenzfunktionen, die als Ausgleichsfunktionen zwischen dem Maximaldruck p_{max} (zweites Druckmaximum) und der Schwarzpulvermenge in Bild 6 eingezeichnet

Tabelle 1

Maximaldrücke p_1 und p_{max} und Dauer der positiven Druckphase t_+ bei der Deflagration von Schwarzpulver im $1-m^3$ -Stahlkasten mit unterschiedlichen Druckentlastungsflächen

Öffnung [%]	Schwarzpulvermenge [kg]	p_1 [bar]	p_{max} [bar]	t_+ [ms]	Ausgleichsfunktion p_{max} [bar]
0	0,15		0,57 ± 0,04	211 ± 26	$2,9 \cdot m^{0,87}$
	0,30		1,01 ± 0,05		
	0,40		1,30 ± 0,08	179	
	0,50		1,56 ± 0,07		
	0,75		2,34 ± 0,10		
	0,90		2,67 ± 0,12		
1	0,30		0,48 ± 0,04	112 ± 6	$1,9 \cdot m^{1,2}$
	0,50		0,82 ± 0,13	120 ± 11	
	0,75		1,36 ± 0,09	130 ± 8	
	0,90		1,90 ± 0,13	115 ± 7	
	1,05		1,99 ± 0,13	112 ± 9	
	1,20		2,38 ± 0,18	103 ± 13	
4	0,75		0,27 ± 0,05	75 ± 7	$0,42 \cdot m^{1,5}$
	1,00		0,46 ± 0,10	66 ± 5	
	1,25		0,48 ± 0,04	75 ± 3	
	1,50		0,88 ± 0,14	66 ± 7	
	1,75		0,89 ± 0,03	72 ± 2	
	2,00		1,14 ± 0,12	65 ± 5	
	2,25		1,37 ± 0,10	67 ± 4	
10	2,00	0,04 ± 0,01	0,22 ± 0,04	57 ± 4	$0,025 \cdot m^{3,0}$
	2,50	0,07 ± 0,03	0,34 ± 0,08	57 ± 5	
	3,00	0,09 ± 0,04	0,50 ± 0,06	56 ± 4	
	3,50	0,14 ± 0,04	0,84 ± 0,09	53 ± 3	
	3,75	1,18 ± 0,48	1,86 ± 0,31	36 ± 7	
	4,00	0,53 ± 0,28	1,50 ± 0,28	46 ± 7	
	4,50	1,01 ± 1,03	1,97 ± 0,74	42 ± 10	
17	1,00	0,04 ± 0,01	0,05 ± 0,01	44 ± 7	$0,037 \cdot m^{2,1}$
	2,00	0,11 ± 0,03	0,15 ± 0,06	43 ± 1	
		0,04 ± 0,01	0,07 ± 0,02	50 ± 4	
	3,00	0,25 ± 0,04	0,36 ± 0,07	38 ± 2	
	3,50	0,38 ± 0,10	0,65 ± 0,11	34 ± 2	
	4,00	0,76 ± 0,31	0,77 ± 0,14	33 ± 2	
		0,15 ± 0,03	0,74 ± 0,13	52 ± 5	
		0,33 ± 0,28	0,73 ± 0,53	45 ± 13	
		0,23 ± 0,15	0,50 ± 0,34	48 ± 15	
		0,23 ± 0,05	0,62 ± 0,08	44 ± 2	
		0,61 ± 0,11	0,52 ± 0,09	43 ± 1	
		0,51 ± 0,40	0,70 ± 0,16	41 ± 4	
	4,50	1,13 ± 0,49	1,07 ± 0,30	30 ± 5	
	5,00	1,25 ± 0,56	0,91 ± 0,21	33 ± 5	
		0,57 ± 0,15	0,90 ± 0,13	41 ± 1	
	5,50	1,95 ± 0,69	1,04 ± 0,56	31 ± 6	

net sind. Aus Gründen der Übersichtlichkeit wurde auf die Darstellung der Standardabweichungen in der Zeichnung verzichtet.

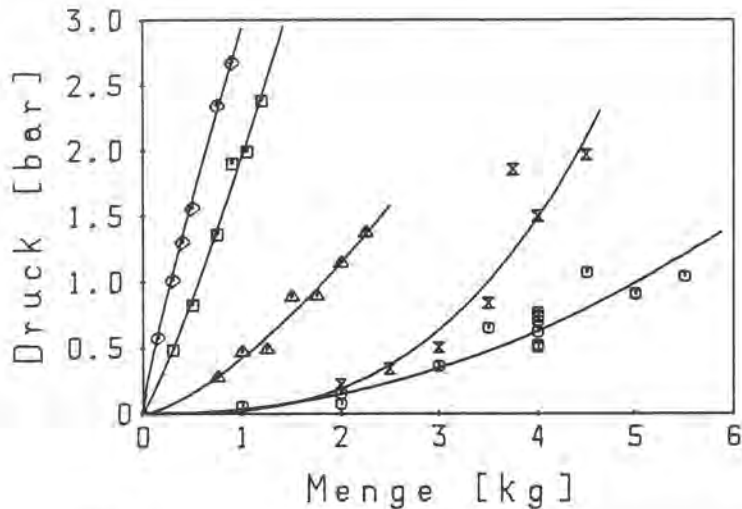


Bild 6

Maximaldruck in Abhängigkeit von der Schwarzpulvermenge und von der Ausblasefläche im 1-m³-Stahlkasten - relative Öffnung 0 % (◇), 1 % (□), 4 % (△), 10 % (X) und 17 % (○)

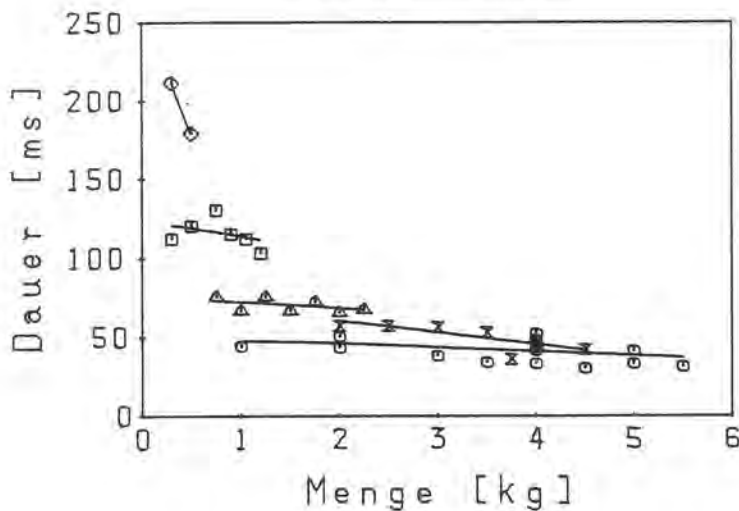


Bild 7

Dauer der positiven Druckphase in Abhängigkeit von der Schwarzpulvermenge und von der Ausblasefläche im 1-m³-Stahlkasten - Symbole siehe Bild 6

Das Druckmaximum p_1 scheint empfindlicher von den Eigenschaften des Schwarzpulvers und den Versuchsbedingungen abzuhängen als das Druckmaximum p_{max} (vgl. die Werte in Tabelle 1 für 4 kg, die an verschiedenen Pulverchargen gleicher Zusammensetzung oder an verschiedenen Versuchstagen gemessen wurden). Zumindest bei einer Versuchsserie war p_1 bei Mengen über 4 kg größer als p_{max} .

Die in Tabelle 1 und Bild 7 dargestellte Dauer der positiven Druckphase schließt die Maxima p_1 und p_{max} ein. Die Dauer der positiven Druckphase ist danach nur unwesentlich von der Schwarzpulvermenge abhängig, sondern hauptsächlich durch die Größe der Ausblaseöffnung bestimmt, d.h., durch den Abströmvorgang selbst.

Um die hier erhaltenen Druckwerte mit Literaturwerten vergleichen zu können, wurde der Einfluß der Orientierung der

Druckgeber in den Seitenwänden des Stahlkastens untersucht, und zwar wurde ein Geber - wie hier üblich - mit seiner Membran parallel zur Seitenwand eingesetzt (Orientierung I) und zwei weitere Geber mit Membranen senkrecht zu der jeweiligen Seitenwand. Die letzteren unterschieden sich in der Orientierung zur Ausblaserichtung, einer dieser Druckaufnehmer war mit seiner Membran zur Ausblaseseite hin (Orientierung II), der andere zur Rückwand hin ausgerichtet (Orientierung III).

Bei Versuchen mit Mengen von 1 kg bis 5 kg Schwarzpulver waren die Maximaldrücke bei der Geberorientierung II und III etwa 20 % niedriger als bei der Orientierung I. Auf eine genauere Angabe der Unterschiede wird verzichtet, da hierfür die Zahl der gemessenen Druckwerte zu gering ist. Jedenfalls ist der Einfluß der Geberorientierung hier wegen des relativ langsamen Druckanstieges nur gering, im Gegensatz zum Unterschied zwischen dem senkrecht reflektierten Stoßdruck und dem Druck in der frei anlaufenden Luftstoßwelle bei Detonationen.

Versuche mit Schwarzpulver im offenen Stahlkasten (17-%-Öffnung) wurden dazu genutzt, die Abstandsabhängigkeit der Druck- und Wärmestrahlungsausbreitung außerhalb des Stahlkastens in Ausblaserichtung zu überprüfen.

Entsprechende Messungen wurden auch bei Freifeldversuchen mit Schwarzpulver durchgeführt (vgl. Teil III Abschnitt 3.1.2).

Hier ergaben sich in den Meßabständen 20 m, 30 m, 50 m und 80 m die in der Tabelle 2 angegebenen Werte, deren Abstandsabhängigkeit in den Bildern 8 und 9 auch grafisch dargestellt sind.

Tabelle 2

Maximaler Schalldruck p_{max} und maximale Bestrahlungsstärke E_{max} in Ausblaserichtung bei der Deflagration von Schwarzpulver im 1-m³-Stahlkasten (relative Öffnung 17 %)

Schwarzpulvermenge [kg]	p_{max} [mbar]				E_{max} [mW/cm ²]			
	Abstand in Ausblaserichtung							
	20 m	30 m	50 m	80 m	20 m	30 m	50 m	80 m
1				0,17	81,7			4,5
3	6,8	4,0	2,8	1,5	181	95,9	32,3	11,6
5				4,5				18,4

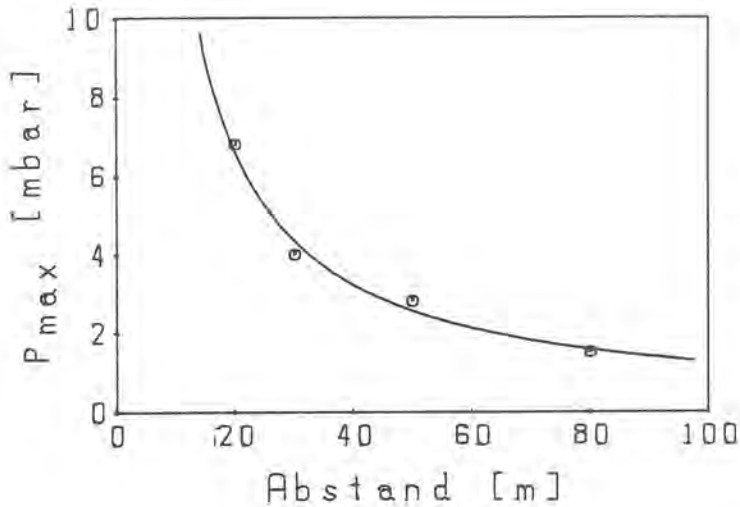


Bild 8

Maximaler Schalldruck p_{max} in Abhängigkeit vom Abstand in Ausblaserichtung bei der Deflagration von 3 kg Schwarzpulver im offenen 1-m³-Stahlkasten (relative Öffnung 17 %)

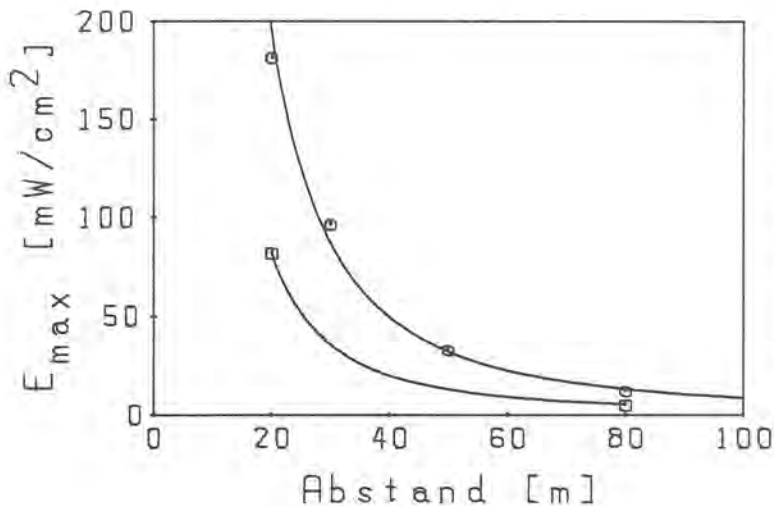


Bild 9

Maximale Bestrahlungsstärke E_{max} in Abhängigkeit vom Abstand in Ausblaserichtung bei der Deflagration von Schwarzpulver im offenen 1-m³-Stahlkasten (relative Öffnung 17 %) - Schwarzpulvermenge:
 □ 1 kg, ○ 3 kg

Die Amplitude einer kugelförmigen Schallwelle nimmt im Idealfall umgekehrt proportional zu der Entfernung r von der Schallquelle ab, da die Schalleistung dem Quadrat des Schalldruckes proportional ist. Die Ausgleichskurve in Bild 8 ($p_{max} = 1,5 \cdot 10^2 \cdot r^{-1,04}$) zeigt, daß in dem untersuchten Abstandsbereich eine kugelförmige Schallausbreitung zugrundegelegt werden kann. Zieht man den Stahlkasten selbst mit in die Abstandsbetrachtung ein und ordnet man ihm eine fiktive Entfernung $r = 0,5$ m von einer punktförmig angenommenen Schallquelle im Kasteninneren zu, so erhält man in dieser Entfernung mit $p_{max} = 310$ mbar einen Druck, der dem gemessenen Druck im Stahlkasten entspricht (vgl. Tabelle 1). Entsprechende Vergleiche zwischen dem maximalen Schalldruck außerhalb des Versuchsraumes und dem maximalen Druck im Versuchsraum wurden bereits im Teil I Abschnitte 3.1.1.1 und 3.1.1.2 auf der Basis der hier dargestellten Ergebnisse vorgenommen. Auch die Mengenabhängigkeit des Schalldrucks (nicht im Bild dargestellt) entspricht mit $p_{max} \sim m^{2,0}$ derjenigen, die für den Maximaldruck p_{max} im Stahlkasten gefunden wurde.

Im Gegensatz zum Schalldruck nimmt die Bestrahlungsstärke, eine auf die Fläche bezogene Leistungsgröße, bei kugelförmiger Ausbreitung der Wärmestrahlung umgekehrt proportional zum Quadrat der Entfernung ab. Bild 9 bestätigt dies im untersuchten Entfernungsbereich auch für die Ausbreitung der Wärmestrahlung in Druckentlastungsrichtung eines Raumes in Ausblasebauweise ($1 \text{ kg} : E_{\max} = 43 \cdot 10^3 \cdot r^{-2,1}$ und $3 \text{ kg} : E_{\max} = 79 \cdot 10^3 \cdot r^{-2,0}$). Diese gute Übereinstimmung mit der kugelförmigen Ausbreitung läßt darauf schließen, daß durch die Druckentlastung die Wärmequelle im wesentlichen vor den Stahlkasten verlagert wird.

Die Mengenabhängigkeit der Bestrahlungsstärke in 80 m Entfernung ist durch $E_{\max} = 4,5 \cdot m^{0,87}$ beschrieben. Die Anstiegszeiten der Bestrahlungsstärke schwankten zwischen 47 ms und 92 ms (Mittelwert $68 \text{ ms} \pm 11 \text{ ms}$) und stimmen mit den Werten überein, die am offenen Raum mit schwerer Dachausführung des Modellgebäudes (Teil I, Abschnitt 3.1.1.1, Tabelle 3) gefunden wurden. Auch der weitere zeitliche Verlauf der Bestrahlungsstärke entspricht dem dort in Bild 9 gezeigten Verlauf, so daß hier auf eine bildliche Darstellung verzichtet werden kann. Der Strahlungsanteil an der Explosionswärme Q , berechnet aus der Fläche unter dem zeitlichen Verlauf der Bestrahlungsstärke (vgl. Teil I Abschnitt 3.1.1.1), ist deutlich von der Schwarzpulvermenge abhängig; so wurden für 1 kg, 3 kg bzw. 5 kg Schwarzpulver im Mittel 16 %, 11 % bzw. 9 % Strahlungsanteil erhalten. Dies bestätigt die in Teil I Abschnitt 3.1.1.1 diskutierte Absorption der Wärmestrahlung in den Schwarzpulverschwaden. Die Schwaden strömen mit steigender Schwarzpulvermenge zunächst verstärkt in Richtung Detektor und erst später nach oben ab.

3.1.2 Ausblasewände aus Holz

Ausblasewände aus Holz wurden zum Verschließen der 10-%-Öffnung eingesetzt. Entsprechend den Ausblasewänden des Modellgebäudes (Abschnitt 3.1.1.2, Teil I) wurden die 16 mm dicken Preßspanplatten auf zwei Arten befestigt. Beim Befestigungstyp I wurden die Spanplatten auf vier Gewindebolzen gesteckt und mit Flügelmuttern und Unterlegscheiben fest gegen den Stahlrahmen mit der 10-%-Öffnung geschraubt, beim Typ II wurde ein Rahmen aus Holzlatten (3 cm x 5 cm) am Stahl-

Tabelle 3

Maximaldruck P_{max} , Druckanstiegszeit t_{max} und Dauer der positiven Druckphase t_+ bei der Deflagration von Schwarzpulver mit 10-%-Öffnung und Spanplatte als Ausblasewand

Schwarzpulvermenge [kg]	$P_{max,1}$ [bar]	$t_{max,1}$ [ms]	$P_{max,2}$ [bar]	$t_{max,2}$ [ms]	t_+ [ms]	
0,05	0,14	52	-	-	72	
0,075	0,18	53	-	-	68	
0,1	0,21	51	-	-	62	
	0,20	45	-	-	53	1)
	0,04	29	-	-	40	3)
0,5	0,28	33	-	-	42	
0,75	0,28	29	-	-	48	
1,0	0,36	27	-	-	58	
	0,45	21	-	-	40	1)
	0,18	24	0,07	42	68	2)
	0,40	20	0,22	30	46	2)
	0,34	24	0,10	37	47	3)
1,5	0,52		0,20	36	49	
2,0	0,55	19	0,42	31	46	
	0,30	21	0,29	42	62	2)
2,5	0,67	18	0,54	33	49	
3,0	0,83	16	0,67	31	47	
	1,25	17	1,24	27	40	1)
	0,46	18	0,50	41	59	2)
	1,35	14	1,10	27	39	3)
3,5	0,84	14	0,94	32	49	
4,0	1,12	15	1,32	30	47	
	0,56	17	0,98	41	59	2)

ohne Nr.) Ausblasewand Typ I

1) Ausblasewand Typ I, Wiederholung

2) Ausblasewand Typ II

3) Ausblasewand Typ I, Spanplatte nur aufgesteckt

rahmen festgeschraubt und auf diesem die Preßspanplatte mit vier Holzschrauben (4,5 mm x 35 mm).

Die Ergebnisse der Druckmessungen sind im einzelnen in der Tabelle 3 wiedergegeben. Die Versuche mit der Ausblasewand Typ I wurden zum Teil wiederholt, diese Ergebnisse sind getrennt von den anderen angegeben. Ferner wurde untersucht, wie stark die Befestigungsart die Maximaldrücke beeinflusst, indem Spanplatten (Typ I) lediglich auf die Gewindebolzen aufgesteckt, aber nicht festgeschraubt worden sind.

Die in der Tabelle angegebenen Meßwerte sind im allgemeinen aus zwei Versuchen (6 Werte) ermittelt, die Standardabweichungen der Maximaldrücke schwanken zwischen etwa $\pm 10\%$ und $\pm 30\%$ des Meßwertes.

Bild 10 zeigt Beispiele für den Druck-Zeit-Verlauf. Neben einer ersten Druckspitze, die hier durch die Druckentlastung beim Bersten der Spanplatte bedingt ist (vgl. Abschnitt 4 in Teil V), bildet sich ein mit steigender Schwarzpulvermenge stärker anwachsendes Druckmaximum heraus, das auf die Umsetzung des Schwarzpulvers zurückzuführen ist, welches zum Zeitpunkt des Berstens der Spanplatte noch nicht umgesetzt war.

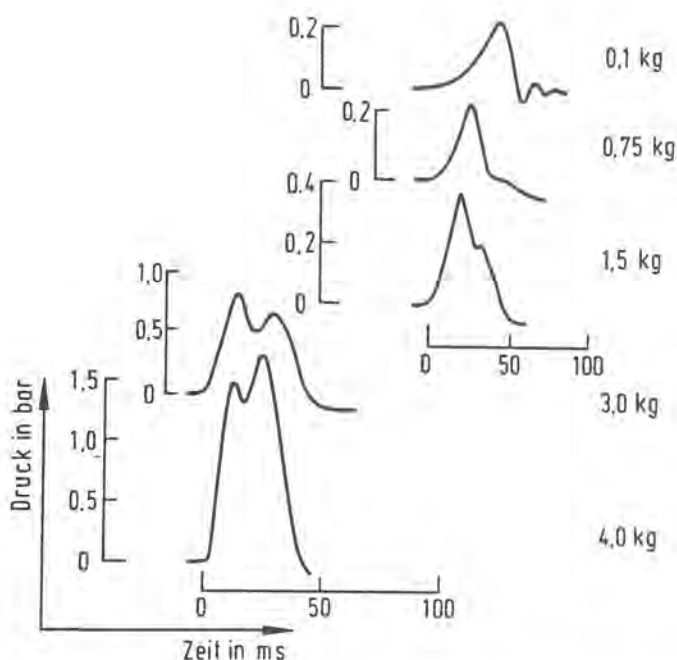


Bild 10

Druck-Zeit-Verlauf bei der Deflagration von Schwarzpulver mit Spanplatte als Ausblasewand-Typ I (idealisiertes Kurvenverlauf)

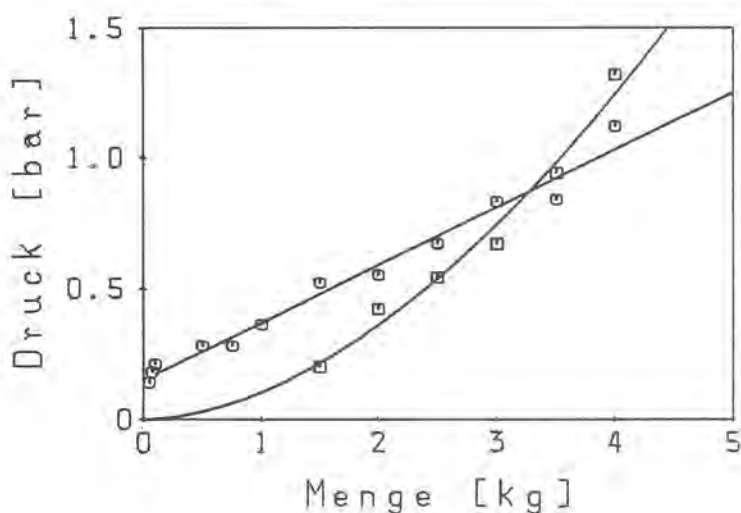


Bild 11

Maximaldrücke in Abhängigkeit von der Schwarzpulvermenge mit Ausblasewand Typ I -
 ○ 1. Druckspitze P_{max,1},
 □ 2. Druckspitze P_{max,2}

Die Mengenabhängigkeit dieser Druckmaxima ist in Bild 11 dargestellt, und zwar nur für die grundlegende Versuchsreihe (in Tabelle 3 Meßwerte ohne Fußnotennummer). Der Maximaldruck

der 1. Druckspitze nimmt im untersuchten Bereich ab etwa 0,1 kg Schwarzpulver linear zu ($p_{\max,1} = 0,22 m + 0,15$). Der Achsenabschnitt folgt aus der Tatsache, daß die kleinen Schwarzpulvermengen die Spanplatten nicht zerstören und der Stahlkasten praktisch geschlossen bleibt; dadurch ist auch der anfänglich größere Anstieg zwischen 0,05 kg und 0,1 kg bedingt. Die Mengenabhängigkeit des Maximaldruckes der 2. Druckspitze ist wieder besser durch eine Potenzfunktion ($p_{\max,2} = 0,11 \cdot m^{1,8}$) beschrieben. Dies läßt erkennen, daß mit weiter steigenden Mengen die druckerhöhende Wirkung der Ausblasewand gegenüber dem offenen Stahlkasten abnimmt.

Im untersuchten Mengenbereich geben Bild 12 und Bild 13 Auskunft über weitere Einflußgrößen; wobei zu bemerken ist, daß die Unterschiede zwischen den verschiedenen Versuchsreihen nicht durch unterschiedliche Eigenschaften des verwendeten Schwarzpulvers bedingt sind, wie entsprechende Messungen im offenen Stahlkasten gezeigt haben.

So führen zu Vergleichszwecken wiederholte Messungen mit der Ausblasewand Typ I zu deutlich höheren Maximaldrücken, Versuche mit der Ausblasewand Typ II dagegen zu niedrigeren Maximaldrücken (Bilder 12 und 13). Die Befestigung der Spanplatten kann aber nur eine untergeordnete Rolle spielen, da sich bei Versuchen mit gesteckten und geschraubten Ausblasewänden des Typs I nur die Maximaldrücke der 1. Druckspitze, und diese auch nur bei kleinen Schwarzpulvermengen, unterschieden. Somit ist zu vermuten, daß sich die verwendeten Spanplatten, die außer durch ihre Dicke nicht weiter spezifiziert waren, in ihrem Druckverhalten unterschieden. Dies kann jedoch nachträglich nicht mehr überprüft werden.

Sieht man von den Schwarzpulvermengen unter 0,1 g ab, so ist eine signifikante Mengenabhängigkeit sowohl der Dauer der positiven Druckphase ($50 \text{ ms} \pm 8 \text{ ms}$) als auch der Druckanstiegszeit der 2. Druckspitze ($34 \text{ ms} \pm 5 \text{ ms}$) nicht festzustellen (Tabelle 3). Anders ist es mit der Druckanstiegszeit der 1. Druckspitze (Bersten der Spanplatte). Läßt man die Meßwerte für aufgesteckte Spanplatten und 0,1 g Schwarzpulver unberücksichtigt, so kann man die Mengenabhängigkeit bis 3 kg Schwarzpulver sehr gut mit einer logarithmischen Funk-

tion beschreiben ($t_{\max,1} = 26 - 9,2 \ln m$, Bild 14), danach sind die Werte als konstant anzusehen ($16 \text{ ms} \pm 2 \text{ ms}$).

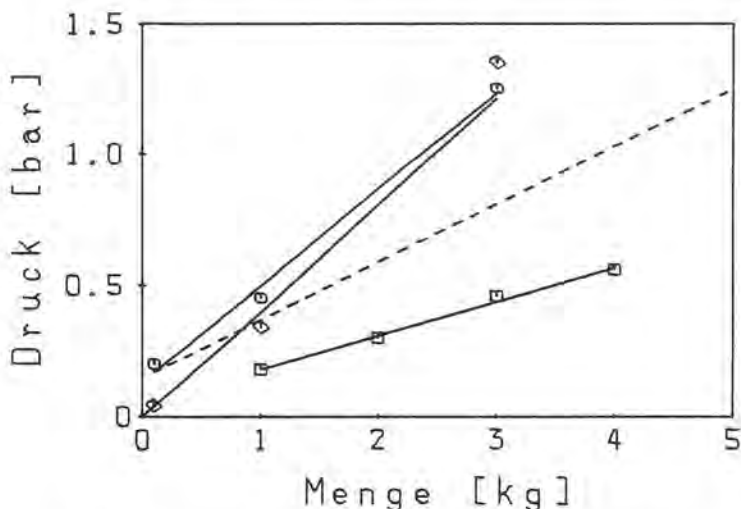


Bild 12

Maximaldruck $P_{\max,1}$ der 1. Druckspitze in Abhängigkeit von der Schwarzpulvermenge - Ausgleichsfunktion aus Bild 11 gestrichelt;
 ○ Wiederholung, Ausblasewand Typ I;
 ◇ Ausblasewand Typ I, Spanplatte nur aufgesteckt;
 □ Ausblasewand Typ II

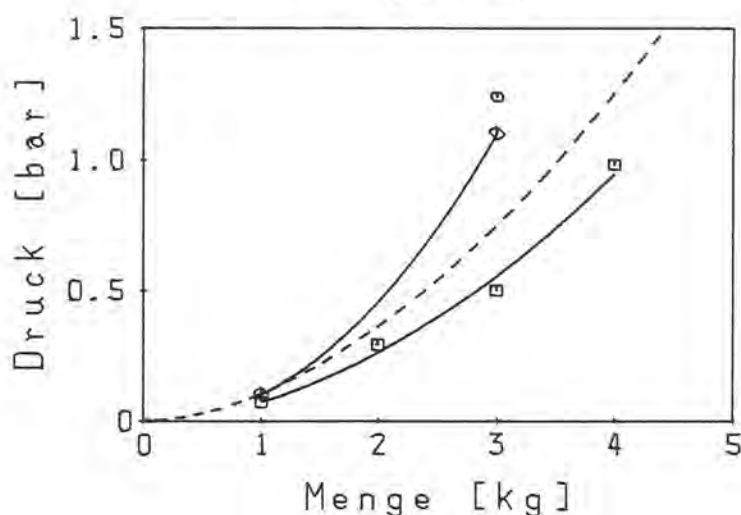


Bild 13

wie Bild 12, Maximaldruck $P_{\max,2}$ der 2. Druckspitze

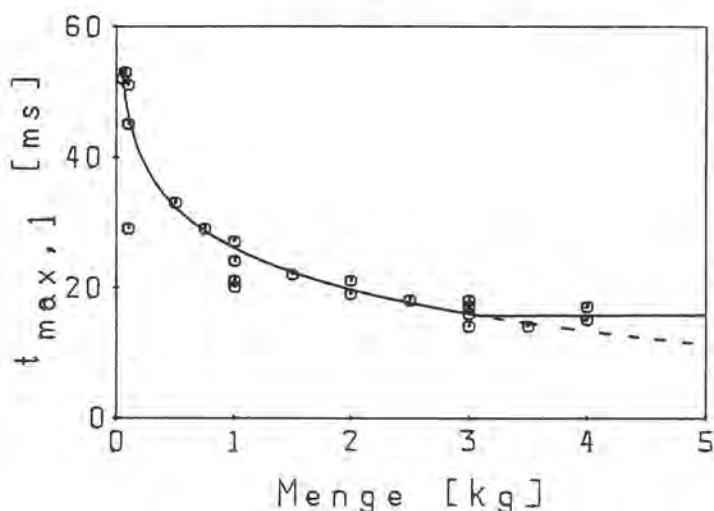


Bild 14

Druckanstiegszeit der 1. Druckspitze $t_{\max,1}$ in Abhängigkeit von der Schwarzpulvermenge - mit Ausblasewand

3.1.3 Ausblasewände aus Kunststoffolien

Die in Teil I Abschnitt 3.1.1.3 spezifizierte, armierte Kunststoffolie wurde parallel zu den Versuchen im Modellgebäude auch am 1-m³-Stahlkasten untersucht. Sie wurde, wie dort be-

schrieben, an einem Holzplattenrahmen befestigt, der auf den Stahlrahmen mit der 10-%-Öffnung aufgeschraubt war.

Der mit Ausblasewänden aus Kunststoffolie gemessene Druck-Zeit-Verlauf entspricht völlig dem Druck-Zeit-Verlauf im 1-m³-Stahlkasten mit freier Öffnung. Auf seine Darstellung wird daher verzichtet. Die Kunststoffolien sind im allgemeinen unter den beschriebenen Versuchsbedingungen nicht geplatzt, sondern vom Holzrahmen abgerissen, wobei sie vereinzelt auch eingerissen wurden. Die Bilder 15 und 16 zeigen den Versuchsaufbau und den Druckentlastungsvorgang.



Bild 15

1-m³-Stahl-
kasten mit Kunststoff-
folie als Ausblasewand



Bild 16

Deflagration
von 1 kg Schwarzpulver
mit Ausblasewand aus
Kunststoffolie

Die Folie behindert die Ausbreitung der Schwaden (Druckentlastung) nur geringfügig, besonders bei kleinen Mengen machen sich jedoch Unterschiede zwischen den in Tabelle 4 dargestellten Meßwerten und denen der Tabelle 1, die an der freien Druckentlastungsöffnung erhalten wurden, bemerkbar. So ist p_{max} bis zu einer Menge von 3 kg Schwarzpulver größer als der

Tabelle 4

Maximaldruck p_{max} , Druckanstiegszeit t_{max} und Dauer der positiven Druckphase t_+ bei der Deflagration von Schwarzpulver mit Kunststoffolie als Ausblasewand

Schwarzpulvermenge [kg]	$p_{max,1}$ [bar]	$t_{max,1}$ [ms]	$p_{max,2}$ [bar]	$p_{max,2}$ [ms]	t_+ [ms]
1	0,10	16	0,14	40	61
2	0,10	12	0,28	45	68
3	0,33	9,4	0,85	38	53
4	0,22	11	1,21	44	63

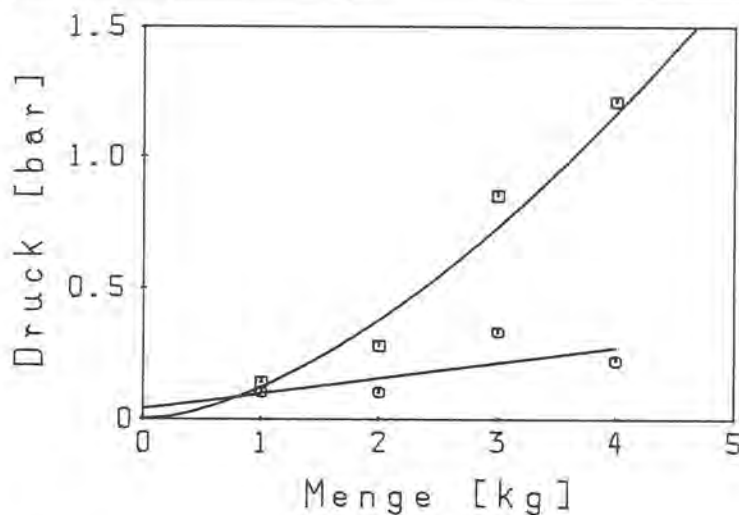


Bild 17

Maximaldrücke in Abhängigkeit von der Schwarzpulvermenge mit Kunststoffolie als Ausblasewand - O 1. Druckmaximum, □ 2. Druckmaximum

in Tabelle 1 angegebene Druck p_1 , der aus der Umsetzung der Schwarzpulverschüttung selbst resultiert und hier mit der verschließenden Wirkung der Folie zusammenfällt. Auch ist $t_{max,1}$ größer als die Anstiegszeit des Druckes p_1 von etwa 6 ms, aber kürzer als die mit Ausblasewänden aus Holz gefundenen Werte (Tabelle 3), die entsprechende Ausgleichsfunktion ist $t_{max,1} = 15 - 4,2 \ln m$. Die Kunststoffolie beeinflusst den Druck $p_{max,2}$ anscheinend geringer als den Druck $p_{max,1}$, wie der Vergleich mit Tabelle 1 zeigt. Die Druckanstiegszeit $t_{max,2}$ und die Dauer der positiven Druckphase sind im Rahmen der Meßgenauigkeit konstant ($t_{max,2} = 42 \text{ ms} \pm 3 \text{ ms}$, $t_+ = 61 \text{ ms} \pm 6 \text{ ms}$). Die Abhängigkeit der Maximaldrücke von der Schwarzpulvermenge ist in Bild 17 dargestellt, die Ausgleichsfunktionen sind $p_{max,1} = 0,059 m + 0,04$ (in Analogie zu Abschnitt 3.1.2 linear) und $p_{max} = 0,12 \cdot m^{1,6}$.

3.1.4 Versuche zur Erklärung der verschiedenen Druckmaxima

Das in Abschnitt 3.1.1 mit p_1 bezeichnete erste Druckmaximum, das überraschenderweise bei Versuchen mit freien Ausblaseöffnungen auftrat (vgl. auch Bilder 4 und 5 und Tabelle 1), kann folgendermaßen erklärt werden:

In Teil I und Teil III angeführte Beobachtungen haben gezeigt, daß nach der Zündung einer Schwarzpulverschüttung (Kreiskegel) von unten, d. h. in der Mitte seiner Grundfläche, das Schwarzpulver zunächst im Innern dieser Schüttung unter Eigenverdämmung reagiert, wobei die Schüttung äußerlich - wegen ihrer Trägheit - noch in Ruhe bleibt. Bricht die Schwarzpulverschüttung dann unter der Wirkung des Druckes im Innern der Schüttung auf, so führt diese Druckentlastung durch die Schüttung selbst zu einem Druckstoß außerhalb der Schwarzpulverschüttung, der sowohl in druckentlasteten Räumen als auch im Freifeld meßbar ist, hier als Druckmaximum p_1 an den Wänden des 1-m^3 -Stahlkastens.

Das nachfolgende Druckmaximum p_{\max} ist dann auf die Umsetzung desjenigen Schwarzpulvers zurückzuführen, das nicht unter Eigenverdämmung (Einschluß in der Schüttung) reagiert, also im wesentlichen auf die Umsetzung des aufgewirbelten äußeren Teiles der Schwarzpulverschüttung.

Die nachfolgend beschriebenen Versuche (Abschnitte 3.1.4.1 bis 3.1.4.3) wurden zur Bestätigung dieser Erklärung durchgeführt.

3.1.4.1 Zündung von oben

Wird eine Schwarzpulverschüttung von oben, also an der Spitze des Kreiskegels angezündet, so brennt das Schwarzpulver freiliegend ab, d. h. ohne Eigenverdämmung. In diesem Falle sollte keine dem oben diskutierten Maximum p_1 entsprechende Druckspitze auftreten. Bild 18 bestätigt dies.

Tabelle 5 gibt die Meßergebnisse im einzelnen wieder, die mit der freien, maximalen Ausblaseöffnung (17 %) erhalten wurden. Die Werte erlauben keine klare Aussage über ihre Abhängigkeit von der Schwarzpulvermenge, da die Standardabweichungen der angegebenen Druckwerte durchschnittlich ± 40 % des Meßwertes

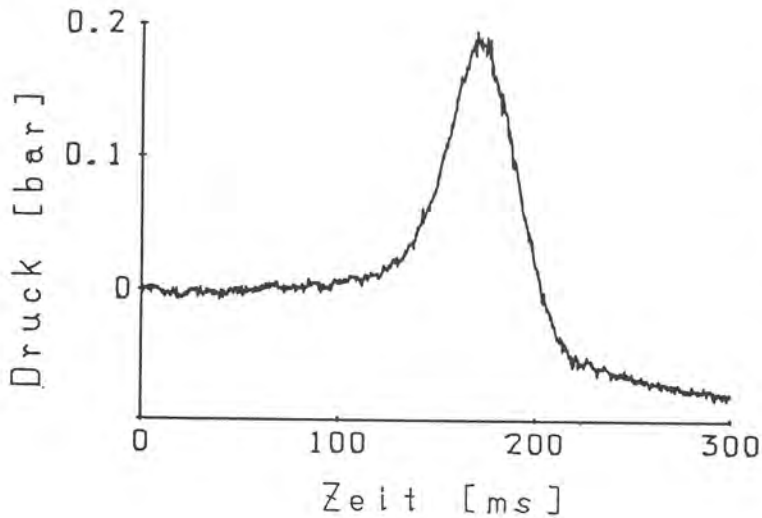


Bild 18

Druck-Zeit-Verlauf bei der Deflagration von 7 kg Schwarzpulver, angezündet an der Spitze der Pulverschüttung - freie 17-%-Öffnung (0 s ist hier der Zündzeitpunkt)

Tabelle 5

Maximaldruck p_{max} , Druckanstiegszeit t_{max} und Dauer der positiven Druckphase t_+ bei der Deflagration von Schwarzpulver, angezündet an der Spitze der Schwarzpulverschüttung - freie 17-%-Öffnung

Schwarzpulvermenge [kg]	p_{max} [bar]	t_{max} [ms]	t_+ [ms]
4	0,04	91	111)
	0,08	67	86)
	0,06	55	74)
	0,22	96	110)
5	0,18	93	109
6	0,16	97	128
7	0,19	110	141

unterschiedlich gelagerte Schwarzpulver



Bild 19

Anfangsphase der Umsetzung von 4 kg losen Schwarzpulvers bei Zündung an der Spitze der Schüttung

betragen und die Zeiten nur sehr ungenau zu bestimmen waren. Der Maximaldruck könnte in erster Näherung im untersuchten Mengenbereich als mengenunabhängig angesehen werden, die Zeiten dagegen als mit steigender Schwarzpulvermenge zunehmend. Dies stimmte mit der Tatsache überein, daß die Umsetzung einer derart gezündeten Schwarzpulverschüttung bei kleinen Mengen eher ein Abbrennen als eine Explosion im eigentlichen Sinne ist (vgl. Bild 19). Auf eine grafische Darstellung der statistisch nicht gesicherten Abhängigkeiten wird verzichtet.

3.1.4.2 Schwarzpulveraufwirbelung

Ebenso wie bei der Zündung der Schwarzpulverschüttung von oben dürfte auch in dem Fall kein erstes Druckmaximum p_1 auftreten, wenn eine Schwarzpulverschüttung vor der Zündung durch einen Druckluftstoß aufgewirbelt wird.

Eine Aufwirbelung im 1-m^3 -Stahlkasten mit freier 17-%-Öffnung wurde durch folgenden Versuchsaufbau erreicht. Das Schwarzpulver wird in einen auf dem Boden des Stahlkastens stehenden Stahltrichter gefüllt (Bild 20). In den Stahltrichter mündet eine Düse, die mit dünnem Papier abgedeckt ist. Diese Düse ist mit einer Druckgasflasche verbunden, deren Inhalt (5,4 l Luft unter 20 bar Überdruck) über ein sprengkapselbetätigtes Sperrventil sehr schnell dem Trichter zugeführt werden kann und dabei das Schwarzpulver aufwirbelt. Gleichzeitig mit der Sprengkapsel, die die Druckluft freisetzt, wird ein Zünder ausgelöst, der aus einer Zündpille und 10 g Schwarzpulver in

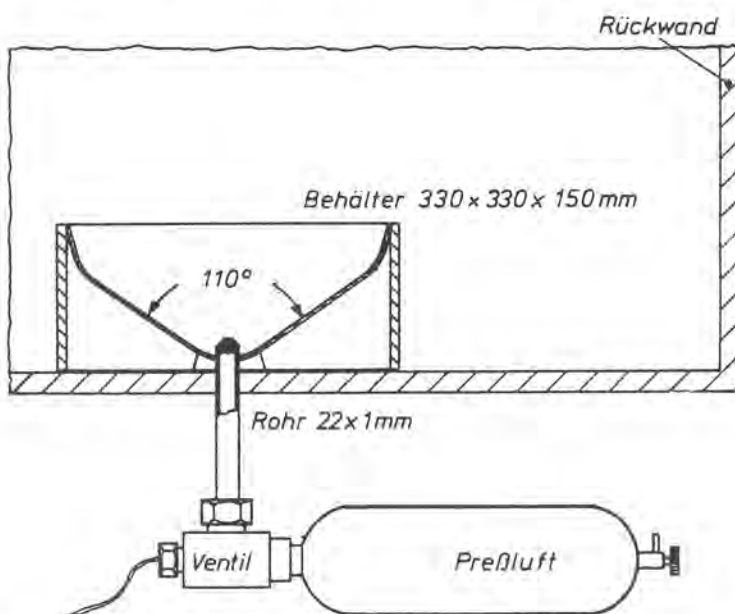


Bild 20
Versuchsaufbau zur
Aufwirbelung von
Schwarzpulver im
 1-m^3 -Stahlkasten

einem Beutel aus dünnem Papier besteht, und etwa 15 cm unter der Decke des Stahlkastens aufgehängt ist. Filmaufnahmen haben gezeigt, daß durch den zeitlichen Ablauf sichergestellt ist, daß keinesfalls das ruhende Schwarzpulver im Trichter gezündet wird.

Wie angenommen, zeigte sich mit einer Ausnahme im Druck-Zeit-Verlauf der Deflagration von aufgewirbelt gezündetem Schwarzpulver nur ein Druckmaximum (Bild 21). Im Druck-Zeit-Verlauf deutet sich durch die nach etwa 10 ms einsetzenden Schwingungen der Beginn der Aufwirbelung an, während der eigentliche Druckanstieg erst etwa 150 ms nach der Zündung anfängt. Die Meßdaten - jeweils für nur einen Versuch - sind in der Tabelle 6 zusammengestellt. Die Mengenabhängigkeit des Maximaldruckes ist in Bild 22 gezeigt, die Ausgleichsfunktion

Tabelle 6

Maximaldruck p_{max} , Druckanstiegszeit t_{max} und Dauer der positiven Druckphase t_+ bei der Deflagration von aufgewirbelt gezündetem Schwarzpulver - freie 17-%-Öffnung

Schwarzpulvermenge [kg]	p_{max} [bar]	t_{max} [ms]	t_+ [ms]
0,2	nicht meßbar		
1	0,02	15	36
2	0,08 0,25	27 31	48 39
3	0,48	31	41
4	0,95	31	39
5	0,96	37	46

1)

1) Mittelwerte aus Doppelpeak

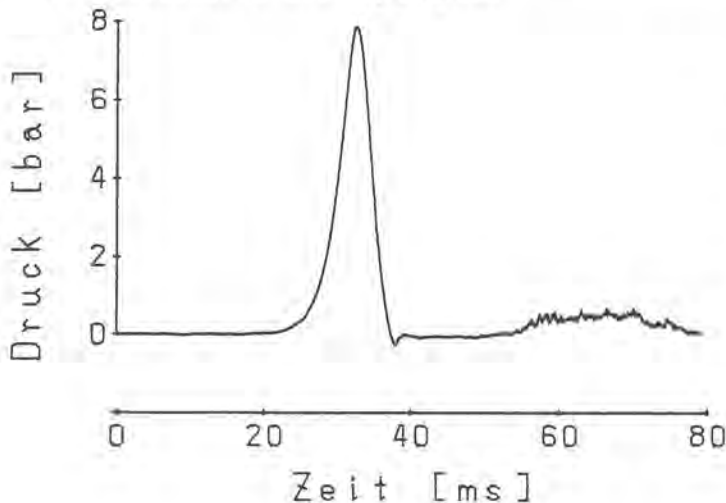


Bild 21

Druck-Zeit-Verlauf bei der Deflagration von 5 kg aufgewirbelt gezündeten Schwarzpulvers - freie 17-%-Öffnung (0 s ist hier der Zündzeitpunkt)

$p_{\max} = 0,023 \cdot m^{2,5}$ stimmt unter Berücksichtigung der hier auftretenden statistischen Fehler und systematischen Abweichungen mit der in Tabelle 1 angegebenen Ausgleichsfunktion $p_{\max} = 0,037 \cdot m^{2,1}$ überein. Auch die Zeiten (t_{\max} ist in Tabelle 1 nicht angegeben) stimmen soweit überein, daß die Versuchsergebnisse als Bestätigung der gegebenen Erklärung der Druckmaxima p_1 und p_{\max} angesehen werden können.

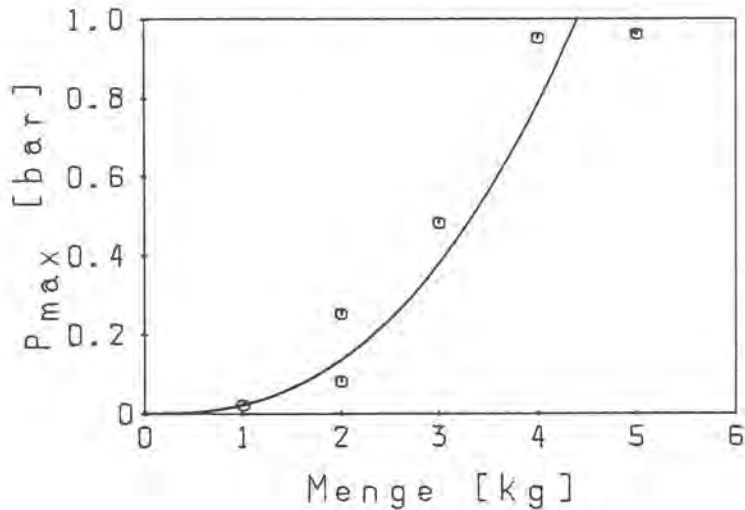


Bild 22

Maximaldruck in Abhängigkeit von der Schwarzpulvermenge mit freier 17-%-Öffnung - Schwarzpulver aufgewirbelt gezündet

3.1.4.3 Unterdrückung des Hauptmaximums

Ausgehend von dem Gedanken, daß die hier als Hauptmaximum bezeichnete Druckspitze p_{\max} von den aufgewirbelten äußeren Schwarzpulverschichten der Schüttung verursacht wird, sollte versucht werden, dieses Hauptmaximum gezielt zu unterdrücken. Zu diesem Zweck wurde entsprechend Bild 23 eine steigende Menge Schwarzpulver durch Ziegelsplitt als Inertstoff mit ähnlichen mechanischen Eigenschaften ersetzt. Der Ziegelsplitt hatte eine Schüttdichte von $0,9 \text{ g/cm}^3$ gegenüber der Schüttdichte $0,8 \text{ g/cm}^3$ des Schwarzpulvers. Ferner hatten 80 % des Ziegelsplitts eine Korngröße, die innerhalb des Korngrößenbereiches des Schwarzpulvers mit $0,5 \text{ mm}$ bis $1,2 \text{ mm}$ lag. Auch in der Kornform ähnelten sich diese Stoffe.

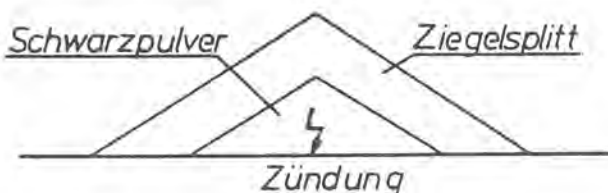


Bild 23

Schwarzpulverschüttung überschichtet mit Ziegelsplitt als Inertmaterial

Die Gesamtmenge von Schwarzpulver und Ziegelsplitt betrug 4 kg , der Anteil des Ziegelsplitts war 1 kg , 2 kg und 3 kg . In der Tabelle 7 sind die gemittelten Meßergebnisse aus je-

weils zwei bis drei Versuchen zusammengestellt, die Änderung des Druck-Zeit-Verlaufs mit Änderung des Splittanteils ist in Bild 24 ersichtlich. Die Druckspitzen bei etwa 20 ms werden, wie in Abschnitt 3.1.1 bereits erläutert, durch Körner (Schwarzpulver oder Ziegelsplitt) oder Schlacken verursacht, die mit hoher Geschwindigkeit gegen die Druckaufnehmer prallen.

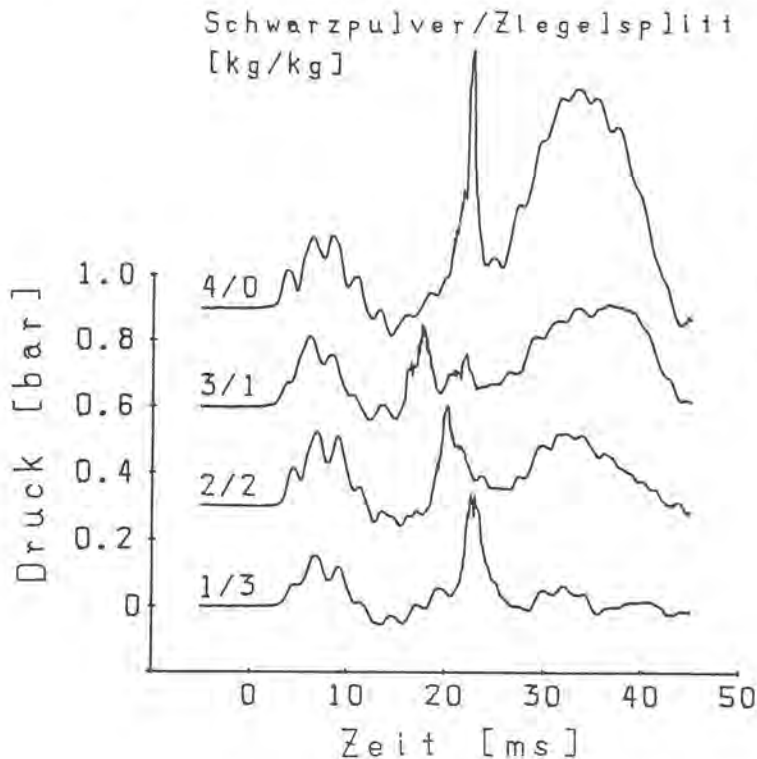


Bild 24

Druck-Zeit-Verlauf mit freier 17-%-Öffnung - äußere Schwarzpulverschicht ersetzt durch Ziegelsplitt als Inertmaterial

Mit steigendem Splittanteil sinkt in erster Näherung nur der Druck p_{\max} des Hauptmaximums, nicht aber der Druck p_1 des Vormaximums. Die Druckanstiegszeiten sind nicht vom Splittanteil abhängig ($t_1 = 5,8 \text{ ms} \pm 0,5 \text{ ms}$ und $t_{\max} = 32 \text{ ms} \pm 2 \text{ ms}$). Das Vormaximum wird also tatsächlich von einem inneren Teil der Schwarzpulverschüttung, das Hauptmaximum von den äußeren Schichten verursacht. Bild 25 gibt die Maximaldrücke p_1 und p_{\max} in Abhängigkeit von der Schwarzpulvermenge grafisch wieder.

Der leichte Anstieg von p_1 mit der Schwarzpulvermenge wird auf geringe Abweichungen zwischen den mechanischen Eigenschaften des Schwarzpulvers und des Ziegelsplitts zurückgeführt. Das Diagramm zeigt ferner, daß der Anteil des unter Einschluß reagierenden Schwarzpulvers kleiner als 1 kg ist. Extrapoliert man die Ausgleichsfunktion für p_{\max} unterhalb 1 kg linear, so erhält man $p_{\max} = 0 \text{ bar}$ für 0,35 kg Schwarzpulver

und somit einen Schätzwert für den unter Einschluß reagierenden Schwarzpulveranteil, etwa 10 % der gesamten Schüttung.

Tabelle 7

Maximaldrücke p_1 und p_{max} und Druckanstiegszeiten t_1 und t_{max} bei der Deflagration von Schwarzpulver in einer Schüttung aus Schwarzpulver und Ziegelsplitt - freie 17-%-Öffnung

Mengen [kg]		p_1 [bar]	t_1 [ms]	p_{max} [bar]	t_{max} [ms]
Schwarzpulver	Ziegelsplitt				
1	3	0,17	5,8	0,07	31
2	2	0,23	5,3	0,19	31
3	1	0,26	5,5	0,33	34
4	0	0,26	6,4	0,66	33

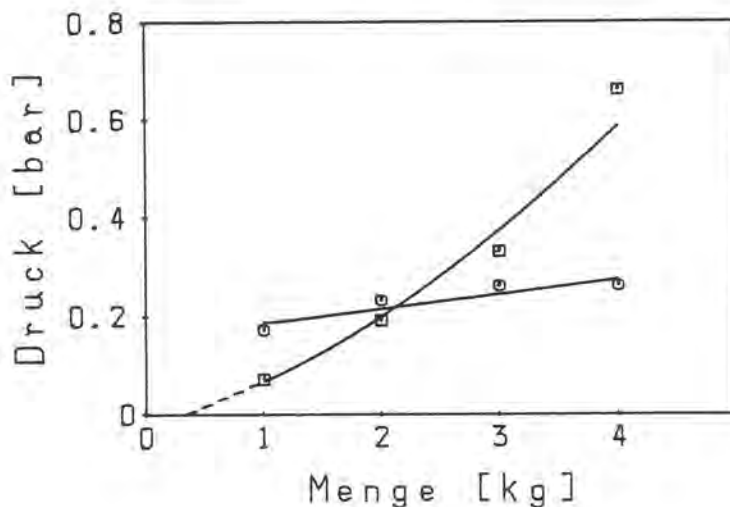


Bild 25

Maximaldrücke in Abhängigkeit von der Schwarzpulvermenge in einer Schüttung aus Schwarzpulver und Ziegelsplitt - freie 17-%-Öffnung -
 O p_1 , □ p_{max}

3.1.5 Diskussion

Bei Druckmessungen im 1-m³-Stahlkasten sind Druckspitzen gefunden worden, die verschiedenen Einschlußbedingungen (Verdämmung) des deflagrierenden Schwarzpulvers zugeordnet werden können. Das Schwarzpulver reagiert in einer von unten gezündeten Schwarzpulverschüttung zunächst unter Eigenverdämmung, das Aufbrechen der Schwarzpulverschüttung führt zu einer Entlastung des Druckes in der Schüttung und zu einem Druckanstieg an den Druckaufnehmern, die in den Wänden des Stahlkastens eingebaut sind.

Ohne an dieser Stelle auf die Natur dieses Druckereignisses näher eingehen zu müssen, kann davon ausgegangen werden, daß

der Überdruck am schnellsten abgebaut wird, wenn die jeweilige Druckentlastungsfläche frei, d. h. nicht durch irgendwelche Ausblasewände verschlossen ist. In diesen Fällen wurde die erste Druckspitze p_1 genannt, ihre Druckanstiegszeit t_1 ist praktisch konstant und beträgt etwa 6 ms. Auf ihre Mengenabhängigkeit wird erst im Teil V ausführlich eingegangen. Hier soll nur darauf hingewiesen werden, daß anscheinend die Höhe der Druckspitze p_1 stärker von den Schwarzpulvereigenschaften abhängt als die der zweiten Druckspitze (vgl. Tabelle 1).

Durch Ausblasewände vor den Druckentlastungsöffnungen werden die Einschlußbedingungen für das Schwarzpulver verändert. Dies geschieht durch Spanplatten mehr als durch Kunststofffolien. Der erste Druckanstieg dauert nun bis zum Bersten der Ausblasewände. Diese Druckspitze wurde hier $p_{max,1}$ genannt. Die Druckanstiegszeiten nehmen mit steigender Menge ab, aus den logarithmischen Ausgleichsfunktionen läßt sich für jeweils 1 kg Schwarzpulver $t_{max,1} = 15$ ms für die Kunststofffolien und $t_{max,1} = 26$ ms für die Spanplatten entnehmen. Die Mengenabhängigkeit läßt sich dadurch erklären, daß mit steigender Menge der Berstdruck eher erreicht wird. Der Druck $p_{max,1}$ ist aber auch selbst mengenabhängig und steigt - durch die Trägheit der Ausblasewand bedingt - mit der Schwarzpulvermenge linear an. Diese Deutung stimmt mit der Tatsache überein, daß die geringste Steigung mit den Kunststofffolien gefunden wurde.

Bei den Versuchen mit freier Ausblaseöffnung und denen mit Ausblasewänden reagiert ein bestimmter Teil des Schwarzpulvers ohne die Eigenverdämmung und ohne den zusätzlichen Einschluß durch die Ausblasewände, nämlich nach dem Aufbrechen des Schwarzpulverhaufens bzw. nach dem Bersten der Ausblasewände. Die Umsetzung dieses Schwarzpulvers verursacht ein zweites Druckmaximum, das entweder p_{max} oder $p_{max,2}$ genannt wurde. Die dazugehörige Druckanstiegszeit, und dadurch bedingt auch die Dauer der positiven Druckphase, nahmen entweder nur geringfügig mit der Menge ab oder waren praktisch konstant. Sie waren auch nicht signifikant von den Einschlußbedingungen abhängig (t_+ betrug $50 \text{ ms} \pm 9 \text{ ms}$ bei freier 10%-Öffnung, $61 \text{ ms} \pm 6 \text{ ms}$ mit Kunststoffolie und $50 \text{ ms} \pm 8 \text{ ms}$ mit Spanplatten). Bild 26 zeigt die Ausgleichsfunktionen für

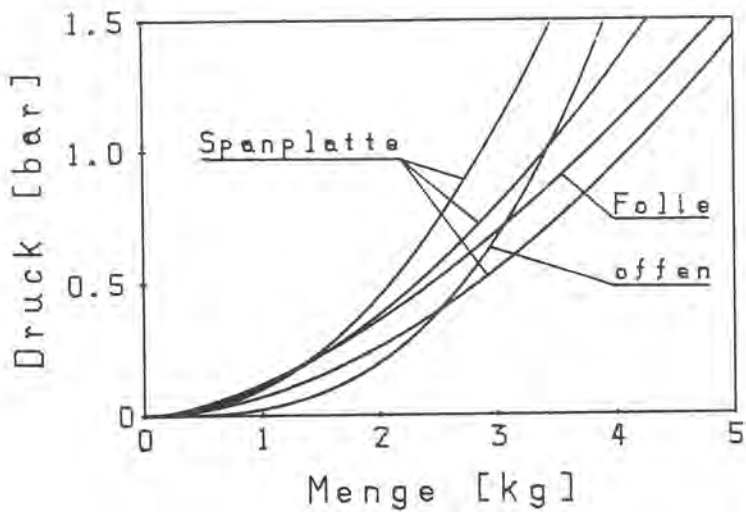


Bild 26

Maximaldruck der zweiten Druckspitze in Abhängigkeit von der Schwarzpulvermenge für die freie 10-%-Öffnung und für verschiedene Ausblasewände

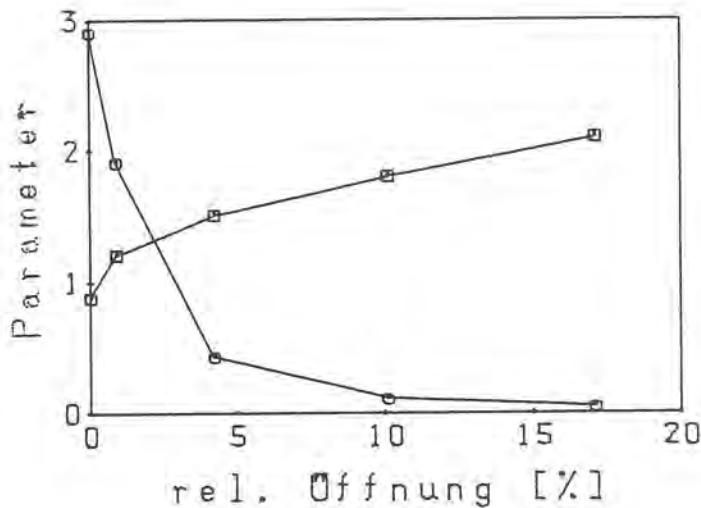


Bild 27

Parameter a und b der Ausgleichsfunktionen $p_{\max} = a \cdot m^b$ für die Mengenabhängigkeit der zweiten Druckspitze in Abhängigkeit von der relativen Öffnung - O Vorzahl a, □ Exponent b

die Mengenabhängigkeit der zweiten Druckspitze unter den verschiedenen Einschlußbedingungen im Vergleich. Berücksichtigt man die statistischen Fehler und die Abweichungen durch Einflüsse wie z. B. die Eigenschaften des Schwarzpulvers selbst, so kann für Abschätzungen mit der vorliegenden Schwarzpulver-sorten auch eine gemeinsame Funktion für das zweite Druckmaximum berechnet werden (10-%-Öffnung: $p_{\max} = 0,10 \cdot m^{1,8}$), die im übrigen besser mit den anderen in Tabelle 1 (Seite 93) angegebenen Funktionen übereinstimmt. In Bild 27 sind die Vorzahlen und Exponenten der Potenzfunktionen $p_{\max} = a \cdot m^b$ (m in kg, p_{\max} in bar) unter Berücksichtigung der o. a. Funktion für die 10-%-Öffnung in Abhängigkeit von der relativen Öffnung aufgetragen. Auf die Änderung dieser Parameter mit der relativen Öffnung wird noch in Teil V eingegangen.

3.2 Versuche mit pyrotechnischen Sätzen

Die Versuche, über die im folgenden berichtet wird, sind aus unterschiedlichen Anlässen durchgeführt worden. Ziel war generell, mit geringerem Aufwand als für Versuche im Modellgebäude erforderlich, Aussagen über Druckwirkungen in Räumen zu erhalten. Die Qualität dieser Aussagen ist im Einzelfall verschieden, solange noch keine allgemeingültige Theorie für die Übertragung der Ergebnisse in den Originalmaßstab zur Verfügung steht. Auf jeden Fall sind die Meßergebnisse für die Überprüfung von Modellen für diese Übertragung nützlich, insbesondere wenn Stoffe in verschiedenen Maßstäben untersucht wurden.

3.2.1 Versuche mit Zündschnurpulver

Untersucht wurde ein Zündschnurpulver, das ist ein Schwarzpulver mit geringerem Kaliumnitratgehalt und unterschiedlichen Anteilen an Schwefel und Holzkohle. Einige übliche Kenngrößen explosiver Eigenschaften eines entsprechenden Pulvers mit der Zusammensetzung 68 % KNO_3 , 26 % Schwefel und 6 % Holzkohle sind in [21] angegeben.

Gemäß seinem Verwendungszweck ist die Umsetzung des Zündschnurpulvers sowohl im geschlossenen Stahlkasten als auch mit 10-%-Öffnung und Spanplatte als Ausblasewand (Typ II) langsamer als die des hier benutzten Standardpulvers (Feuerwerkspulver). Bild 28 zeigt den Druck-Zeit-Verlauf mit Spanplatte als Ausblasewand. Nach der Druckentlastung erfolgt anscheinend ein oszillierender Abbrand, der die bei Langzeitmessungen mitunter auftretende Drift des Untergrundes über einen Zeitraum von etwa 100 ms kompensiert. Über ein bei größeren Mengen möglicherweise wesentlich werdendes zweites Druckmaximum läßt sich aufgrund dieser Messungen nichts aussagen, außer daß es nicht die Wirkung der entsprechenden Druckspitze des Standardschwarzpulvers haben wird. Im einzelnen sind die Ergebnisse der Druckmessungen in Tabelle 8 zusammengestellt. Im geschlossenen Stahlkasten nimmt der Maximaldruck praktisch linear zu (Bild 29, $p_{\max} = 0,67 \cdot m^{1,02}$) und erreicht etwa 1/5 des Druckes, der sich mit dem Standardschwarzpulver ergeben hatte. Neben der anderen Zusammensetzung des Zündschnur-

Tabelle 8

Maximaldruck p_{max} , Druckanstiegszeit t_{max} und Dauer der positiven Druckphase t_+ bei der Umsetzung von Zündschnurpulver

Stahlkasten	Menge [kg]	p_{max} [bar]	t_{max} [ms]	t_+ [ms]
geschlossen	0,2	0,13	309	≈ 1000
	0,4	0,25	314	
	0,6	0,42	315	
	0,8	0,52	366	
Spanplatte als Ausblasewand (Typ II)	1	0,044	132	149
	2	0,059	121	139
	3	0,076	82	130
	4	0,057	49	65

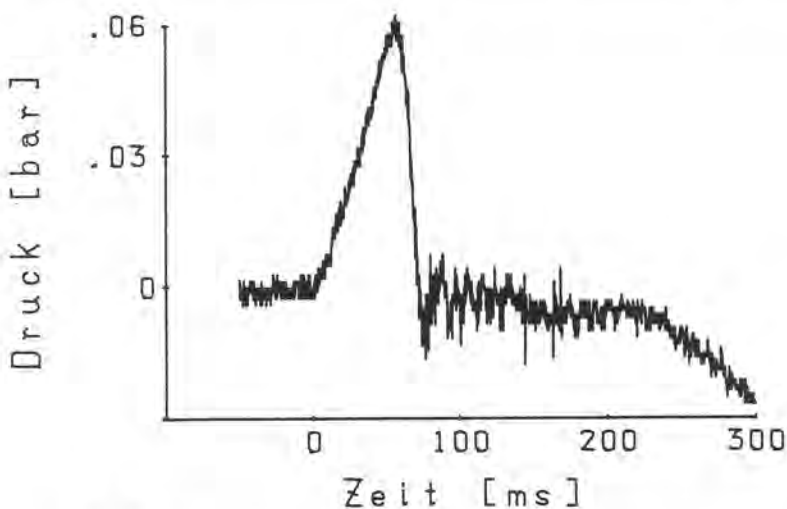


Bild 28

Druck-Zeit-Verlauf bei der Umsetzung von 4 kg Zündschnurpulver mit Spanplatte als Ausblasewand (Typ II)

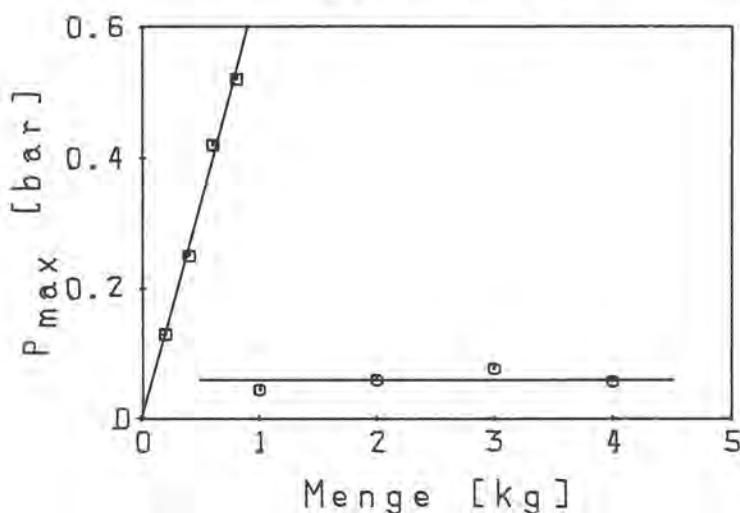


Bild 29

Maximaldrücke in Abhängigkeit von der Zündschnurpulvermenge -
 □ geschlossener Stahlkasten
 ○ Spanplatte als Ausblasewand (Typ II)

pulvers bewirkt auch die wesentlich langsamere Umsetzung ($t_{max} = 326 \text{ ms} \pm 27 \text{ ms}$, $t_+ \approx 1000 \text{ ms}$) die niedrigeren Maximaldrücke, da die Versuchsanordnung im 1-m³-Stahlkasten nur

für sehr schnelle Reaktionen als adiabatisch anzusehen ist. Im Stahlkasten mit Spanplatte als Ausblasewand wurden praktisch mengenunabhängige Maximaldrücke erhalten (Bild 29, $p_{\max} = 0,059 \text{ bar} \pm 0,01 \text{ bar}$). Sie entsprechen den 0,05 bar Achsenabschnitt der Ausgleichgeraden, die für die Messungen mit dem Standardschwarzpulver und Ausblasewand Typ II erhalten wurden. Da ferner die Spanplatten bei den Versuchen mit Züandschnurpulver nicht zerbrochen sind, ist dieser Druck den Auszugskräften der Befestigungsschrauben gleichzusetzen. Mit steigenden Mengen verringern sich - wie auch bei den anderen Versuchsreihen mit Ausblasewänden - die Druckanstiegszeiten bis zur Druckentlastung durch die Spanplatte. Die Dauer der positiven Druckphase bezieht sich hier nur auf die erste und einzige deutliche Druckspitze.

3.2.2 Versuche mit Feuerwerkssternen

In Teil I Abschnitt 3.2.1 sind Versuche mit Feuerwerkssternen im Modellgebäude beschrieben. Mit dem gleichen Versuchsmaterial wurden auch Versuche im Stahlkasten (geschlossen und mit Spanplatte als Ausblasewand Typ II) durchgeführt, allerdings abweichend von den Versuchen im Modellgebäude in der im Stahlkasten üblichen Anordnung (lose Schüttung und Zündung von unten). Die Meßergebnisse, erhalten mit roten und mit silbernen Sternen, sind in der Tabelle 9 zusammengestellt. Dem mehr oder minder starken Absinken des Untergrundes ab einer bestimmten Dauer der Druckmessung wurde bei der Auswertung soweit möglich Rechnung getragen. Die Standardabweichungen betragen im Durchschnitt, bezogen auf die Größe des jeweiligen Meßwertes, für den Maximaldruck $\pm 4 \%$ im geschlossenen Stahlkasten und $\pm 22 \%$ mit Spanplatte, für die Druckanstiegszeit $\pm 6 \%$ und die Dauer der positiven Druckphase $\pm 13 \%$ im geschlossenen Stahlkasten und $\pm 16 \%$ bzw. $\pm 27 \%$ für die angegebenen Zeiten mit Spanplatte (rote bzw. silberne Sterne). Die Spanplatten sind in keinem Fall bei der Druckentlastung zerbrochen und blieben bei 1 kg silberner Sterne teilweise am Rahmen.

Grundsätzlich unterscheiden sich die Feuerwerkssterne in ihrem Verhalten nicht von dem gleichfalls langsam reagierenden Züandschnurpulver (Abschnitt 3.2.1), wobei insbesondere die

Tabelle 9

Maximaldruck P_{max} , Druckanstiegszeit t_{max} und Dauer der positiven Druckphase t_+ bei der Umsetzung von Feuerwerkssternen

Stahlkasten	Menge [kg]	rote Sterne			silberne Sterne		
		P_{max} [bar]	t_{max} [ms]	t_+ [ms]	P_{max} [bar]	t_{max} [ms]	t_+ [ms]
geschlossen	0,5	0,29	304	$\approx 1000^1)$	0,2	833	$\approx 1500^1)$
	1,0	0,59	301		0,5	791	
	1,5	0,79	288		0,67	858	
	2,0	1,02	244		0,83	758	
Spanplatte als Ausblasewand (Typ II)	1	0,033	103	126	0,028	315	650 ¹⁾
	2	0,061	71	88	0,041	257	328
	3	0,070	87	103	0,047	315	344
	4	0,050	48	68	0,055	153	174
	5	0,065	54	70	0,060	130	150

1) ungenau, wegen Drift des Untergrundes

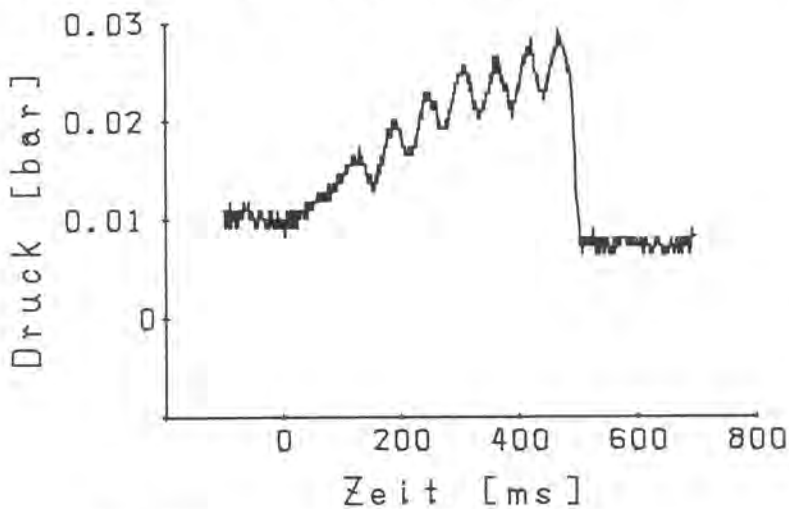


Bild 30

Druck-Zeit-Verlauf bei der Umsetzung von 3 kg silberner Sterne mit Spanplatte als Ausblasewand (Typ II)

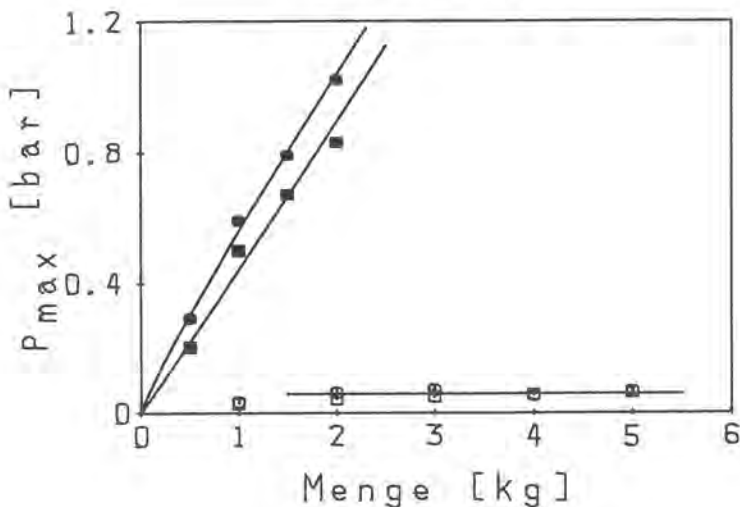


Bild 31

Maximaldrücke in Abhängigkeit von der Menge - Feuerwerkssterne, rot (O) und weiß (□) geschlossener Stahlkasten: ausgefüllte Symbole Spanplatte als Ausblasewand (Typ II): offene Symbole

roten Sterne ähnliche Werte wie das Zündschnurpulver liefern. Eine Besonderheit ist in einigen Druck-Zeit-Diagrammen zu finden, die mit silbernen Sternen und Spanplatte gemessen wurden. In ihnen sind Oszillationen nicht nur nach dem Nachgeben der Spanplatte (Druckentlastung) zu erkennen - wie in Bild 28, sondern auch vor dem Druckmaximum (Bild 30).

Bild 31 zeigt, daß die Maximaldrücke im geschlossenen Kasten praktisch linear mit der Menge zunehmen ($p_{\max} = 0,56 \cdot m^{0,90}$ für rote und $p_{\max} = 0,44 \cdot m^{1,0}$ für silberne Sterne), während sie mit Spanplatte als Ausblasewand auch hier ab 2 kg praktisch konstant und für beide Sternsorten annähernd gleich sind ($p_{\max} \approx 0,06 \text{ bar} \pm 0,01 \text{ bar}$). Die gemessenen Zeiten sind im geschlossenen Kasten konstant oder schwach abnehmend (rot: $t_{\max} \approx 0,3 \text{ s}$, $t_+ \approx 1 \text{ s}$ und silber: $t_{\max} \approx 0,8 \text{ s}$, $t_+ \approx 1,5 \text{ s}$) und im Kasten mit Spanplatte deutlich, wenn auch mit großen Schwankungen, abnehmend, wobei wiederum die roten Sterne schneller reagieren als die silbernen.

3.2.3 Versuche mit Knallsätzen

Mit einem Knallsatz aus 70 % Kaliumperchlorat (99,5 % KClO_4 , 0,5 % SiO_2) und 30 % Aluminium (Pyroschliff, 90 % freies Metall) wurden Messungen im geschlossenen Stahlkasten und mit Spanplatte als Ausblasewand (Typ I) durchgeführt (Tabelle 10). Mit Mengen bis zu 100 g zeigt der Knallsatz ein Verhalten, das dem Verhalten entsprechend kleiner Mengen Schwarzpulvers ähnlich ist, nur sind die Maximaldrücke (Bild 31) etwa doppelt so groß ($p_{\max} = 11 \cdot m^{1,1}$ im geschlossenen Stahlkasten und $4,4 \cdot m^{1,0}$ mit Spanplatte), und sie werden in etwas kürzeren Zeiten erreicht. Auf die Darstellung des Druck-Zeit-Verlaufes kann daher verzichtet werden.

Ab 125 g Knallsatz tritt unter der gegebenen Anordnung (lose Schüttung, Zündung von unten) ein Reaktionsablauf mit sprunghaft gesteigerten Maximaldrücken und Umsetzungsgeschwindigkeiten auf. Bild 32 zeigt einen derartigen Druck-Zeit-Verlauf, der Maximaldruck liegt in der Größenordnung der Drücke von senkrecht reflektierten Stoßwellen detonierender Sprengstoffe [5]. Verschiedene Autoren geben für die TNT-Äquivalenz dieses oder ähnlicher Knallsätze die Werte 0,55 bis 1,3 [22], 0,42 [23] und 0,50 bzw. 0,54 [24] an. Die zweite, noch

Tabelle 10

Maximaldruck p_{max} und Druckanstiegszeit t_{max} bei der Umsetzung von Kaliumperchlorat-Aluminium-Knallsatz

Stahlkasten	Menge [kg]	p_{max} [bar]	t_{max} [ms]
geschlossen	0,05	0,39	48
	0,10	0,84	40
	0,05	0,21	29
	0,075	0,34	19
	0,10	0,42	25
	0,125	42	0,043

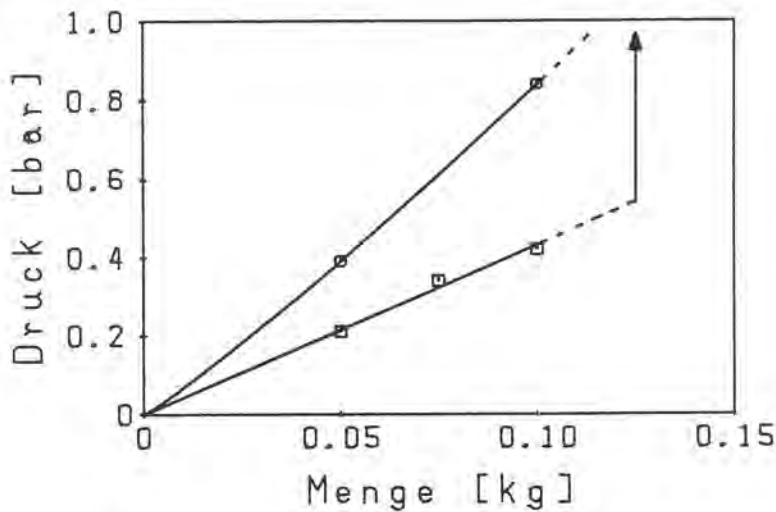


Bild 32

Maximaldrücke in Abhängigkeit von der Knallsatzmenge -
 O geschlossener Stahlkasten
 □ Spanplatte als Ausblasewand (Typ I)

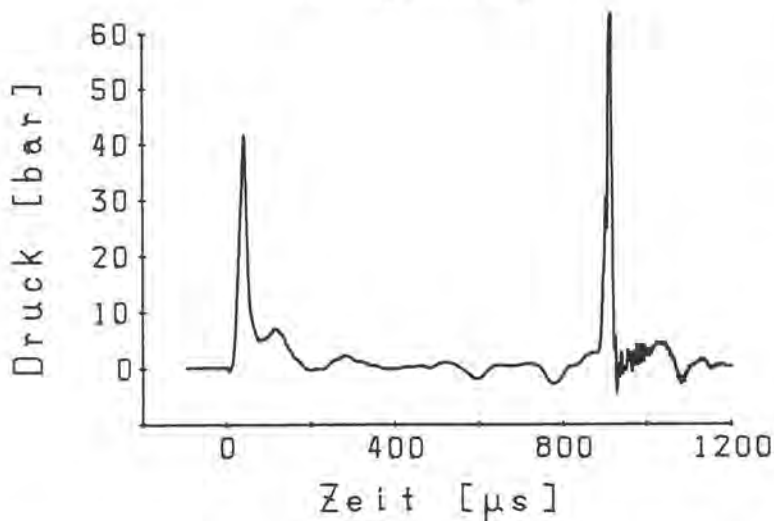


Bild 33

Druck-Zeit-Verlauf bei der Umsetzung von 125 g Knallsatz mit Spanplatte als Ausblasewand (Typ I)

höhere Druckspitze im Druck-Zeit-Verlauf (Bild 33) kann nur als Reflexion im Stahlkasten angesehen werden. Unter zugrundelegen einer Wegdifferenz von 1 m hätte danach die Stoßwelle eine mittlere Geschwindigkeit von etwa 1200 m/s.

Die Änderung im Reaktionsablauf ab 125 g ist in Bild 32 mit einem senkrecht nach oben weisenden Pfeil angedeutet. Diese

sogenannte Grenzladung soll nach Aussage verschiedener Hersteller derartiger Knallsätze auch weitaus kleiner sein können, z. B. abhängig von der Aluminiumsorte.

Nach [33] ist die Grenzladung diejenige Menge eines Explosivstoffes, bei der eine anfänglich langsamere Umsetzung des Explosivstoffes (z. B. ein Brand) in die Detonation übergeht. Ob und unter welchen Bedingungen der Kaliumperchlorat-Aluminium-Knallsatz stationär detonieren kann, ist noch ungeklärt (auf Einzelheiten soll hier nicht eingegangen werden). Daher wird hier der Begriff Grenzladung weiter gefaßt und meint jede Menge eines Explosivstoffes, bei der sich die Umsetzungsgeschwindigkeit sprunghaft ändert.

3.2.4 Diskussion

Die Druckmessungen mit verschiedenen pyrotechnischen Sätzen - Zündschnurpulver, Feuerwerkssterne und Knallsatz - zeigen den Einfluß der Umsetzungsgeschwindigkeit auf den Druck-Zeit-Verlauf im 1-m³-Stahlkasten, besonders bei Versuchen mit Spanplatten als Ausblasewand.

Im geschlossenen Stahlkasten steigt der Maximaldruck, verursacht durch die entstehenden heißen Gase (Schwaden), in erster Näherung mit der Menge des umgesetzten Stoffes linear an (vgl. Teil III Abschnitt 2.2.1). Dies ergibt sich - ideales Verhalten der Gase angenommen - aus der allgemeinen Gasgleichung, nach welcher der Druck der Gasmenge und der Temperatur proportional und dem Volumen umgekehrt proportional ist. Somit wird auch nur ein Druckmaximum gefunden, nach dessen Erreichen der Druck auf Grund von Undichtigkeiten und Abkühlung mehr oder minder schnell abnimmt. Für den Knallsatz gilt dies allerdings nicht mehr nach Überschreiten der Grenzladung, da dann der Maximaldruck an der Wand des Stahlkastens nicht mehr durch den Schwadendruck bestimmt wird.

Im Stahlkasten mit Spanplatte als Ausblasewand ist die Höhe der ersten Druckspitze bei den Versuchen mit Zündschnurpulver und Feuerwerkssternen konstant $p_{\max} \approx 0,06$ bar, da wegen der geringen Umsetzungsgeschwindigkeit die Druckentlastung sofort wirksam wird, sobald die Auszugskräfte der Befestigungsschrauben der Spanplatte überschritten sind. Die schnellere Umsetzung des Knallsatzes bei Mengen unterhalb der Grenzla-

dung bewirkt wie bei dem Standardschwarzpulver ein praktisch lineares Anwachsen der ersten Druckspitze mit der Stoffmenge, abhängig von der Dynamik des Druckentlastungsvorganges, der sich aus dem Bersten der Spanplatte und dem Abströmen der Schwaden zusammensetzt.

Das zweite Druckmaximum tritt bei den sich langsam umsetzenden pyrotechnischen Sätzen nicht oder nur andeutungsweise auf, über das Verhalten größerer Mengen können daraus, selbst bei gleichen Ladedichten (d. h. in größeren Räumen), keine Schlüsse gezogen werden.

Bei den Versuchen mit Knallsatz und Spanplatte als Ausblasewand ist unterhalb der Grenzladung wegen der kleinen Mengen kein zweites Druckmaximum zu finden. Oberhalb der Grenzladung tritt ein Druckereignis auf, welches nicht mit dem Schwadendruck zu vergleichen ist. Dieses Druckereignis ist in der Nähe des Explosionsortes als Stoßwelle anzusehen und hängt, wie die Stoßwelle detonierender Explosivstoffe, nicht unmittelbar vom Volumen des jeweiligen Raumes sondern vom Abstand zwischen dem Ort der Explosion und dem Ort der Messung ab. Auf derartige Zusammenhänge wird in den Teilen III und V dieses Berichtes noch näher eingegangen.

4. Zusammenfassung

In einem 1-m³-Stahlkasten als Modell eines Raumes in Ausblasebauart mit schwerer Dachausführung wurden Explosions- bzw. Abbrandversuche mit Schwarzpulver und anderen pyrotechnischen Sätzen durchgeführt. Die unterschiedlichen Druckmaxima, die in dem Stahlkasten auftreten, wurden gedeutet und die Erklärung der Maxima durch spezielle Versuche bestätigt. Die Abhängigkeiten der Maximaldrücke und Druckanstiegszeiten bzw. der Dauer der positiven Druckphasen im Stahlkasten von der Stoffmenge, der Größe der Druckentlastungsfläche und der Art der Ausblasewand wurden angegeben und diskutiert. Hinsichtlich der Übertragbarkeit der Versuchsergebnisse in andere Versuchsmaßstäbe wird auf den Teil V dieses Berichtes verwiesen.

Ferner wurden Ausbreitungsparameter für den Schalldruck und die Wärmestrahlung außerhalb des Stahlkastens in Druckentlastungsrichtung bestimmt.

Teil III. Versuche zur Klärung spezieller Fragen

N. Pfeil und H. Andre

1. Einleitung

Die in den Teilen I und II dieses Berichtes beschriebenen Untersuchungen gaben zu Fragen Anlaß, denen unter Versuchsbedingungen nachgegangen wurde, die wesentlich von denen in dem Modellgebäude oder im 1-m³-Stahlkasten abweichen. Über diese weiteren Versuche, deren Ergebnisse für die vergleichenden Betrachtungen im Teil V benötigt werden, wird hier berichtet.

2. Versuche in einem 6-l-Stahlrohr

Das in Abschnitt 2.1 näher beschriebene Stahlrohr diente ursprünglich der Untersuchung des Einflusses von Flammen und Wärmestrahlung auf die Druckmessung mit Quarzkristall-Druckaufnehmern bzw. der Wirkung von Schutzmaßnahmen (vgl. Teil I Abschnitt 2.2). Darüberhinaus erwies es sich als geeignet zur Ermittlung des Druck-Zeit-Verlaufes der Reaktionen explosionsgefährlicher Stoffe im Labormaßstab unter konstantem Volumen (geschlossenes Behältnis), aber auch für spezielle Untersuchungen, wie z. B. die vergleichende Prüfung verschiedener Kunststoffolien.

2.1 Versuchsaufbau und Meßmethoden

Das 6-l-Stahlrohr (Volumen 5,73 l) besteht aus einem etwa 70 cm langen Vierkantrohr (Wanddicke 4 mm), dessen Stirnseiten mit Flanschen versehen sind, die mit entsprechenden Verschlußplatten verschlossen werden können (Bild 1). Die Rohrstutzen auf der Oberseite des Stahlrohres dienen als Füllöffnungen und zur Durchführung der Zünderdrähte. Druckaufnehmer können in eine der Verschlußplatten eingesetzt werden.

Die Zünder und die Geräte für die Druckmessung sind bereits in Teil I Abschnitt 2.2 beschrieben.

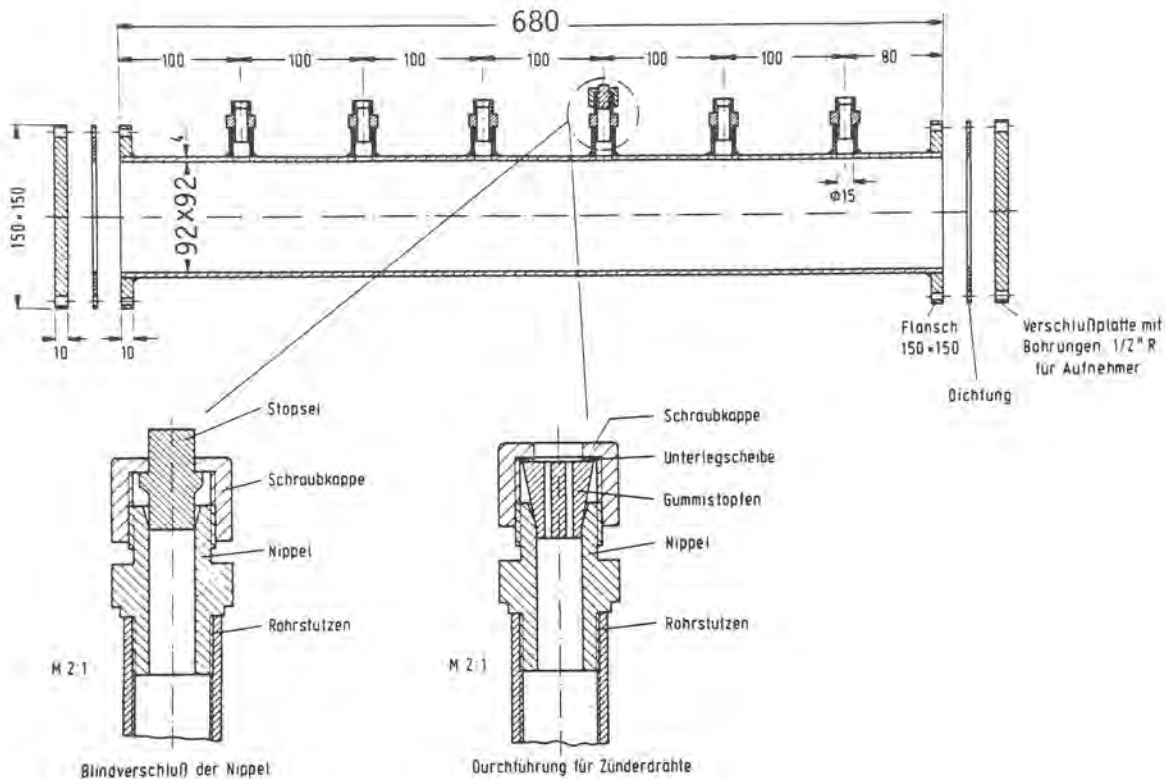


Bild 1

6-1-Stahlrohr (Maße in mm)

2.2 Versuchsergebnisse

Neben dem hier üblicherweise benutzten Standardschwarzpulver (vgl. Teil I Abschnitt 3.1) wurden zum Vergleich vier weitere Schwarzpulverarten untersucht und ferner die Sternsätze der in den vorigen Teilen dieses Berichtes beschriebenen Feuerwerkssterne. Die Versuche mit Kunststoffolien wurden mit dem Standardschwarzpulver durchgeführt.

2.2.1 Versuche mit Schwarzpulvern

In einem geschlossenen Behältnis steigt der Druck nach der Zündung von Schwarzpulver im allgemeinen stetig bis zum Erreichen des Maximaldruckes an, um dann aufgrund der Abkühlung der Schwarzpulverschwaden wieder abzunehmen. Eine bildliche Darstellung des Druck-Zeit-Verlaufes ist daher nicht erforderlich. Die Ergebnisse der Druckmessungen und die Charakterisierung der verschiedenen Schwarzpulver sind der Tabelle 1 zu entnehmen, den Werten liegen jeweils 5 Versuche mit 3 g, 5 g, 8 g und 10 g zugrunde. Die Ausgleichsfunktionen zeigen durchschnittlich eine Mengenabhängigkeit $m^{0,9}$, wobei die Abweichung

vom Exponenten 1 darauf zurückzuführen ist, daß neben den Schwarzpulverschwadern auch die im Stahlrohr befindliche Luft zum jeweils herrschenden Druck beiträgt.

Tabelle 1

Maximaldruck p_{max} in Abhängigkeit von der Schwarzpulvermenge m in g und mittlere Druckanstiegszeit t_{max} von verschiedenen Schwarzpulvern im 6-l-Stahlrohr

Bezeichnung des Schwarzpulvers Charakterisierung	Ausgleichs- funktion p_{max} [bar]	p_{max} für 1 kg/m ³ [bar]	t_{max} [ms]
Feuerwerkspulver 75 % Korngröße 0,5 - 1,2 mm unpoliert	$0,73 \cdot m^{0,9}$	3,5	65 ± 5
Feuerwerkspulver Hartkorn 0,3 - 0,7 mm	$0,80 \cdot m^{0,88}$	3,7	45 ± 4
Feuerwerkspulver Hartkorn 1,68 - 2,5 mm	$0,74 \cdot m^{0,88}$	3,4	69 ± 16
Mehlpulver	$0,71 \cdot m^{0,84}$	3,1	142 ± 20
Goldregenpulver 1) 0,1 - 1,5 mm	$0,32 \cdot m^{1,03}$	1,9	403 ± 38

1) Während die Feuerwerkspulver und das Mehlpulver die übliche Zusammensetzung 75 % Kaliumnitrat, 15 % Holzkohle und 10 % Schwefel hatten, enthielt das Goldregenpulver nur etwa 50 % Kaliumnitrat und entsprechend mehr Holzkohle

Die drei Feuerwerkspulver und das Mehlpulver machen deutlich, daß eine langsamere Umsetzung auch in einem geschlossenen Behältnis zu einem geringeren Maximaldruck führt, sofern die Reaktion nicht adiabatisch, d. h. mit Wärmeabgabe an das Behältnis und die Umgebung verbunden ist. Besonders deutlich wird dies beim geringen Maximaldruck des Goldregenpulvers, der zusätzlich auch auf die abweichende Zusammensetzung zurückzuführen ist. Zum besseren Vergleich der Schwarzpulver ist außerdem der Maximaldruck für die Ladedichte 1 kg/m³ angegeben.

2.2.2 Versuche mit pyrotechnischen Sätzen

Es wurden jeweils 5 Messungen mit 3 g, 4 g, 6 g und 8 g des roten und des silbernen Sternsatzes durchgeführt; die Zusammensetzung der Sternsätze ist in Teil I Abschnitt 3.2.1.1

angegeben. Der Maximaldruck p_{\max} in Abhängigkeit von der Satzmenge m in g ist durch die Ausgleichsfunktionen $p_{\max} = 0,30 \cdot m^{1,04}$ (roter Sternsatz) und $p_{\max} = 0,34 \cdot m^{1,14}$ (silberner Sternsatz) beschrieben. Für die Ladedichte 1 kg/m^3 ergeben sich daraus 1,8 bar (rot) und 2,5 bar (silber).

Die Druckanstiegszeiten schwankten teilweise um über 50 % und betragen im Mittel etwa 800 ms (rot) und 600 ms (silber), wobei die Werte bei dem silbernen Sternsatz deutlich mit der Menge abnehmen ($t_{\max} = -41 m + 780$).

Das Abbrandverhalten der losen Sätze darf allerdings nicht mit dem der fertigen, granulierten Sterne gleichgesetzt werden.

2.2.3 Versuche mit Kunststofffolien für leichte Ausblasewände

Zunächst wurden die Berstdrücke einiger Kunststofffolien bei quasistatischer Druckbelastung ermittelt. Zu diesem Zwecke konnten die Folien an einer Stirnseite des 6-l-Stahlrohres mit einem Stahlrahmen (anstelle der Verschlußplatte) an den Flansch gepreßt werden. Die Ausblaseöffnung (lichte Öffnung des Rahmens) betrug 9 cm x 9 cm; die Kanten des Stahlrahmens waren gerundet, damit keine zusätzlichen mechanischen Belastungen der Folien bei den Berstversuchen auftreten. Es wurde Druckluft aus der Versorgungsleitung des Labors verwendet, die Druckanstiegsgeschwindigkeit betrug etwa 0,5 bar/s. Tabelle 2 gibt über die verschiedenen Kunststofffolien und die erhaltenen Berstdrücke (Mittelwerte von jeweils drei Versu-

Tabelle 2

Charakterisierung und Berstdrücke verschiedener Kunststofffolien - Fläche 9 cm x 9 cm

Bezeichnung	Hersteller	Dicke [mm]	Flächengewicht [g/m ²]	Berstdruck [bar]
PE-Folie	-	0,07	70	0,34 ± 0,02
PE-Folie	-	0,085	70	0,33 ± 0,03
PE-Gitterfolie, K9B	Kornitrol	0,1	120	0,23 ± 0,06
PE-Gitterfolie, D-FOL L	Dörken	0,13	150	0,58 ± 0,03
PVC-Gitterfolie, mittel	Benecke	0,4	470	2,03 ± 0,06

PE = Polyethylen, PVC = Polyvinylchlorid

chen) Auskunft. Die Ergebnisse zeigen, daß sorgfältig eingespannte Folien nicht unbeträchtlichen Drücken widerstehen können, insbesondere Folien, wie die mittelschwere, armierte PVC-Folie, die auch für die Versuche mit Kunststofffolien verwendet wurde, die in den Teilen I und II beschrieben sind.

Anschließend wurden zwei der armierten Folien unter gleichzeitiger Druck- und Temperaturbelastung untersucht, wobei sowohl die Druckbelastung durch Änderung der Schwarzpulvermenge als auch die Temperaturbelastung durch Änderung des Abstandes Schwarzpulverschüttung - Kunststoffolie und durch Änderung der Schwarzpulvermenge variiert werden konnte. Die Ergebnisse der Druckmessungen sind in der Tabelle 3 zusammengestellt.

Tabelle 3

Maximaldruck P_{max} und Druckanstiegszeit t_{max} bei Berstversuchen mit Schwarzpulver und Kunststofffolien im 6-l-Stahlrohr

Folie	Schwarzpulvermenge g	P_{max} bar / t_{max} ms						P_{max} im geschlossenen Rohr bar
		Abstand Folie - Schwarzpulverschüttung cm						
		7	17	27	37	47	57	
PVC-Gitterfolie, mittel	1	-/-*						0,73
	2	1,44/184	1,21/-*					1,36
	3	1,96/ 51	2,11/90	1,96/148	1,94/213 1,86/-*	2,08/181	2,13/142	1,96
	4	2,52/ 59					2,54/ 49	2,54
	6	2,85/ 50					2,73/ 77	3,66
	8	2,58/ 41					3,21/ 42	4,74
	10	2,94/ 58					3,17/ 67	5,79
PE-Gitterfolie, D-FOL L	0,5	0,50/158						0,39
	1	0,66/105	0,72/160	0,75/131	0,68/149	0,77/104	0,53/220* 0,72/-*	0,73
	2	0,85/ 89					1,00/ 58	1,36
	4	1,03/ 27					1,02/ 60	2,54
	6						1,18/ 55	3,66
	8						1,07/ 58	4,74
	10						1,35/ 47	5,79

* Folie hat nicht entlastet

Das Bild 2 zeigt zwei typische Beispiele für die Form des Druck-Zeit-Verlaufes, zum einen für eine Druckentlastung nach vergleichsweise langsamer Erweichung der Kunststoffolie und zum anderen für ein spontanes Bersten der Folie noch während

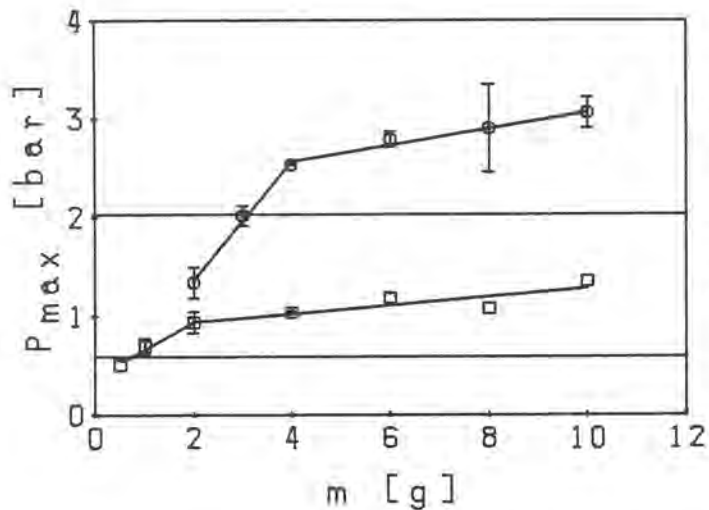


Bild 2

Druck-Zeit-Verlauf bei der Umsetzung von 0,5 und 4 g Schwarzpulver im 6-l-Stahlrohr - Abstand der Schwarzpulverschüttung von der PE-Folie 7 cm

der Druckanstiegsphase. In den Fällen, in denen die Druckentlastung nicht nach oder bei Erreichen des Druckmaximums erfolgte, wurde zwangsläufig ein Maximalwert gefunden, der dem Maximaldruck im geschlossenen 6-l-Stahlrohr entspricht. Dies war, wie auch Bild 3 verdeutlicht, der Fall mit Schwarzpulvermengen bis 4 g bei der PVC-Folie und bis 2 g bei der PE-Folie. Unterhalb der statischen Belastbarkeit können die Folien aber nur aufgrund der zusätzlichen Wärmeeinwirkung entlasten. Oberhalb der genannten Grenzen nimmt der Maximaldruck gleichfalls abstandsunabhängig, aber nur noch geringfügig zu.

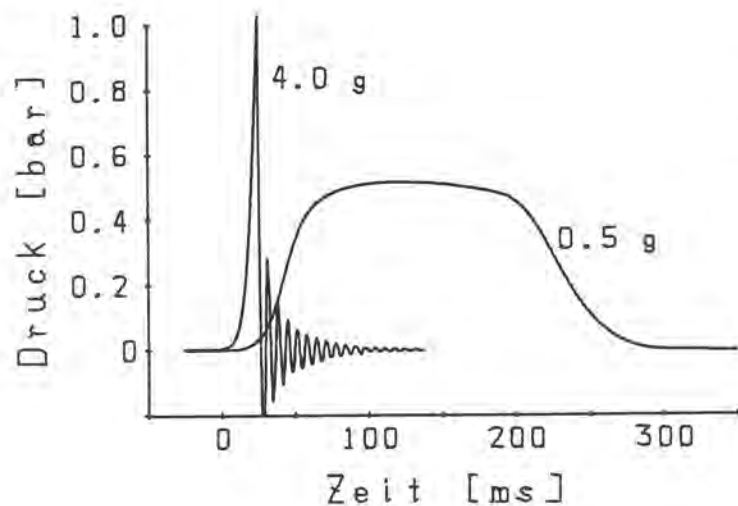


Bild 3

Über alle Abstände Folie - Schwarzpulverschüttung gemittelter Maximaldruck P_{max} in Abhängigkeit von der Schwarzpulvermenge m im 6-l-Stahlrohr - O PVC, □ PE - die waagerechten Geraden sind die statischen Belastbarkeiten

Ein deutlicher abstandsabhängiger thermischer Effekt ist bei der PVC-Folie mit 3 g Schwarzpulver zu beobachten. Bei dieser Druckbelastung, die der statischen Belastbarkeit entspricht, nimmt die Druckanstiegszeit (Berstzeit) zunächst mit dem Abstand Folie - Schwarzpulverschüttung zu und ist dann in erster Näherung konstant.

2.3 Diskussion

Die Druckmessungen mit verschiedenen Schwarzpulvern gleicher Zusammensetzung (75 % Kaliumnitrat) haben gezeigt, daß der Maximaldruck mit sinkender Umsetzungsgeschwindigkeit aufgrund steigender Wärmeverluste im 6-l-Stahlrohr gleichfalls sinkt. In Bild 4 sind die Maximaldrücke gegen die Druckanstiegszeiten aufgetragen ($P_{\max} = 3,9 - 0,0067 t_{\max}$). Danach sollte im streng adiabatischen Fall, z. B. bei großer Umsetzungsgeschwindigkeit ($t_{\max} = 0$), der Maximaldruck für die Ladedichte 1 kg/m^3 $P_{\max} = 3,9 \text{ bar}$ betragen. Ein derartiger Grenzwert läßt sich für das Goldregenpulver und die anderen pyrotechnischen Sätze nicht angeben, da keine Proben gleicher Zusammensetzung aber verschiedener physikalischer Eigenschaften untersucht wurden. Auf weitere Ergebnisse der Versuche im 6-l-Stahlrohr wird hier nicht eingegangen, da diese im Teil V des Berichtes noch einmal behandelt werden.

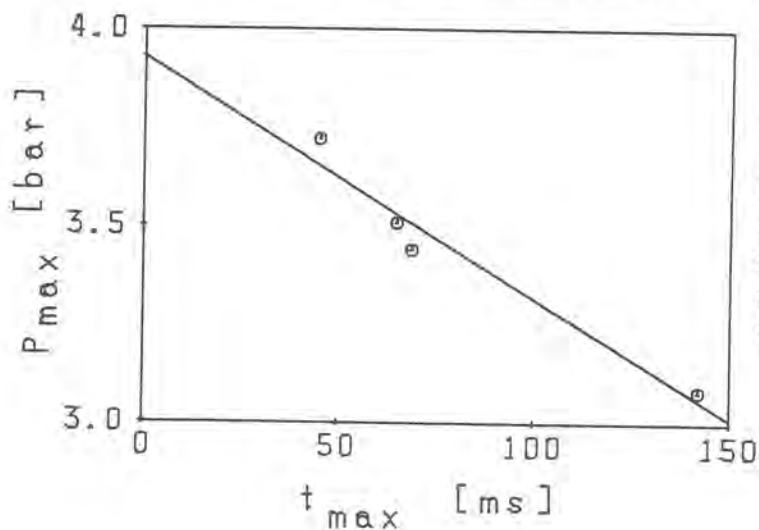


Bild 4
Maximaldrücke P_{\max} in Abhängigkeit von der Druckanstiegszeit t_{\max} von Schwarzpulvern gleicher Zusammensetzung im 6-l-Stahlrohr - Ladedichte 1 kg/m^3

3. Freifeldversuche

Die Freifeldversuche wurden zum einen mit der Zielsetzung durchgeführt, Meßwerte über die Größe der Luftstoßwelle bei der Deflagration von Schwarzpulver in Abhängigkeit von der Menge und von der Entfernung zu erhalten und zum anderen zur Ermittlung des Druckverlaufes in einer Schüttung des deflagrierenden Stoffes selbst. Entsprechend der Zielsetzung war der Versuchsaufbau jeweils verschieden, im ersten Fall wurde das Schwarzpulver auf einem Tisch mit einer nicht widerstandsfähigen Tischplatte gezündet, im zweiten Fall auf einem Stahltisch.

Die beiden Versuchsreihen wurden außerdem zur Ermittlung weiterer Explosionsparameter genutzt, nämlich der Ausbreitungsfunktionen von Schalldruck (Druck in größerer Entfernung vom Explosionsort) und Wärmestrahlung und des Einflusses der Beimengung von Aluminium zum Schwarzpulver.

3.1 Ermittlung von Ausbreitungsparametern

Die Versuche dienten in erster Linie zur Ermittlung einer Druckausbreitungsfunktion für die Deflagration von Schwarzpulver im Freien. Bei dieser Gelegenheit wurden außerdem der Schalldruck und die Wärmestrahlung gemessen und die Gültigkeit der bekannten Abstandsabhängigkeiten für die spezielle Versuchsanordnung und Meßtechnik überprüft.

3.1.1 Versuchsaufbau und Meßmethoden

Der Versuchsaufbau mit einer Schwarzpulverschüttung auf einem Gestell mit Preßspantischplatte entspricht dem im Modellgebäude und ist im einzelnen in Teil I Abschnitt 3.1 beschrieben. Die Zündung erfolgte gleichfalls von unten, und es wurden die dort aufgeführten Geräte zur Messung von Druck, Schalldruck und Wärmestrahlung verwendet.

Die Druckaufnehmer waren 1 m über dem Erdboden an Gestellen aus Vierkantstahlrohr befestigt, ihre Membranen senkrecht zur Ausbreitungsrichtung der Druckwelle orientiert. Die Gestelle wurden in unterschiedlichen Entfernungen zur Schwarzpulverschüttung aufgestellt und mit Erdnägeln am Boden fixiert.

3.1.2 Versuchsergebnisse

Die Gestelle mit den Druckaufnehmern erwiesen sich als zu empfindlich gegen die Einwirkungen der Boden- und Luftstoßwellen. Die Messungen mit Schwarzpulvermengen von 1 kg bis 16 kg in 0,5 m bis 5 m Abstand waren daher mehr oder weniger durch überlagerte Schwingungen gestört, bedingt durch die Beschleunigungsempfindlichkeit der Quarzkristall-Druckaufnehmer. Günstigstenfalls war der gemessene Druck-Zeit-Verlauf so klar strukturiert und eindeutig interpretierbar, wie der in Bild 5 gezeigte. Generell wurden zwei hauptsächliche Druck-

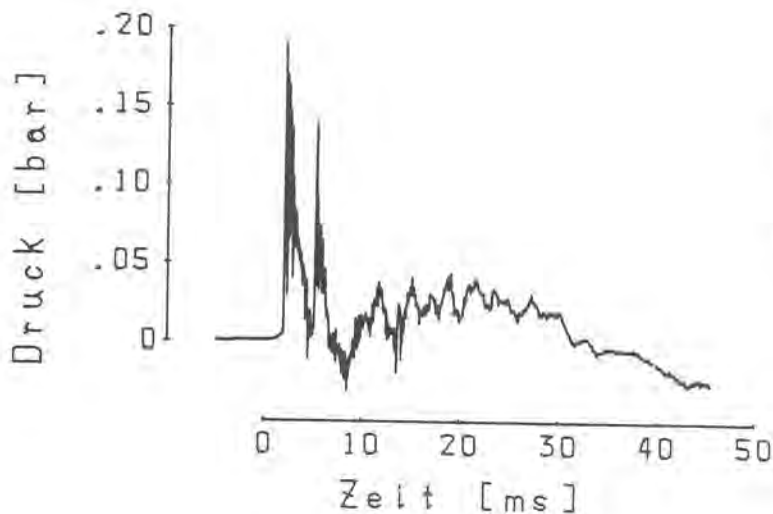


Bild 5

Druck-Zeit-Verlauf bei der
Deflagration von 8 kg
Schwarzpulver im Freien,
Meßabstand 1,5 m

ereignisse registriert, eine kurzzeitige Druckspitze, deren Druckanstiegszeit im Mittel $2,5 \text{ ms} \pm 1,1 \text{ ms}$ betrug und ein länger andauerndes, flacheres Druckereignis, dessen Maximum nur ungenau zu bestimmen war und nach durchschnittlich 23 ms erreicht wurde. Die zweite kurzzeitige Druckspitze in Bild 5 nach etwa 5 ms muß als Reflexion des Luftstoßes am Erdboden gedeutet werden, der zeitliche Abstand der beiden Druckspitzen beträgt etwa 3 ms. Berücksichtigt man die Höhe des Tisches, so ergibt sich eine Wegdifferenz von etwa 1 m und für die Ausbreitungsgeschwindigkeit ein der Schallgeschwindigkeit in Luft entsprechender Wert.

Filmaufnahmen, die von den Freifeldversuchen gemacht wurden, zeigten dasselbe Phänomen, das bereits in Teil I Abschnitt 3.1.1.1 beschrieben wurde, nämlich, daß die Tischplatte bereits durch Einwirkung des Druckes in der Schwarzpulverschüttung bricht, während die Schüttung äußerlich noch in Ruhe ist. In Teil II dieses Berichtes wird über Versuche berichtet, die beweisen, daß beim Aufbrechen der Schwarzpulverschüttung aufgrund des steigenden Innendruckes eine Druckentlastung stattfindet, die mit einem Luftstoß verbunden ist und als kurzzeitiges Druckereignis auf die Umgebung wirkt. In Analogie zu den vorangegangenen Teilen dieses Berichtes wird der Maximaldruck dieser ersten Druckspitze hier gleichfalls mit p_1 bezeichnet. Der beim Aufbrechen der Schüttung aufgewirbelte Teil des Schwarzpulvers verursacht im Freien wie in Räumen mit Druckentlastungsöffnungen ein weiteres Druckereignis, dessen Maximaldruck auch hier als p_{max} bezeichnet wird. Im Unterschied zu den Messungen im Modellgebäude und im 1-m^3 -Stahl-

kasten ist im Freien P_{\max} gegenüber P_1 relativ klein. Die erhaltenen Meßwerte für P_1 und P_{\max} sind in Tabelle 4 zusammengestellt, sie sind größtenteils Mittelwerte zweier Messungen.

Tabelle 4

Maximaldrücke p_1 und P_{\max} bei Freifeldversuchen mit Schwarzpulver

Schwarzpulvermenge [kg]	Abstand [m]	P_1 [bar]	P_{\max} [bar]
1	0,5	0,0090	0,019
	1,0	0,0046	0,014
2	0,5	0,039	-
	1,5	0,017	0,012
4	0,5	0,16	0,036
	1,0	0,070	0,041
8	0,5	0,58	0,17
	1,0	0,18	-
	1,5	0,15	0,030
	2,0	0,085	0,021
	3,0	0,011	0,016
	5,0	0,095	-
16	0,5	0,46	-
	1,0	0,28	0,11

Die Abhängigkeit des Druckes p sowohl von der Menge m als auch vom Abstand r läßt sich in einer Funktion

$$p = K \cdot \frac{m^{e'}}{r^{e''}}$$

darstellen. Diese Funktion wurde mit den in Tabelle 4 angegebenen Maximaldrücken für beliebige Exponenten e' und e'' als Ausgleichfunktion $y = a \cdot x^b$ mit $x = \frac{m^{e'}}{r^{e''}}$

und $y = p_1$ bzw. P_{\max} berechnet, und zwar so lange, bis sich der Regressionskoeffizient (Gütemaß der Methode der kleinsten Fehlerquadrate bei Variation von e' und e'') nicht mehr verbessern ließ. Die beiden Ausgleichfunktionen

$$p_1 = 0,0063 \cdot \frac{m^{1,5}}{r^{1,0}} \quad \text{und} \quad P_{\max} = 0,0093 \cdot \frac{m^{0,8}}{r^{1,1}} \quad \text{sind}$$

zusammen mit den Meßwerten in den Bildern 6 und 7 dargestellt.

Wie bei derartigen Darstellungen üblich, wurden für die Abszissen die entsprechend skalierten Abstände gewählt. Die Exponenten der Masse und des Abstandes wurden auf eine Nachkom-

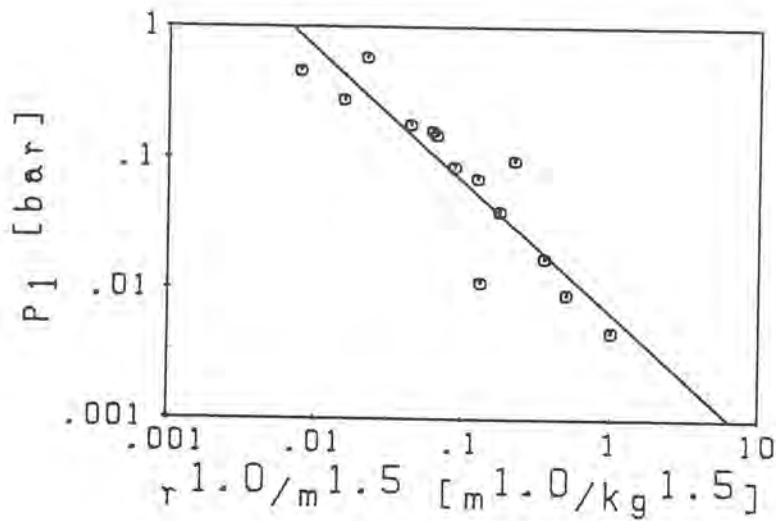


Bild 6

Maximaldruck p_1 in
Abhängigkeit vom skalierten
Abstand $r^{1,0}/m^{1,5}$ -
Freifeldmessungen mit
Schwarzpulver

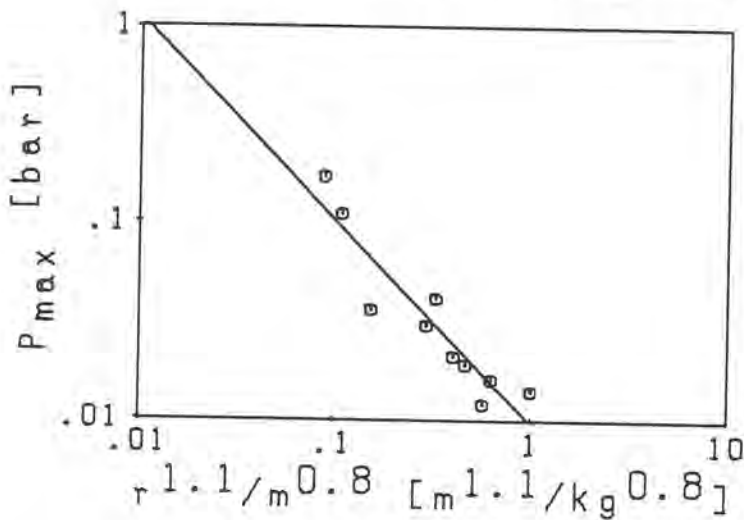


Bild 7

Maximaldruck p_{max} in
Abhängigkeit vom skalierten
Abstand $r^{1,1}/m^{0,8}$ -
Freifeldmessungen mit
Schwarzpulver

mastelle gerundet, da - wie in den Diagrammen ersichtlich - die Meßwerte nicht unerheblich um die Ausgleichsfunktion streuen. Insofern ist die Abstandsabhängigkeit des Druckes in Übereinstimmung mit der Abnahme des Druckes bei kugelförmiger Schallausbreitung ($1/r$).

Die Schallmessungen mit einem Schallpegelmesser wurden in 20 m bis 80 m Entfernung vorgenommen. Die Tabelle 5 enthält die Maximaldrücke, die aus den Spitzenwerten des Schallpegels, gemessen in dB, berechnet sind. Auf gleiche Weise wie oben beschrieben wurde auch für die Schalldrücke die Druckausbreitungsfunktion ermittelt. Sie lautet $p_{max} = 0,034 \cdot \frac{m^{1,4}}{r^{1,0}}$ und ist in Bild 8 zusammen mit den Meßwerten dargestellt. Überraschend ist die gute Übereinstimmung mit den Maximaldrücken p_1 , die mit Quarzkristall-Druckaufnehmern gemessen wurden, hinsichtlich der Exponenten von Menge und Abstand, wobei die kugelförmige Schallausbreitung bestätigt wird. Zur Zeit nicht erklärt werden kann die Tatsache, daß gegenüber p_1 etwa fünf-

Tabelle 5

Maximale Schalldrücke P_{max} bei Freifeldversuchen mit Schwarzpulver

Schwarzpulvermenge [kg]	Abstand [m]	P_{max} [mbar]
1	80	0,50
2	80	1,0
8	20	28
	30	25
	50	13
	80	10
16	80	18

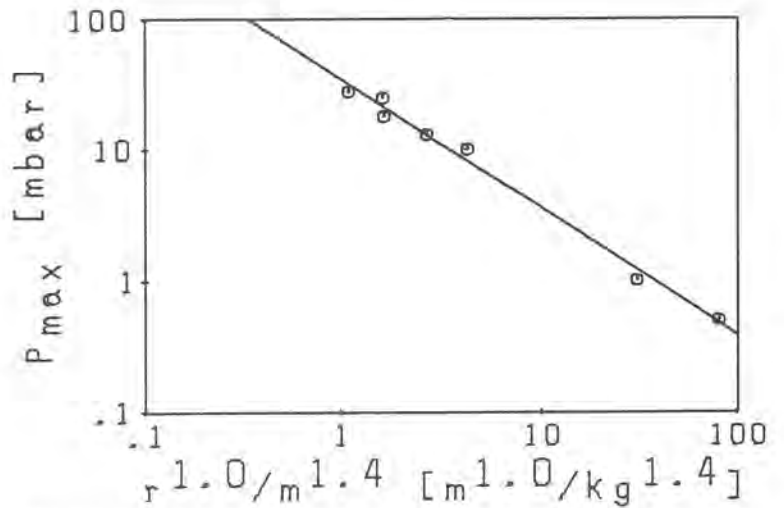


Bild 8

Maximaler Schalldruck P_{max} in Abhängigkeit vom skalierten Abstand $r^{1,0}/m^{1,4}$ - Freifeldmessungen mit Schwarzpulver

mal höhere Schalldrücke gefunden werden, möglicherweise methodisch begründet.

Die Wärmestrahlung wurde in denselben Entfernungen gemessen wie die Schalldrücke. Tabelle 6 gibt die Ergebnisse wieder. Etwas ungewöhnlich ist die Mengenabhängigkeit der Bestrahlungsstärke, die entweder durch eine Ausgleichgerade mit großem Achsenabschnitt $E_{max} = 0,74 \text{ m} + 4,1$ oder durch eine Potenzfunktion mit stark von eins verschiedenem Exponenten $E_{max} = 4,4 \text{ m}^{0,42}$ zu beschreiben ist. Das übliche Bild ergibt die Betrachtung der Bestrahlung $H = 0,99 \cdot m^{0,85}$, deren Abstandsabhängigkeit $H = 30,9 \cdot 10^{-3} \cdot r^{-1,98}$ sehr gut die Zunahme der durchstrahlten Fläche bei kugelförmiger Strahlungsausbreitung bestätigt (Bilder 9 und 10).

Die Anstiegszeit der Bestrahlungsstärke schwankte stark, sie betrug durchschnittlich $135 \text{ ms} \pm 57 \text{ ms}$; die Dauer des Strahlungsereignisses war im Mittel etwas über eine Sekunde. Die Strahlungsanteile an der Explosionswärme liegen zwischen 13 % und 29 % und decken sich mit denen, die bei hier nicht beschriebenen Laborversuchen mit Mengen von 1 g bis 5 g Schwarzpulver erhalten wurden (etwa 25 %). Auf die darauf basierenden sicherheitstechnischen Überlegungen im Teil V sei verwiesen.

Tabelle 6

Maximale Bestrahlungsstärke E_{max} , Bestrahlung H und Strahlungsanteil an der Explosionswärme Q bei Freifeldversuchen mit Schwarzpulver

Schwarzpulvermenge [kg]	Abstand [m]	E_{max} [mW/cm ²]	H [mJ/cm ²]	Q [%]
1	80	4,6	0,95	26
2	80	6,6	2,1	29
4	80	6,2	2,9	13
8	20	(120)	(71)	(15)
	30	73,3	44,8	22
	50	31,1	15,0	20
	80	9,5	4,8	16
16	80	16,1	11,8	20

(): geschätzt

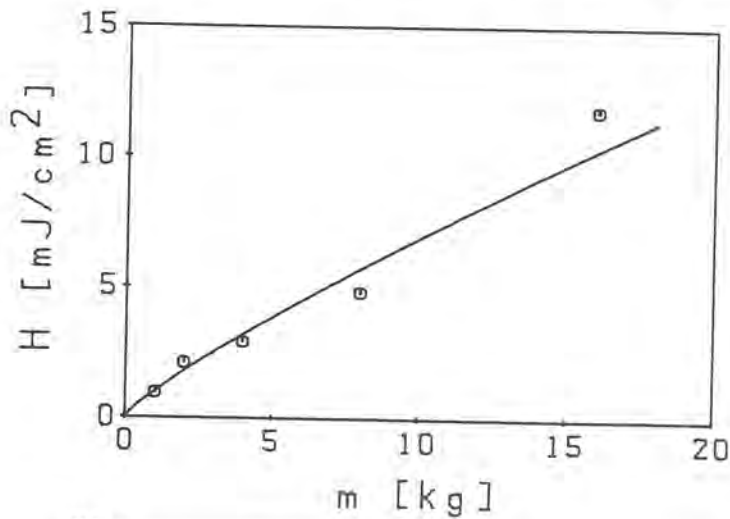


Bild 9

Bestrahlung H in Abhängigkeit von der Schwarzpulvermenge m bei Freifeldversuchen - Abstand 80 m

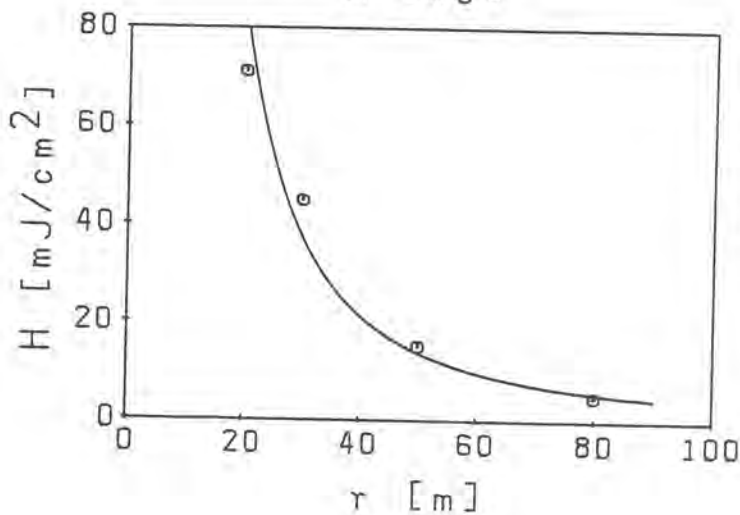


Bild 10

Bestrahlung H in Abhängigkeit vom Abstand r bei Freifeldversuchen - 8 kg Schwarzpulver

3.2 Messung des Druckverlaufes im Schwarzpulver

Nachdem festgestellt worden war, daß der Druck im Innern einer von unten gezündeten Schwarzpulverschüttung ursächlich für ein bestimmtes Druckereignis - p_1 genannt - außerhalb der Schüttung ist, sollte dieser Innendruck bestimmt und mit den Meßwerten für den Druck p_1 verglichen werden.

3.2.1 Versuchsaufbau und Meßmethoden

Ein Quarzkristall-Druckaufnehmer und eine Zündpille (vgl. Teil I Abschnitte 2.2 und 3.1) wurden direkt nebeneinander in eine Stahlplatte (50 cm x 50 cm x 3 cm) eingesetzt. Auf dieser Stahlplatte konnten in einem Versuchsbunker bis zu 7 kg Schwarzpulver gezündet und der Druck in der Schwarzpulverschüttung gemessen werden. Größere Schwarzpulvermengen bis zu 100 kg wurden im Freifeld untersucht, dazu mußte der Stahl-tisch durch eine Plattform aus Betonwürfeln (0,2 m x 0,2 m x 0,2 m) erweitert werden. Bei dieser Gelegenheit wurde gleichzeitig der Druck der Luftstoßwelle in etwa 5 m Entfernung vom Explosionsort mit einem stabförmigen Quarzkristall-Druckaufnehmer (Typ EBM 6638, Erich Brosa Meßgeräte GmbH) gemessen. Bei diesem Druckaufnehmer wird die Luftstoßwelle durch die Messung praktisch nicht gestört. Die Membrane ist parallel zur Druckausbreitungsrichtung orientiert, der Druckaufnehmer war 0,5 m über dem Boden in einen 75 kg schweren Bleiblock eingespannt.

Zur Abschätzung der Größe des Flammenballes dienten bei den Freifeldversuchen 16-mm-Filmaufnahmen mit 64 Bildern/s.

3.2.2 Versuchsergebnisse

Die Versuchsergebnisse sind in der Tabelle 7 zusammengestellt, die Werte zu den verschiedenen Schwarzpulvermengen resultieren aus ein bis drei Versuchen. Ein typischer Druck-Zeit-Verlauf ist in Bild 11 wiedergegeben. Nach durchschnittlich $15 \text{ ms} \pm 4 \text{ ms}$ Druckanstiegszeit wird der Maximaldruck p_1 im Innern der Schüttung erreicht (im Bild ca. 33 ms nach der Zündung). Anschließend fällt der Druck ab 2 kg Schwarzpulver innerhalb $5,2 \text{ ms} \pm 1,7 \text{ ms}$ wieder auf den Umgebungsdruck ab,

Tabelle 7

Maximaldrücke p_i in einer deflagrierenden Schwarzpulverschüttung, p_R im Versuchsbunker bzw. p_l in 5 m Abstand, Zeit t_a des Druckabfalls nach p_i und Durchmesser d des Flammenballes

Schwarzpulvermengen [kg]	p_i [bar]	p_R [bar]	p_l [bar]	t_a [ms]	d [m]
0,5	0,36	-		26,5	
1,0	0,58	-		24,3	
1,5	0,84	0,029		16,7	
2,0	1,61	0,024		6,2	
2,5	1,99	0,035		6,2	
3,0	2,21	0,045		6,4	
3,5	3,01	0,068		3,8	
4,0	3,14	0,068		4,0	
5,0	3,95	0,090		3,9	
6,0	5,44	0,11		3,8	
7,0	5,46	0,14		4,0	
10	7,84		0,084	4,8	6
20	16,2		0,30	4,7	10
50	47,0		1,49	9,2	> 13
100	92,8		-	-	10 ¹⁾

1) geänderter Kamerastandpunkt

entsprechend der kurzen Druckanstiegszeit des Druckes p_l in der Luftstoßwelle. Bei Mengen unter 2 kg sind offensichtlich die Einschlußbedingungen derart, daß noch keine plötzliche Druckentlastung beim Aufbrechen des Haufens stattfindet. Die Mengenabhängigkeit des Druckes p_i kann über den gesamten untersuchten Bereich als streng linear ($p_i = 0,93 m - 0,63$, Bild 12) angesehen werden, ungeachtet des Achsenabschnittes, der für kleine Schwarzpulvermengen die Anwendung einer Potenzfunktion notwendig macht ($p_i = 0,69 m^{1,07}$).

In Bild 11 ist ferner noch ein schwaches Druckereignis ersichtlich, welches auf die Wirkung des aufgewirbelten Schwarzpulvers zurückzuführen ist. Bei den Versuchen im Versuchsbunker findet man etwa 70 ms nach p_i die entsprechenden Maximaldrücke p_R , die als gleichmäßig über den Versuchsbun-

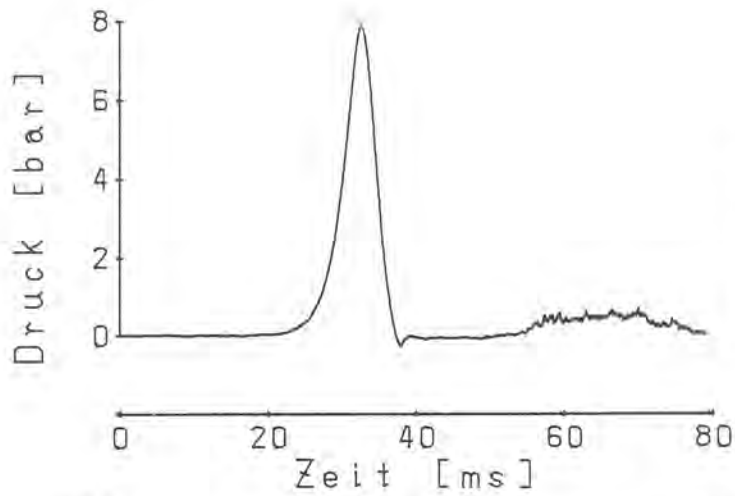


Bild 11

Druck-Zeit-Verlauf in einer deflagrierenden Schwarzpulverschüttung - 10 kg Schwarzpulver im Freien (0 s ist der Zündzeitpunkt)

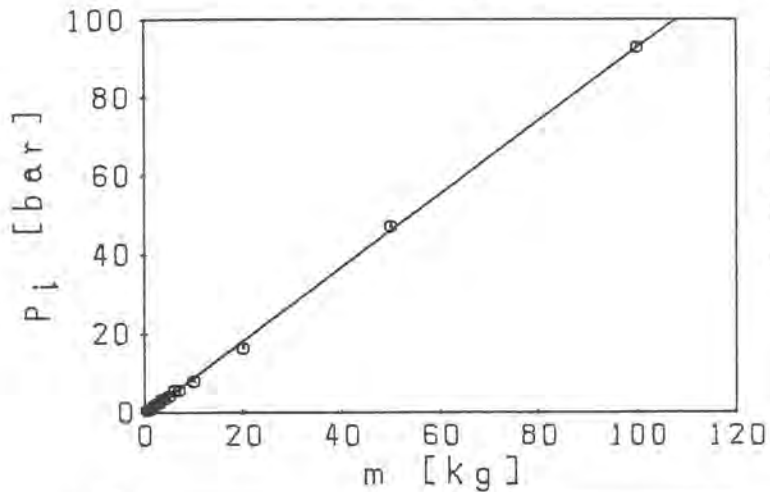


Bild 12

Maximaldruck p_i in einer deflagrierenden Schwarzpulverschüttung in Abhängigkeit von der Schwarzpulvermenge m

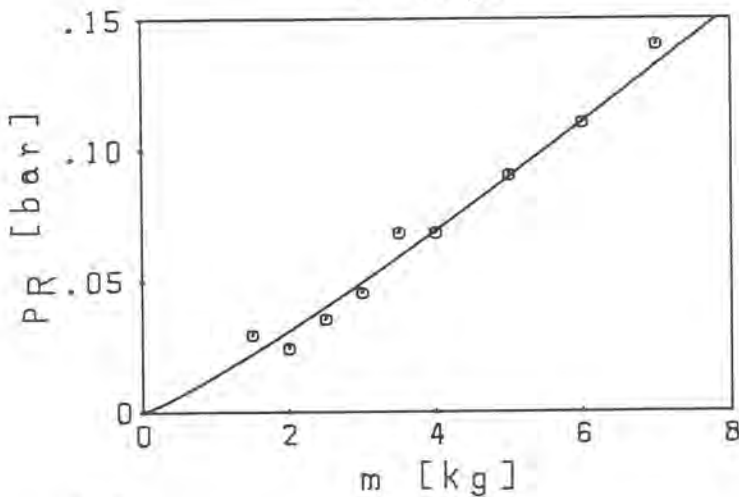


Bild 13

Maximaldruck p_R im Versuchsbunker in Abhängigkeit von der Schwarzpulvermenge m

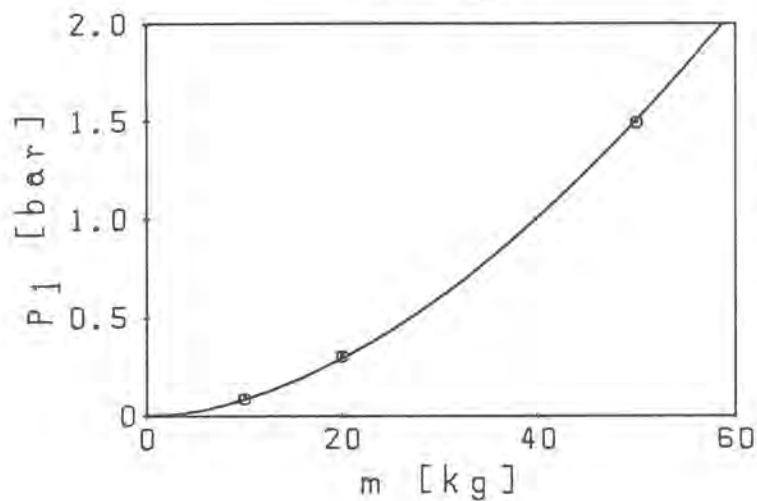


Bild 14

Maximaldruck p_1 in der Luftstoßwelle in Abhängigkeit von der Schwarzpulvermenge m

ker verteilt anzusehen sind, mit $p_R = 0,014 \text{ m}^{1,2}$ als Ausgleichsfunktion (Bild 13).

Die Maximaldrücke p_i in der Luftstoßwelle in 5 m Abstand sind durch $p_i = 0,0014 \text{ m}^{1,8}$ (Bild 14) beschrieben. Die Durchmesser d der Flammenbälle sind nicht hinreichend genau bestimmt, um sinnvollerweise eine Ausgleichsfunktion angeben zu können. In [16] wird für Explosivstoffe eine Gleichung $d = 3,77 \text{ m}^{0,325}$ (d in m, m in kg) angegeben, die relativ gut mit den beobachteten Werten übereinstimmt (berechnete Werte 8,0 m, 10,0 m, 13,4 m und 16,8 m).

Einige Versuche mit einer Mischung aus 90 % Schwarzpulver und 10 % Aluminium (Pyroschliff Type IV dunkel, Carl Schlenk AG) sollten den Einfluß derartiger, die Explosionswärme stark erhöhender Beimengungen zeigen. Die thermochemisch abgeschätzte Explosionswärme der Schwarzpulver-Aluminium-Mischung beträgt etwa 4800 kJ/kg. Die Maximaldrücke in der deflagrierenden Schüttung und die Ergebnisse der gleichzeitig durchgeführten Wärmestrahlungsmessung sind in Tabelle 8 zusammengestellt. Bei Mengen zwischen 0,1 und 2 kg unterscheiden sich die Ergebnisse der Druckmessung in der deflagrierenden Schüttung nicht signifikant von den entsprechenden Messungen an Schwarzpulver ohne Aluminiumbeimengung. Die Ausgleichsgerade $p_i = 0,50 \text{ m} - 0,03$ ist in Bild 15 eingetragen. Der Umsetzung von 2,9 kg Schwarzpulver-Aluminium-Mischung liegt offensichtlich ein anderer Mechanismus zugrunde, eine derartige Änderung im Reaktionsablauf ab einer bestimmten Grenzladung ist bei Ex-

Tabelle 8

Maximaldruck p_i in einer deflagrierenden Schüttung aus Schwarzpulver und 10 % Aluminium, maximale Bestrahlungsstärke E_{max} und Bestrahlung H in 20 m Entfernung und Strahlungsanteil Q an der Explosionswärme

Menge [kg]	p_i [bar]	E_{max} [mW/cm ²]	H [mJ/cm ²]	Q [%]
0,1	0,10	15,0	2,7	2,8
0,4	0,11	-	-	-
1,0	0,42	112	32,9	35
2,0	1,00	167	50,4	26
2,9	(20)	191	15,9	5,8

(Schätzwert)

plosivstoffen allgemein bekannt und wurde auch bei einer Mischung aus Kaliumperchlorat und Aluminium beobachtet (vgl. Teil II Abschnitt 3.2.3).

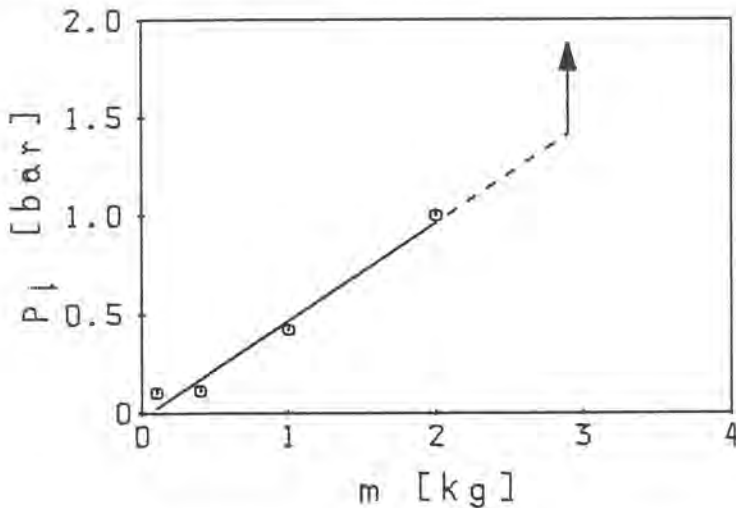


Bild 15

Maximaldrucke p_1 in einer deflagrierenden Schüttung aus Schwarzpulver mit 20 % Aluminium in Abhängigkeit von der Menge m

Wegen Überschreitung des Meßbereichs mußte der Druck p_1 für 2,9 kg Schwarzpulver-Aluminium-Mischung geschätzt werden, der Drucksprung ist im Bild 15 durch den senkrecht nach oben weisenden Pfeil angedeutet. Die geschätzte Druckanstiegszeit bis 2,9 kg der Mischung beträgt 23 ms und unterscheidet sich damit nicht sigifikant von den Werten, die mit kleineren Mengen erhalten wurden ($28 \text{ ms} \pm 5 \text{ ms}$), der anschließende Druckabfall dauert etwa 2 ms. Die Wärmestrahlung bei der Deflagration der Schwarzpulver-Aluminium-Mischungen verhält sich bei Mengen bis zu 2 kg entsprechend der mit reinem Schwarzpulver gemessenen Strahlung (vergl. Abschnitt 3.1.2). Auch hier ist eine plausible Mengenabhängigkeit nur für die Bestrahlung ($H = 28 \cdot m^{1,0}$, ohne Bild), nicht aber für die Bestrahlungsstärke E_{max} gegeben. Der Strahlungsanteil an der Explosionswärme ist mit durchschnittlich etwa 30 % erfahrungsgemäß etwas höher als bei Schwarzpulver.

Der Verlauf der Wärmestrahlung bei dem Versuch mit 2,9 kg Schwarzpulver-Aluminium-Mischung weist zwei Besonderheiten auf (Bild 16). Die Bestrahlung und somit der Strahlungsanteil an der Explosionswärme ist relativ zu den anderen Versuchen zu klein, da die Bestrahlungstärke wesentlich schneller abklingt als bei den Versuchen mit kleineren Mengen (Gesamtdauer 0,44 s gegenüber etwa 1 s bei 1 kg und 2 kg). Dies kann zwei Gründe haben, einen meßtechnischen, falls durch die erhöhte Druckwirkung die deflagrierende

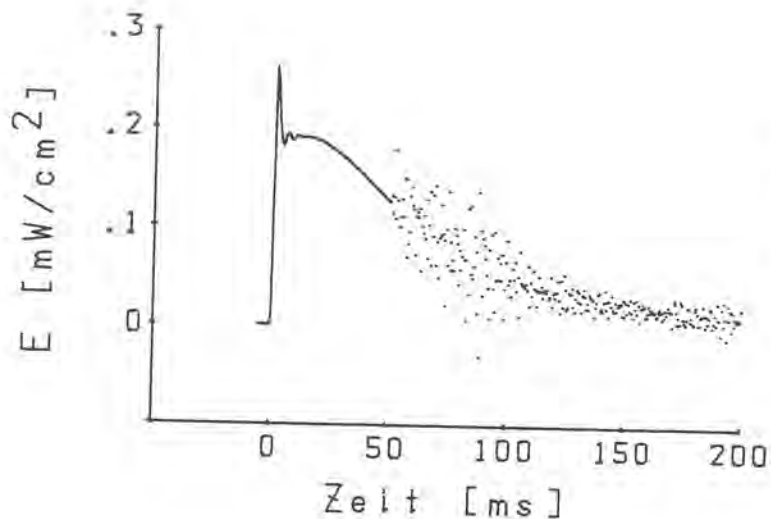


Bild 16

Verlauf der Bestrahlungsstärke E bei der Umsetzung von 2,9 kg Schwarzpulver-Aluminium-Mischung

Mischung vorzeitig aus dem Gesichtsfeld des Detektors herausgeschleudert wird, und einen physikalischen, wenn durch die Änderung des Reaktionsmechanismus ein größerer Anteil der Explosionswärme (-energie) in der Druckwelle umgesetzt wird. So werden bei Detonationsversuchen mit Nitropenta (PETN) unter ähnlichen Bedingungen nur durchschnittlich 3 % der Explosionswärme als Strahlungswärme gefunden.

Ferner fällt im Verlauf der Bestrahlungsstärke eine kurze Spitze mit einer Anstiegszeit von 2 ms auf ($E_{\max} = 263 \text{ mW/cm}^2$). Aufgrund der bisherigen Meßerfahrung mit dem benutzten pyroelektrischen Detektor wird diese Spitze nicht für einen meßtechnischen Effekt (Einschwingvorgang) gehalten, da ihre Anstiegszeit etwa das Zehnfache der gerätebedingten Anstiegszeit beträgt und da bei Versuchen mit Nitropenta ähnliche Spitzen der Bestrahlungsstärke gefunden wurden, deren Anstiegszeiten unter 1 ms lag und die aufgrund des gesamten Verlaufes der Bestrahlungsstärke nicht auf Einschwingvorgänge zurückzuführen sind. Wegen der Übereinstimmung der Anstiegszeit der Bestrahlungsstärke und der Druckabfallzeit in der Schüttung liegt es nahe, diese kurze Spitze der Bestrahlungsstärke ebenfalls mit dem gegenüber der Umsetzung kleinerer Mengen veränderten Reaktionsmechanismus zu erklären.

3.3 Diskussion

Der Druck in der Luftstoßwelle bei Freifeldversuchen mit Schwarzpulver wurde untersucht. Dabei sind zwei Druckmaxima zu unterscheiden, ein Maximum p_1 , welches auf das unter Eigenverdämmung reagierende Schwarzpulver zurückzuführen ist,

und ein Maximum p_{\max} , das durch reagierendes aufgewirbeltes Schwarzpulver verursacht wird.

Die Ergebnisse sollen mit denen von Napadensky und Swatosh [15] verglichen werden. Die Autoren untersuchten Schwarzpulver und eine Schwarzpulvervorstufe (jet milled) in Mengen von 3,6 kg bis 68 kg mit und ohne Einschluß (Stahlbehälter, geschlossen mit 1,2 cm Wanddicke und Pappbehälter, oben offen). Gezündet wurde mit Zündpille oder mit Sprengkapsel und unterschiedlichen Verstärkungsladungen, jeweils am Boden des Behältnisses, die Druckmessung erfolgte senkrecht zur Druckausbreitungsrichtung in 1,2 m bis 16 m Entfernung.

Die hier gefundene Abstandsabhängigkeit der Maximaldrücke $p \sim r^{-1}$ ergibt sich bei Zündung mit kleinen Verstärkungsladungen (11 g Tetryl) bzw. mit Zündpille auch aus den Versuchen mit Schwarzpulver in Pappbehältern, während der Einschluß in Stahlbehälter zu $p \sim r^{-1,4}$ führt. Mit steigenden Massen der Verstärkungsladungen nähert sich die Abstandsabhängigkeit $p \sim r^{-2}$, wie sie in erster Näherung für Sprengstoffdetonationen gefunden wird. Die Massenabhängigkeit der Maximaldrücke konnte nur aus den Versuchen mit Schwarzpulver im Stahlbehältnis ermittelt werden ($p \sim m^{0,7}$) und entspricht damit derjenigen, die üblicherweise für Sprengstoffdetonationen angenommen wird ($p \sim m^{2/3}$).

Hier wurde für das Druckmaximum p_1 eine Massenabhängigkeit gefunden, deren Exponent deutlich größer als eins ist ($p_1 \sim m^{1,5}$). Zur Erklärung dieses Phänomens wird im folgenden eine Beziehung für die Abhängigkeit des Explosionsdruckes von Explosivstoffmenge und Abstand vom Explosionsort auf einfache Weise abgeleitet und ein Unterschied zwischen der Detonation und der Deflagration verdeutlicht.

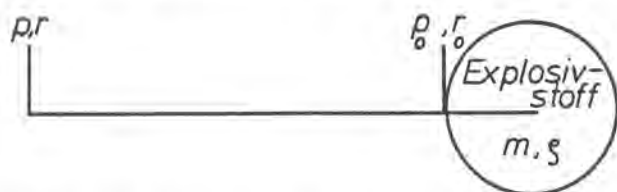


Bild 17

Diagramm zur Ableitung einer allgemeinen Druckausbreitungsfunktion

Bild 17 zeigt eine Explosivstoffkugel, die durch ihre Masse m und Dichte ϱ charakterisiert ist; p_0 ist der Explosionsdruck an der Oberfläche dieser Kugel, r_0 ist durch das Volumen V gegeben bzw. mit $\varrho = m/V$ durch

$$r_0^3 = \frac{3}{4\pi} \cdot \frac{m}{\rho} \quad \text{oder}$$

$$r_0 = k \cdot m^{1/3} \quad (1).$$

Mit steigendem Abstand r sinkt der Druck entsprechend

$$\frac{p}{p_0} = \left(\frac{r_0}{r}\right)^n \quad \text{oder}$$

$$p = p_0 \left(\frac{r_0}{r}\right)^n \quad (2),$$

n ist der Exponent der Abstandsabhängigkeit und noch variabel. Die Kombination von Gleichung (1) und (2) ergibt

$$p = p_0 \cdot k^n \cdot \left(\frac{m^{1/3}}{r}\right)^n \quad (3).$$

Im Falle einer Detonation kann der Druck p_0 als massenunabhängig und innerhalb der Explosivstoffkugel konstant angesehen werden. Damit vereinfacht sich Gleichung (3) zu

$$p = K \cdot \left(\frac{m^{1/3}}{r}\right)^n \quad (4) \quad \text{und}$$

entspricht der bei Pfortner in [5] angegebenen Druckausbreitungsfunktion

$$r = k' \cdot \frac{m^{1/3}}{p^{n'}} \quad \text{mit } n' = \frac{1}{n} \quad \text{und } k' = K^{n'}.$$

Für den Bereich des senkrecht reflektierten Stoßdruckes von 0,01 bar bis 1000 bar gibt Pfortner im Mittel über vier Einzelbereiche $n' = 0,57$ ($n = 1,75$) an, etwa entsprechend dem üblichen $n = 2$ einfacher Ansätze [26].

Gleichung (4) läßt sich auch auf geschlossene Räume anwenden, in denen sich der statische Druck (Schwadendruck) einstellen kann. Dann ist für einen Kubus mit dem Volumen V $n = 3$ und

$$p = K \cdot \frac{m}{V}.$$

Erst für $n = 3$ wird also der Exponent der Massenabhängigkeit nach Gleichung (4) gleich eins. Für die Deflagration von Schwarzpulver bei Freifeldversuchen wurde aber die Druckausbreitungsfunktion

$$p = K \cdot \frac{m^{1,5}}{r^{1,0}}$$

gefunden, mit einem Exponenten der wesentlich über eins liegt. Dies wird folgendermaßen erklärt. Der Druck in der Schwarzpulverschüttung (hier als Explosivstoffkugel angenom-

men) ist nicht konstant, sondern eine lineare Funktion $p = f(m)$ der Masse. Damit wird aus Gleichung (3)

$$p = K' \cdot m \cdot \left(\frac{m^{1/3}}{r}\right)^n \quad \text{oder}$$

$$p = K' \cdot \frac{m^{1+\frac{n}{3}}}{r^n} \quad (5).$$

Der Exponent der Massenabhängigkeit ist also immer größer als eins. Mit der experimentell ermittelten Abstandsabhängigkeit $p \sim r^{-1}$ ($n = 1$) ergibt sich $p \sim m^{1,33}$, in befriedigender Übereinstimmung mit den Meßergebnissen. Man könnte noch darüber spekulieren, ob die Massenabhängigkeit $p_1 \sim m^{1,8}$, die bei Versuchen mit einer Stahlunterlage gefunden wurde, durch eine andere Abstandsabhängigkeit bedingt ist ($p \sim r^{-2,4}$) - die Anwendung des stark vereinfachten Modells einer Explosivstoffkugel sollte jedoch nicht überstrapaziert, sondern mehr für eine qualitative Deutung verwendet werden.

Die gemessenen Maximaldrücke p_{\max} , verursacht durch die Umsetzung des Schwarzpulvers ohne Eigenverdämmung, werden im Teil V noch diskutiert werden; auch auf die Konsequenzen wechselnder Reaktionsmechanismen, wie durch die Beimengung von Aluminium verursacht, für sicherheitstechnische Bewertungen wird dort noch eingegangen.

4. Zusammenfassung

Die Umsetzung pyrotechnischer Sätze (einschließlich verschiedener Schwarzpulver) wurde im Labormaßstab in einem 6-l-Stahlrohr untersucht und diskutiert. Ferner wurde das Verhalten verschiedener Kunststoffolien verglichen, sowohl bei quasi-statischer Druckbelastung als auch bei kombinierter Wärme- und Druckbelastung. Bei Freifeldversuchen wurden der Druck in der deflagrierenden Schwarzpulverschüttung und in der Luftstoßwelle gemessen. Über eine allgemein abgeleitete Druckausbreitungsfunktion wurden diese Drücke miteinander in Beziehung gesetzt und ein Unterschied zwischen der Deflagration und Detonation erklärt.

Teil IV. Messung der Wärmestrahlung bei Brandversuchen für die Lagergruppenzuordnung

H. Treumann, E. Blossfeld, M. Zindler

0 Aufgabenstellung

Explosionsgefährliche Stoffe werden für die Aufbewahrung in verschiedene Lagergruppen eingeteilt. Die Lagergruppen unterscheiden sich nach der Art der Gefährdung und dem Grad der Gefährlichkeit. Kriterien für die Zuordnung liefern u.a. normierte Brandversuche.

Es sollte untersucht werden, wie bei Brandversuchen von verpackten pyrotechnischen Sätzen und Gegenständen zuverlässige Meßwerte erhalten werden können, die eine Unterscheidung zwischen den Lagergruppen 1.3 und 1.4 ermöglichen.

1. Einleitung

Die "Zweite Verordnung zum Sprengstoffgesetz" ¹⁾ (2. SprengV) regelt die Aufbewahrung von explosionsgefährlichen Stoffen und von Gegenständen mit explosionsgefährlichen Stoffen [1]. Der Verordnung mit ihren Rechtsvorschriften ist ein umfangreicher "Anhang zur 2.SprengV" ²⁾ mit technischen Vorschriften beigelegt.

Explosionsgefährliche Stoffe müssen nach den Vorschriften des Anhangs zu dieser Verordnung und im übrigen nach den allgemein anerkannten sicherheitstechnischen Regeln aufbewahrt werden (§ 2 Abs. 1 von [1]).

Die hier zusätzlich genannten sicherheitstechnischen Regeln sollen die allgemeinen Anforderungen des Anhangs je nach dem Grad der möglichen Gefährdung differenzieren und technisch näher erläutern. Sie sind in mehreren "Sprengstofflager-Richtlinien" ³⁾ niedergelegt.

1) im folgenden "2. SprengV" abgekürzt

2) vollständig: Anhang zu § 2 der Zweiten Verordnung zum Sprengstoffgesetz (2. SprengV)

3) im folgenden "SprengLR" abgekürzt

Der Anhang zur 2. SprengV unterscheidet zwischen Explosivstoffen bzw. Gegenständen mit Explosivstoffen einerseits und sonstigen explosionsgefährlichen Stoffen andererseits. Für beide Stoffarten gibt es teils gleiche (1.1, 1.2 und 1.3) teils verschiedene (1.4 bzw I, II und III) Lagergruppen. Da sich aus der Zuordnung zu einer Lagergruppe jeweils bestimmte Sicherheitsanforderungen ergeben, hat die Zuordnung erhebliche wirtschaftliche Bedeutung. Die Zuordnung zu einer höheren Lagergruppe wirkt sich also für den Unternehmer erschwerend aus. Andererseits bildet sie einen Anreiz, durch die Wahl oder Entwicklung einer besseren Verpackung, aber auch durch eine weitere Unterteilung in Teilpackstücke im Packstück die Zuordnung zu einer niedrigeren Lagergruppe und damit eine Kostenentlastung zu erreichen.

Insofern ist also die hier zu untersuchende Frage, wie sich pyrotechnische Sätze und Gegenstände in ihrer jeweiligen Verpackung in den Lagergruppen 1.3 und 1.4 unterscheiden, auch von erheblicher wirtschaftlicher Relevanz.

2. Die verschiedenen Lagergruppen

2.1 Explosivstoffe und ihre Lagergruppen

Explosivstoffe sind Sprengstoffe, Treibstoffe, Zündstoffe, pyrotechnische Sätze. Gegenstände mit Explosivstoff sind z. B. pyrotechnische Gegenstände. Die Stoffe und Gegenstände besitzen einen unterschiedlichen Grad der Gefährlichkeit, der auch noch - wie gesagt - durch die Art der Verpackung beeinflusst wird. Die Lagergruppe wird auf Grund von Prüfungen ermittelt (s. Abschnitt 2.3 und 2.4).

Es kommen in Betracht:

Lagergruppe 1.1 - Gefahr der Massenexplosion, Druckwirkungen, Flammen, Spreng- und Wurfstücke gefährden die Umgebung;

Lagergruppe 1.2 - keine Massenexplosion, leichte Sprengstücke und Flugfeuer gefährden die Umgebung;

Lagergruppe 1.3 - heftiger Abbrand, Umgebung durch Flammen, Wärmestrahlung und Flugfeuer gefährdet;

Lagergruppe 1.4 - keine bedeutsame Gefahr

(weitere Einzelheiten im Abschnitt 2.4).

2.2 Sonstige explosionsgefährliche Stoffe und ihre Lagergruppen

Sonstige explosionsgefährliche Stoffe sind explosionsgefährliche Stoffe, die keine Explosivstoffe sind. Sie werden nach dem Ergebnis der in Abschnitt 2.3 beschriebenen Versuche entweder den Lagergruppen 1.1 bis 1.3 zugeordnet oder - wenn ihre in der Zeiteinheit freigesetzte Energie kleiner als die der Stoffe der Lagergruppe 1.3 ist - den nachfolgenden Lagergruppen:

Lagergruppe I - sehr heftiger Abbrand, starke Wärmeentwicklung, vereinzelte Explosionen von Einzelpackungen (geringer Druck),

Lagergruppe II - heftiger Abbrand, starke Wärmeentwicklung, vereinzelte Explosionen ohne Umsatz des gesamten Inhalts einer Einzelpackung,

Lagergruppe III - Abbrand vergleichbar dem von brennbaren Stoffen.

Sonstige explosionsgefährliche Stoffe, für welche diese Lagergruppen in Betracht kommen, sind z.B. Organische Peroxide, Nitro- und Nitrosoverbindungen, Salpetersäureester, Aminoxide, Cellulosenitrat-Zubereitungen (z.B. Collodiumwolle), Zellhorn, Treibmittel (Blähmittel), Ammoniumdichromat [27] .

2.3 Versuche zur Ermittlung von Lagergruppen

Maßgebend für die Einteilung in Lagergruppen ist das Verhalten der Stoffe und Gegenstände in ihrer Versandverpackung bei einem Brand oder nach einer Zündung bzw. Anzündung im Innern des Packstückes. Deshalb werden für die Versuche diese Bedingungen herbeigeführt.

Folgende Arten von Prüfungen sind vorgeschrieben:

Prüfung A - ein Packstück, Zündung oder Anzündung von innen,

Prüfung B - ein Stapel von Packstücken (mindestens 5), Zündung oder Anzündung innerhalb eines Packstücks in der Mitte des Stapels,

Prüfung C - ein Packstück auf einem Lattenholzstapel, Anzündung mit Hilfe eines Heizöl/Benzin-Kraftstoffgemisches,

Prüfung D - ein Stapel von Packstücken (mindestens 5) wird einem Lattenholzfeuer (oder einem entsprechenden Kraftstoffgemisch-Feuer) ausgesetzt.

Es ist jeweils festzustellen, wie der Brand oder die Explosion innerhalb des Packstückes weitergeleitet wird, wie er (gegebenenfalls) auf benachbarte Packstücke übertragen wird und inwieweit dabei die Umgebung gefährdet wird.

Detaillierte Beschreibungen der einzelnen Versuche finden sich in [2] und [3]. Einzelheiten werden im Abschnitt 3 beschrieben und sind auf den dazugehörenden Abbildungen zu ersehen.

2.4 Zuordnung zu den Lagergruppen

Nach einer Reihe von Versuchen zur Ermittlung der Lagergruppen durch die BAM zeigte sich, daß die Zuordnung zu den Lagergruppen 1.1 und 1.2 im allgemeinen nicht strittig ist und sich meist eindeutig aus den Prüfungen ergibt.

Nicht geklärt ist der Unterschied zwischen den Lagergruppen 1.3 und 1.4. Aus der SprengLR 010 [2] ergibt sich der wesentliche Unterschied aus den Formulierungen "sehr heftiger Abbrand mit starker Wärmeentwicklung" für die Lagergruppe 1.3 und "Abbrand geringer Heftigkeit und mäßiger Wärmeentwicklung" für die Lagergruppe 1.4.

Diese allgemeinen Formulierungen sollen im Fernziel - d.h. bei gezielter Fortführung der begonnenen, im folgenden noch zu beschreibenden Vorversuche - mit Meßwerten belegt werden, die auch in Beziehung zu setzen sind zur Toleranzdosis eines zum Löschen eingesetzten Feuerwehrmannes. Eine Berechnung von absoluten Werten sollte es dann ermöglichen, aus den Verbrennungswärmen und kinetischen Daten der eingesetzten pyrotechnischen Sätze die zu erwartende Gesamtwärmeabstrahlung in der Zeiteinheit voraus zu berechnen. Allerdings wird auch dann auf Prüfungen nicht verzichtet werden können, da die Kenntnis über die Zeit zwischen Brandbeginn und dem Auftreten von

Brand- oder Deflagrations-Intensitätsspitzen für die Gefahrenabschätzung im Hinblick auf die Brandbekämpfung wichtig ist.

Für die sonstigen explosionsgefährlichen Stoffe wurde die Einordnung in die Lagergruppen 1.3, I, II und III in der SprengLR 011 [3] durch den "Durchsatz" (A_{korr} für eine Stoffmenge von 10 000 kg, Einzelheiten siehe dort), dem Verhältnis von umgesetztem Stoff pro Zeiteinheit, genau definiert:

$A_{\text{korr}} \geq 300 \text{ kg/min}$ = Lagergruppe 1.3,
 $A_{\text{korr}} \geq 300 \text{ kg/min}$ und $\geq 140 \text{ kg/min}$ = Lagergruppe I,
 $A_{\text{korr}} \geq 140 \text{ kg/min}$ und $\geq 60 \text{ kg/min}$ = Lagergruppe II,
 $A_{\text{korr}} \geq 60 \text{ kg/min}$ = Lagergruppe III.

Diese Methode ist aus Rechtsgründen - die Gruppen I, II und III gelten nur für sonstige explosionsgefährliche Stoffe - nicht für pyrotechnische Sätze und Gegenstände anzuwenden. Sie ist für die meisten pyrotechnischen Sätze (und die mit diesen gefüllten Gegenstände) aber auch deshalb nicht anwendbar, weil diese nach Einsetzen der Reaktion viel zu schnell (Deflagration bzw. Explosion bis Detonation) reagieren. Aus dem gleichen Grund ist die dort verwendete Meßmethode (siehe unter 3.1.1) hier nur für orientierende Versuche anwendbar.

3. Experimenteller Teil

3.1 Meßgeräte

Es stand zum einen ein thermoelektrischer Detektor zur Verfügung, der vom Labor 4.33 der BAM konstruiert wurde und der für Versuche zur Lagergruppenzuordnung sonstiger explosionsgefährlicher Stoffe verwendet worden war und ein pyroelektrischer Detektor der Firma Laser-Precision Corp., der aber nur für Kurzzeitmessungen gut geeignet ist. Für Brandversuche - d. h. für Langzeitmessungen - wurde deshalb aus Mitteln des Forschungsvorhabens das Wärmestrahlungsmeßgerät KT 79 der Firma Heimann, Wiesbaden, beschafft, welches ebenfalls einen pyroelektrischen Detektor als Empfänger besitzt (Einzelheiten siehe unter 3.1.2 und 3.1.3). Eine ebenfalls vorhandene Moll'sche Thermosäule (Firma Kipp & Zonen) wurde nur für Kalibrierversuche verwendet, für die beabsichtigten Messungen war sie zu langsam.

3.1.1 Thermoelektrischer Detektor

Meßprinzip dieses Detektors ist der thermoelektrische Effekt, die Abhängigkeit der Berührungsspannung zwischen zwei Metallen (einem sog. Thermoelement) von der Temperatur der Berührungsstelle [28]. Zur Verstärkung dieses Effektes sind mehrere dieser Thermoelemente an einer geschwärzten Detektorfläche hintereinander geschaltet zu einer sog. Thermosäule. Diese Detektoren sind als Dünnschichtthermopile auf dem Markt erhältlich und wurden in ein selbstentwickeltes Gerät eingebaut, s. Abbildung 1a. Der Empfänger arbeitet für eine Strahlung zwischen $0,5 \mu\text{m}$ und $9 \mu\text{m}$ weitgehend linear, besitzt eine aktive Fläche von mindestens $0,25 \text{ cm}^2$ und einen so großen Öffnungswinkel, daß in der gewählten Meßentfernung die Flamme in voller Größe erfaßt wird. Es können Bestrahlungsstärken am Ort des Empfängers zwischen 100 und 3000 W/m^2 (10 - 300 mW/cm^2) gemessen werden. Die Zeitkonstante (Zeit bis zum $63,2$ %-Wert des Endsignals) liegt unter 1000 ms . Zur Registrierung wird ein Kompensationsschreiber verwendet [3], der eine graphische Integration der erhaltenen Kurve gestattet.

Der Detektor ist zur Beobachtung und Messung von Brandverläufen gut geeignet, für schnell verlaufende pyrotechnische Reaktionen aber zu langsam, so daß Details der Messungen nicht erfaßt werden. Vgl. dazu die Abbildung 22 (Reaktionspeak, beobachtet mit o. g. thermoelektrischen Detektor) mit den Abbildungen 20 und 21 (gleicher Reaktionspeak, beobachtet mit einem pyroelektrischen Detektor).

3.1.2 Pyroelektrischer Detektor

Meßprinzip dieses Detektors ist der pyroelektrische Effekt, d. h. die bei Temperaturänderungen auftretende Änderung der elektrischen Spannung bestimmter Kristalle (Spezialfall der Piezoelektrizität) [28].

Im Teil I dieses Berichtes wird unter Nummer 2.2 Meßmethoden (S. 12/13) ein pyroelektrischer Detektor der Firma Laser-Precision Corp. beschrieben. Dieser hat zwar eine sehr kurze Anstiegszeit von ca. $0,15 \text{ ms}$, jedoch eine geringe Langzeitkonstanz, d. h. nach einigen Sekunden fällt der

Meßwert auf seinen Dunkelwert ab. Der Detektor ist daher sehr gut für die Beobachtung des schnellen Abbrandes von offenen pyrotechnischen Sätzen geeignet, da dabei mit dem Zündimpuls gleichzeitig die Messung gestartet werden kann. Für die Beobachtung von Bränden mit verpackten pyrotechnischen Gegenständen ist er aber gerade deshalb ungeeignet, da vorher nicht abzusehen ist, wann die Gegenstände im Brandversuch zur Zündung kommen (eventuell auch einzelne Gegenstände in zeitlichem Abstand).

Es kam deshalb das von der Firma Heimann GmbH, Wiesbaden, aus ihrem Infrarotstrahlungsthermometer KT 17 entwickelte "Wärmestrahlungsmeßgerät KT 79" mit Detektor Typ A zum Einsatz, s. Abbildung 1a. Das Gerät besitzt eine CaF_2 -Optik, dadurch ergibt sich ein erfaßter Spektralbereich von 0,3 - 10 μm . Der Fehler durch Nichterfassung des fernen Infrarotbereiches oberhalb von 10 μm liegt bereits bei einer Flammentemperatur von 1000°C unter 1 %, bei höherer Flammentemperatur noch darunter, d. h. die von "heißen" pyrotechnischen Sätzen ausgehende Wärmestrahlung wird fast vollständig erfaßt. Durch Verwendung eines Weitwinkelobjektivs (Typ M 1), welches auf eine Meßentfernung von 30 m bis 100 m eingestellt worden ist, ergibt sich nach [29] ein Meßwinkel (Winkel des Meßfeldkegels) von ca. 27,5 Grad, so daß auch umfangreiche Flammerscheinungen von der Optik erfaßt werden sollen. Der Detektor selbst hat eine wirksame kreisförmige Empfängerfläche von 4 mm Durchmesser. Die Einstellzeit (90-%-Zeit) beträgt 10 ms, so daß auch schnelle Vorgänge sehr gut erfaßt werden, wie sich bei den Versuchen zeigte.

Das Gerät wurde von der Herstellerfirma mit Hilfe eines Schwarzkörperofens kalibriert und liefert ein Ausgangssignal zwischen 0 und 10 V, welches für diesen Meßzweck der Strahldichte L zwischen 0 und 205 $\text{mW}/\text{cm}^2 \cdot \text{sr}$ direkt proportional ist, s. Abbildung 2.

Unter Beachtung des durch die Optik festgelegten Meßwinkels - d. h. großer Abstand (30 - 100 m) zum Meßobjekt, so daß das Meßobjekt wesentlich kleiner als das erfaßte Meßfeld ist - ist die Strahldichte L der Bestrahlungsstärke E in mW/cm^2 proportional. Es besteht nach [29] folgende Beziehung

$$E \approx 9,00 \cdot 10^{-2} \cdot L.$$

3.1.3 Registrierung und Auswertung

Völlig neu entwickelt wurde die Registrierung der Meßwerte. Die bisher verwendeten Transientenrecorder können aufgrund der geringen Speicherkapazität nur bei Kurzzeitversuchen optimal eingesetzt werden. Der neue Meßaufbau mußte für Kurzzeitereignisse wie auch für Langzeitmessungen geeignet sein. Daher wurde folgende rechnergestützte Gerätekonfiguration gewählt, s. Prinzipskizze Abb. 1b.

Als Meßaufnehmer dient das unter 3.1.2 genannte Meßgerät KT 79 der Firma Heimann. Es besteht im wesentlichen aus einer Linse, einem Strahlenteiler, einem pyroelektrischen Detektor mit Choppereinrichtung, einem Filter und einem Ausgangsverstärker. Zur Visierung des Meßobjektes dient ein Durchblicksucher. Die vom Meßobjekt abgegebene Strahlung (Licht, IR-Strahlung) gelangt über die Optik und das Umlenkprisma zum pyroelektrischen Detektor. Vor dem Detektor sitzt die Choppereinrichtung, welche die eintreffende Strahlung periodisch unterbricht. Diese Einrichtung ist notwendig, da pyroelektrische Detektoren nur kurzzeitig auftreffende Strahlungsdifferenzen messen können. Als Meßsignal erhält man eine Wechselspannung, welche gleichgerichtet wird. Mit Hilfe eines Filters wird die Chopperfrequenz aus dem Meßsignal eliminiert. Das jetzt vorhandene reine Meßsignal wird nun verstärkt und kann weiter verarbeitet werden.

Die abgehenden analogen Signale können nun wahlweise über BNC-Kabel oder über ein Glasfaserkabel zur Rechnerschnittstelle gesendet werden. Im vorliegenden Fall war der Einsatz eines Glasfaserkabels zur Vermeidung von Störungseinflüssen notwendig (Rundfunksender, Radar, Feuchtigkeit). In diesem Fall wird das Meßsignal des Meßaufnehmers mit Hilfe eines Spannungs-Frequenz-Wandlers in hochfrequente Schwingungen umgewandelt. Von einem sogenannten Glasfasersender gelangen die Signale über die Glasfaserleitung zum Empfänger in der Rechnerschnittstelle. Die Rechnerschnittstelle ist ein modular aufgebautes Meßwerterfassungssystem der Firma Hewlett Packard, Typ HP 6942. Es besteht aus einem 16-kanaligen, programmierbaren Multiplexer, einem Analog-Digital-Wandler für analoge Meßsignale, einem Frequenzmesser für hochfrequente Signale

sowie einem Taktgenerator zur Steuerung der Meßzeiten. Systembedingt sind zwei Arten der Messung möglich: 1. schnelle Kurzzeitmessung und 2. Langzeitmessung.

Die schnelle Kurzzeitmessung läßt bis 11 000 Messungen pro Sekunde zu, es können aber nur maximal 32 767 Messungen getätigt werden. Die hohe Meßgeschwindigkeit erfordert eine unformatierte Übernahme der Meßwerte von der Schnittstelle zum Rechner. Es findet kein Dialog zwischen Rechner und Schnittstelle statt. Die Meßwerte werden als ganzzahlige Zahlen vom Rechner übernommen und können daher auch platzgünstig abgespeichert werden. Um die reellen Meßwerte zu erhalten, muß jeder einzelne Wert mit einem Faktor multipliziert werden.

Die Langzeitmessung kann nur maximal 25 Messungen pro Sekunde bewältigen. Die Meßgeschwindigkeit wird hierbei durch den Dialog zwischen Rechner und Schnittstelle begrenzt. Die Begrenzung der Anzahl der Meßwerte ist hier durch den verfügbaren Speicherplatz des Rechners bestimmt. Die bei dieser Meßart eingelesenen Werte entsprechen den reellen Meßwerten. Damit diese ebenfalls platzgünstig abgespeichert werden können, werden sie mit einem reziproken Faktor multipliziert.

Als Steuer- und Auswertrechner dient ein Tischcomputer der Firma Hewlett Packard, Serie 200, Typ HP 9816. Er ist als Computer für technische Aufgaben konzipiert und für den vorliegenden Anwendungsfall sehr gut geeignet. Das gesamte Programm ist modular aufgebaut. Programmteile, die nicht mehr benötigt werden, löschen sich selbsttätig nach der Weiterverarbeitung, um Speicherplatz für Meßwerte zu gewinnen. Es können daher bis zu 60 000 Meßwerte gespeichert und verarbeitet werden. Der Programmablauf gliedert sich in folgende Teile:

1. Abfrage und Eingabe der Meßparameter (hierunter fallen z. B.: wieviele Messungen pro Sekunde, Gesamtmeßzeit, angeschlossenes Gerät, gerätespezifische Korrekturfaktoren).
2. Steuerteil für die Rechnerschnittstelle.
3. Abspeichern (sichern) der Meßwerte auf einer Diskette,
4. graphische Ausgabe auf den Bildschirm des Rechners und
5. Auswertung der Meßkurven. Zur Auswertung gehört die Möglichkeit, Abschnitte einer Kurve gedehnt darzustellen, um Einzelheiten besser erkennen und dokumentieren zu können. Des weiteren können die

Meßkurven geglättet und vorgewählte Abschnitte integriert werden. Hierzu mußten umfangreiche Software-Programme selbst entwickelt werden.

Bei den folgenden Brandversuchen wurde mit 25 Messungen pro Sekunde gearbeitet, die Gesamtmessung dauerte 20 Minuten (nach dieser Zeit ist nur noch eine Glutstelle vorhanden), d. h. es stehen 30 000 Meßwerte zur Verfügung. Das Ausschreiben des Versuchsablaufes über diese 20 Minuten mit einem Schreiber auf einem Blatt der Größe DIN A4 kann den tatsächlichen Umfang der Messung nicht vermitteln, s. Abbildung 19, es ist aber mit Hilfe des Rechnerprogramms möglich, einen bestimmten Bereich des gesamten Versuchsablaufes (z.B. Intensitätsspitzen) mit Hilfe des hier entwickelten Rechnerprogramms gesondert und in jeder gewünschten Vergrößerung darzustellen, s. Abbildung 20 und 21 (Ausschnitt aus Abbildung 19). Damit ist die Reaktion des zu beurteilenden Prüfmaterials auch in einem großen Brand leicht zu beobachten und auszuwerten. Die wesentliche Verbesserung der hier gebotenen Möglichkeit ergibt sich in der Gegenüberstellung mit der Aufzeichnung des gleichen Ereignisses mit einem Kompensationsschreiber (hier: Signal des thermoelektrischen Detektors), bei welchem eine nachträgliche Änderung des Aufzeichnungmeßstabes nicht möglich ist (Abbildung 22).

3.2 Durchführung von Brandversuchen

Für die Einarbeitung in die Versuchsmethode und -messung wurden Brandversuche durchgeführt, und zwar viermal der Versuch C und einmal der Versuch D der SprengLR 010 (s. Abschnitt 2.3). Die Versuchsbeschreibung lautet:

Prüfung C

Das Packstück ist auf einen 0,5 m hohen Stapel aus Lattenholz zu stellen. Das Packstück selbst ist in seiner vollen Höhe ebenfalls mit Lattenholz zu umschichten. Die Schicht soll in jeder Richtung mindestens 0,5 m dick sein. Das Holz soll lufttrocken sein. Die Latten sollen nicht dicker als 3-4 cm sein. Der seitliche Abstand der Latten voneinander soll 10 cm betragen. Der Versuchsaufbau ist mit etwa 5 l Gemisch, bestehend aus 90 v.H. leichtem Heizöl und 10 v.H. Vergaserkraft-

stoff, zu übergießen und an zwei Seiten zu entzünden. Der Holzstapel ist in einer Blechwanne zu errichten, wenn der Stoff flüssig ist oder während des Abbrandes Schmelzen entstehen können.

Prüfung D

Mindestens fünf Packstücke sind auf einem eisernen Rost etwa 1 m über dem Erdboden zu stapeln. Um den Stapel ist erforderlichenfalls ein Stahlband zu legen. Unter den Rost und um den Stapel herum ist lufttrockenes Lattenholz, das nicht dicker als 3-4 cm sein soll, aufzuschichten. Der seitliche Abstand der Latten voneinander soll 10 cm betragen. Die Schicht soll in jeder Richtung mindestens 0,5 m dick sein. Der Versuchsaufbau ist mit etwa 50 l Gemisch, bestehend aus 90 v.H. leichtem Heizöl und 10 v.H. Vergaserkraftstoff, zu übergießen und an zwei Seiten zu entzünden [2].

(Bei Prüfung D wurden - davon abweichend - nur 25 l Kraftstoffgemisch verwendet, da sich 50 l als zu große Menge herausstellte, welche z.T. im Erdreich versickerte). Als Versuchsmaterial für die Versuche 1, 2, 3 und 5 standen Holzkisten mit verschiedenen Typen von zylindrischen Knallkörpern zur Verfügung, welche von der Berliner Polizei zur Verfügung gestellt worden waren. Der pyrotechnische Satz bestand in diesen Fällen aus Schwarzpulver. Es handelt sich um versandfertig verpackte Importware aus China.

Versuch 1 (Prüfung C)

Eine Kiste (44 x 24 x 28 cm, Wanddicke 1,2 cm), enthaltend 8 Pakete, jedes Paket 40 Päckchen, jedes Päckchen 8 Knallkörper, jeder Knallkörper 0,4 g Satz = 2560 Gegenstände = 1 kg Satz. Verwendet wurden 250 m Lattenholz entsprechend 182 kg und 5 l Brennstoffgemisch (etwas Holzwohle an den Anzündstellen). Meßentfernung 30 m. Abbildung 3 zeigt den Kisteninhalt, Abbildung 4 und 5 den Versuchsaufbau. Erste Reaktion nach 3 min 5 s, danach ständiges Knallen bis 7 min 45 s, einzelne Gegenstände werden fortgeschleudert, Abbildung 6 den Abbrand. Abbildung 9 zeigt den allgemeinen Brandverlauf, allerdings stark vergrößert (s. 3.13). Die Aufzeichnung setzte etwas verspätet nach der Zündung ein.

Versuch 2 (Prüfung C)

Eine Kiste (44,5 x 24 x 30,5 cm, Wanddicke 1,2 cm), enthaltend 8 Pakete, jedes Paket 40 Päckchen, jedes Päckchen 8 Knallkörper, jeder Knallkörper 0,95 g Satz = 2560 Gegenstände = 2,43 kg Satz, s. Abbildung 7. Lattenholzmenge wie Versuch 1. Meßentfernung 30 m.

Erste Reaktion nach 3 min 7 s, einzelne Gegenstände werden fortgeschleudert, Ende der Reaktion nach 8 min 50 s. Den allgemeinen Brandverlauf zeigt Abbildung 10.

Versuch 3 (Prüfung C)

Eine Kiste (45,5 x 28,5 x 43,5 cm, Wanddicke 1,1 cm), enthaltend 8 Pakete, jedes Paket 20 Päckchen, jedes Päckchen 4 Knallkörper jeder Knallkörper 4,3 g Satz = 640 Gegenstände = 2,75 kg Satz. Lattenholz 280 m entspr. 205 kg. Meßentfernung 30 m. Erste Reaktion nach 4 min 15 s, einzelne Gegenstände werden fortgeschleudert, Ende der Reaktion nach 9 min. Den allgemeinen Brandverlauf zeigt Abbildung 11.

Versuch 5 (Prüfung D)

5 Kisten, 4 Kisten wie Versuch 2 und 1 Kiste wie Versuch 1 = 10,72 kg Satz. Die Abbildungen 12, 13 und 14 zeigen den Stapel während des Aufbaus. (Lattenholz 1000 m entspr. 728 kg). Meßentfernung 50 m. Den allgemeinen Brandverlauf zeigt Abbildung 15. Die einzelnen Kisten reagierten nacheinander, einzelne Gegenstände werden fortgeschleudert, auf der Abbildung ist nach dem Versuchsprotokoll eine Zuordnung der Aufzeichnung zu der Reaktion der einzelnen Kisten eingezeichnet.

Versuch 4 (Prüfung C)

Da die Versuche mit den Knallkörpern trotz steigender Mengen an Satzinhalt keine besonderen Effekte erbrachten, wurde eine Kiste mit pyrotechnischen Gegenständen gefüllt, die aus Resten von Zulassungsprüfungen in der BAM stammten. Es wurden Gegenstände mit "heißen" Sätzen ausgesucht, also mit Sätzen,

deren oxidierbarer Bestandteil vornehmlich aus Metallpulver besteht.

Eine Kiste (44 x 24 x 28 cm, Wanddicke 1,2 cm) wurde mit 8,14 kg Gegenständen in loser Schüttung gefüllt (68 Sonnen, 18 Vulkane, 27 Fontänen, 3 Seenotfackeln, hauptsächlich aber pyrotechnische Munition, s. Abbildung 16). (Lattenholz 250 m entspr. 182 kg).

Nach 1 min 25 s nach der Zündung des Holzstoßes begann der Abbrand des Kisteninhalts sehr intensiv unter starker Rauchentwicklung und Fortschleudern einzelner Gegenstände, s. Abbildung 17 und 18. Nach 25 s ist die ganze Reaktion beendet und es brennt nur noch der Holzstoß. Der sehr schnelle Beginn und Ablauf der Reaktion ergibt sich aus der Füllung der Kiste "in loser Schüttung". Versandmäßig verpackte Gegenstände hätten erst später zu reagieren begonnen und der Abbrand hätte länger gedauert.

Abbildung 19 (S. 194) zeigt den allgemeinen Brandverlauf mit deutlicher Intensitätsspitze während der Zündung des Heizöl/Benzin-Gemisches und sehr deutlicher Intensitätsspitze während der Reaktion des Inhaltes der Kiste. Abbildung 20 zeigt eine Vergrößerung mit den beiden Intensitätsspitzen, während Abbildung 21 eine nochmals vergrößerte Abbildung der Reaktion des Kisteninhaltes wiedergibt. Diese letzte Abbildung zeigt, daß nun eine sehr genaue Integration (graphisch oder rechnerisch) der Wärmemenge, die aus der Reaktion des Kisteninhalts stammt, möglich ist.

Ein Vergleich der Genauigkeit ergibt sich aus Abbildung 22, sie zeigt das gleiche Ereignis aufgenommen mit dem thermoelektrischen Detektor und einem Kompensationsschreiber (Papiergeschwindigkeit 5 cm/min).

3.3 Ergebnisse der Brandversuche

Die Brandversuche mit Gegenständen der Lagergruppe 1.4 (Kisten mit versandmäßig verpackten Feuerwerks-Krachern mit Schwarzpulver) zeigten, daß nur ein Abbrand von "geringer Heftigkeit und mäßiger Wärmeentwicklung" beobachtet wird.

Auch eine Steigerung der Versuchsmenge bringt keine Gefahren-
erhöhung mit sich.

Einzelne Intensitätsspitzen können zwar teilweise einer Re-
aktion des Kisteninhaltes zugeordnet werden, aber nicht immer
eindeutig. Im wesentlichen wird der Holzstoßbrand beobachtet,
der Prüfinhalt macht sich nicht signifikant über diesem be-
merkbar. Es konnte festgestellt werden, daß bei dieser Art
Brand Schwankungen durch den unterschiedlichen Abbrand des
Holzstoßes selbst viel stärker waren, als vorher vermutet.
Abflauen des Windes oder seine Steigerung oder Drehung waren
von großem Einfluß, auch der Wechsel Sonne/Wolken machte sich
bemerktbar. Einen Eindruck davon vermittelt Abbildung 23. Sie
zeigt ein Detail von Versuch 3 vor dem Beginn der Reaktion
des Kisteninhaltes, als das Holzfeuer schon voll brannte. Der
Unterschied auf Grund der o. g. "natürlichen Schwankungen"
beträgt hier 2 Volt, d.h. 20 % vom Vollausschlag des Meßge-
rätes. Bei weiteren Versuchen wird diese "natürliche Schwan-
kung" daher durch apparative Maßnahmen teilweise eliminiert
(Sonneneinfluß), teilweise reduziert (Wind) werden (s. Abs.
3.5). Aus diesem Grund werden die Meßwerte der Versuche 1,
2, 3 und 5 auch hier nicht detaillierter ausgebreitet und
interpretiert. Nur so weit: Der Abbrand des Diesel/Benzin-
Gemisches ist deutlich zu erkennen, es folgt der sich voll
entwickelnde Brand und der langsame Abfall am Ende bis zum
Glutfeuer ist ebenfalls deutlich.

Von wesentlicher Bedeutung ist der Versuch 4. Er zeigt, daß
bei einem Brand von Packstücken mit Gegenständen, die heißere
Sätze enthalten, ein signifikantes Signal erhalten wird, das
quantitativ ausgewertet werden kann und in Relation zur Tole-
ranzdosis des Löschpersonals (u.U. noch unterschieden zwi-
schen normal gekleidetem Löschpersonal und solchem mit ent-
sprechender schwerer Schutzkleidung) betrachtet werden kann.

3.4 Kalibrierung der Detektoren

Für das Zuordnen sonstiger explosionsgefährlicher Stoffe zu
Lagergruppen sind vom Labor 4.33 ("Stoffe mit geringer che-
mischer Beständigkeit") der BAM mehrere Großbrandversuche
durchgeführt worden [30]. Einer der dort verwendeten, kali-

brierten thermoelektrischen Detektoren (BAM) wurde bei den bisherigen Versuchen parallel zum pyroelektrischen Wärmestrahlungsmeßgerät KT 79 eingesetzt. Die qualitative Übereinstimmung der beiden Kurven war gut. Bei der Quantifizierung ergaben sich Unterschiede.

Zum Vergleich wurde das Signal des Kisteninhalts aus Versuch 4 nach beiden Verfahren ausgewertet.

Von dem thermoelektrischen Empfänger wurde ein Spitzenwert von 5 mW/cm^2 und eine Gesamtbestrahlungsstärke von $44,7 \text{ mW}\cdot\text{s/cm}^2$ gemessen (s. Abbildung 22), von dem pyroelektrischen Empfänger ein Spitzenwert von 6 mW/cm^2 und eine Gesamtbestrahlungsstärke von $56 \text{ mW}\cdot\text{s/cm}^2$ (s. Abbildung 21).

Die unterschiedlichen Werte lassen sich zum Teil folgendermaßen deuten: Die Einstellzeiten der Detektoren sind sehr unterschiedlich. Außerdem konnte die Integration der Peakfläche in Abbildung 22 nur planimetrisch vorgenommen werden, bei Abbildung 21 dagegen erfolgte sie rechnerisch unter Verwendung jedes einzelnen Meßwertes. Im Vergleich dazu ist das planimetrische Verfahren naturgemäß ungenauer.

Vergleichsmessungen mit dem Wärmestrahlungsmeßgerät KT 79 und dem pyroelektrischen Detektor der Firma Laser-Precision (s. Abs. 3.1.2) ergaben allerdings gewisse Differenzen, die noch nicht geklärt werden konnten. Unter Einschaltung des Labors 5.41 ("Strahlungsphysikalische Eigenschaften; Farbmessung") der BAM und der Physikalisch-Technischen Bundesanstalt, Institut Berlin, wird zur Zeit daran gearbeitet, sich den Absolutwerten zu nähern. Vorerst kann durch weitere Arbeiten die Ausgangsbasis erweitert werden.

3.5 Geplante weitere Arbeiten

Beabsichtigt ist eine Wiederholung der Versuche mit reproduzierbaren Prüfstücken, also vom Hersteller bezogenen Versandverpackungen mit Gegenständen, die "heiße" pyrotechnische Sätze enthalten. Infrage kommen folgende Gegenstände: Signalfackeln weiß, Signalfackeln rot, Silbersonnen, bestimmte Vulkane, Signalsterne.

Um die Schwankungen durch Änderung der Windrichtung zu reduzieren, soll ein 2. Meßgerät, um 90° oder 180° versetzt, zur Beobachtung eingesetzt werden.

Um den Einfluß von Sonne und Wolken auszuschalten, soll ein 3. Meßgerät die Umgebung beobachten. Durch Differenzschaltung soll das Umgebungssignal vom Meßsignal abgezogen werden. Falls der Umgebungseinfluß vernachlässigt werden kann, soll das 3. Meßgerät auch zur Beobachtung des Objektes eingesetzt werden.

Diese zusätzlichen Meßgeräte sind inzwischen - auf Kosten des bisherigen Vorhabens - beschafft worden.

Schließlich ist zu präzisieren, ab welchen pro Zeiteinheit freigesetzten Wärmemengen eine Zuordnung zur Lagergruppe 1.3 erfolgen muß. Diskussionen mit den Feuerwehren sind im Gange.

4. Zusammenfassung

Durch Vorversuche mit einem Meßgerät mit pyroelektrischem Detektor (KT 79 der Firma Heimann) in Verbindung mit einem rechnergestützten Registriersystem wurde festgestellt, daß beim Abbrand von Gegenständen mit mehr als geringer Heftigkeit und mehr als mäßiger Wärmeentwicklung sehr gut interpretierbare Messungen möglich sind. Es wurde ein beträchtlicher meßtechnischer Fortschritt erzielt. Wege für die rechnergestützte Auswertung wurden abschließend erarbeitet. Die Abgrenzung zwischen den Lagergruppen 1.3 und 1.4 soll durch Berücksichtigung der die Wärmestrahlung beeinflussenden Faktoren präzisiert werden. Die Versuche sollen fortgesetzt werden.



Abbildung 1a
 Links pyroelektrischer Empfänger (KT 79, Firma Heimann), rechts thermoelektrischer Empfänger (BAM 4.33)

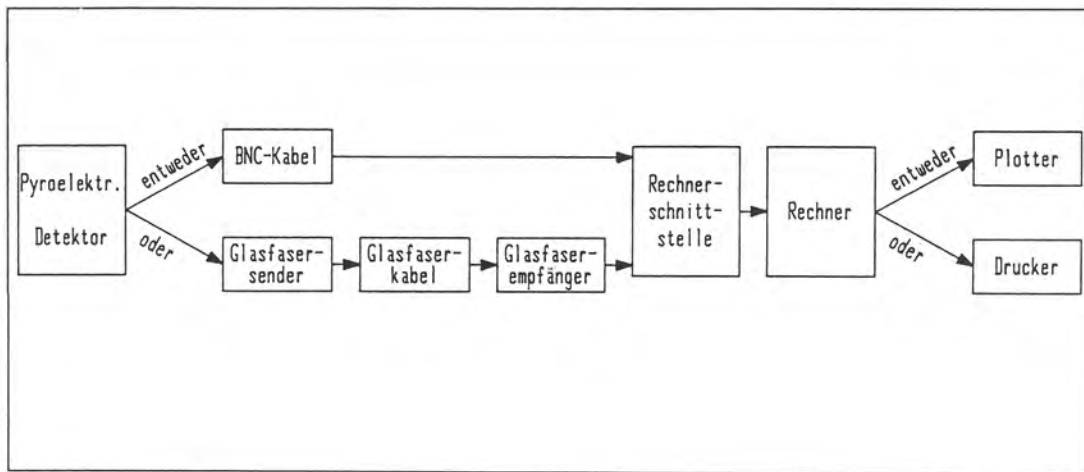


Abbildung 1b
 Prinzipskizze des Meßsystems

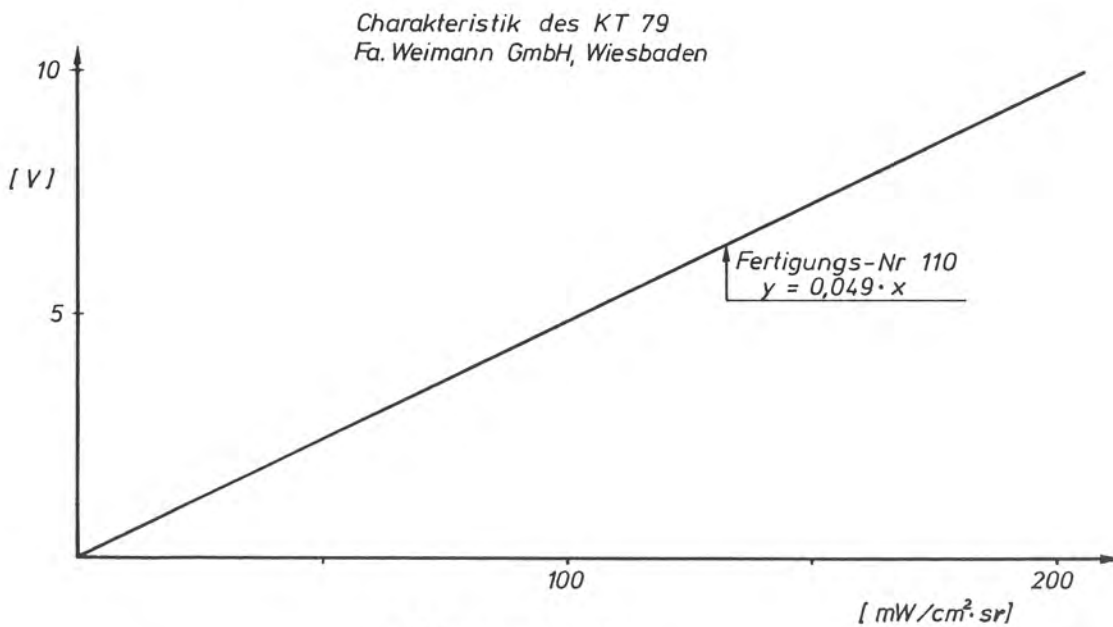


Abbildung 2



Abbildung 3
Inhalt der Kiste
von Versuch 1

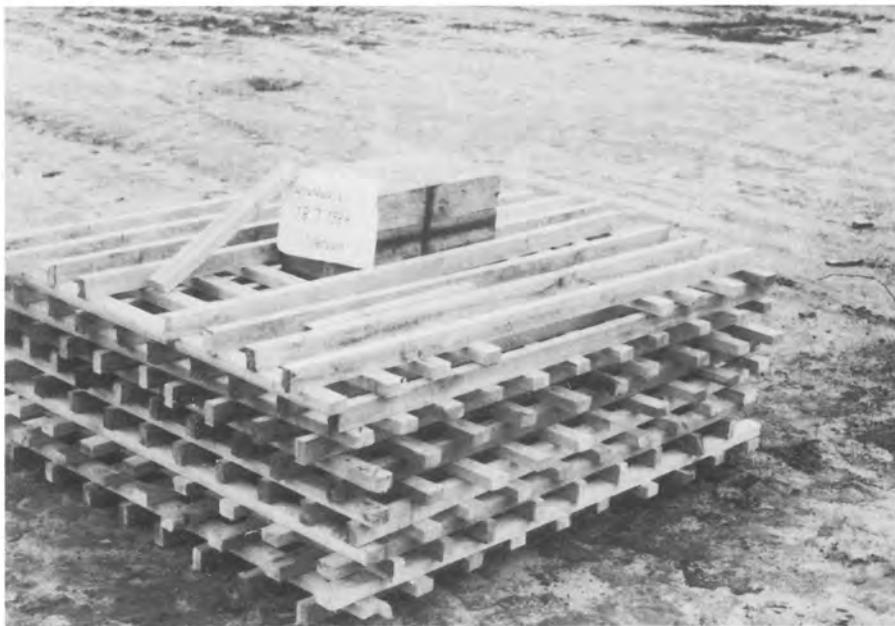


Abbildung 4
Versuch 1 während
des Aufbaus



Abbildung 5
Fertiger
Versuchsaufbau



Abbildung 6
Während des
Abbrandes



Abbildung 7
Inhalt der Kiste
von Versuch 2



Abbildung 8
Inhalt der Kiste
von Versuch 3

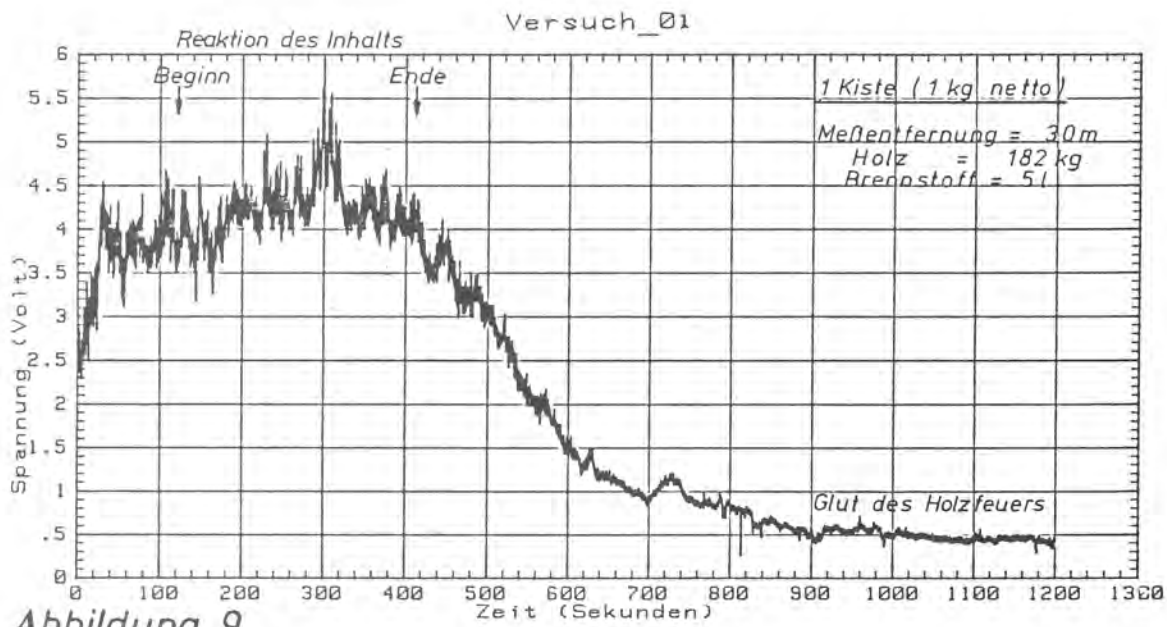


Abbildung 9

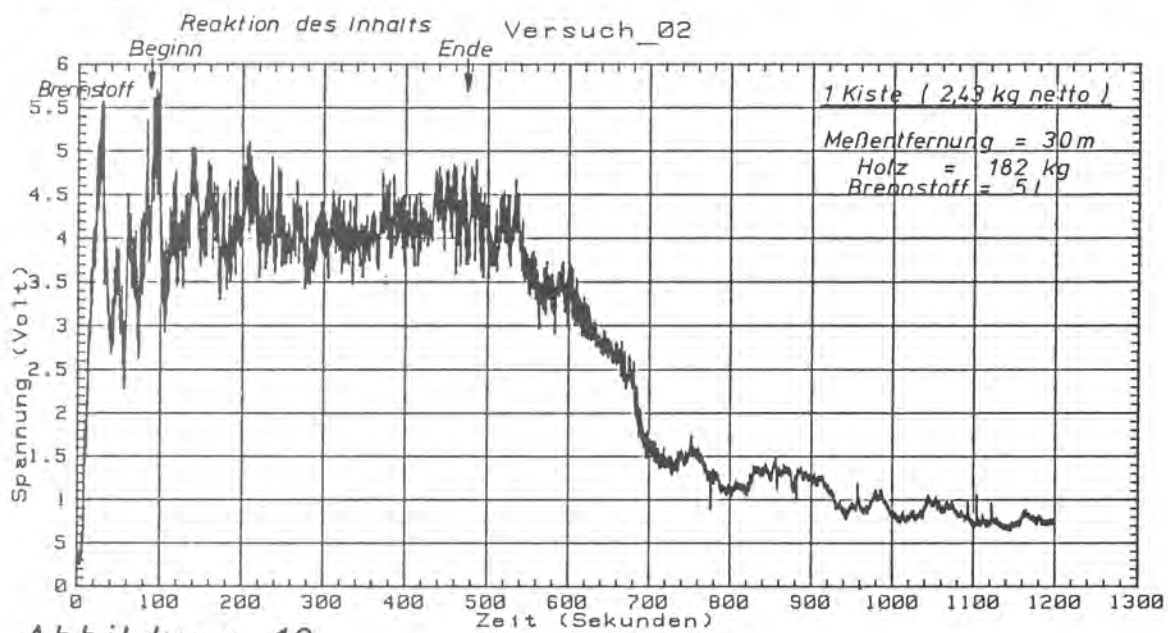


Abbildung 10

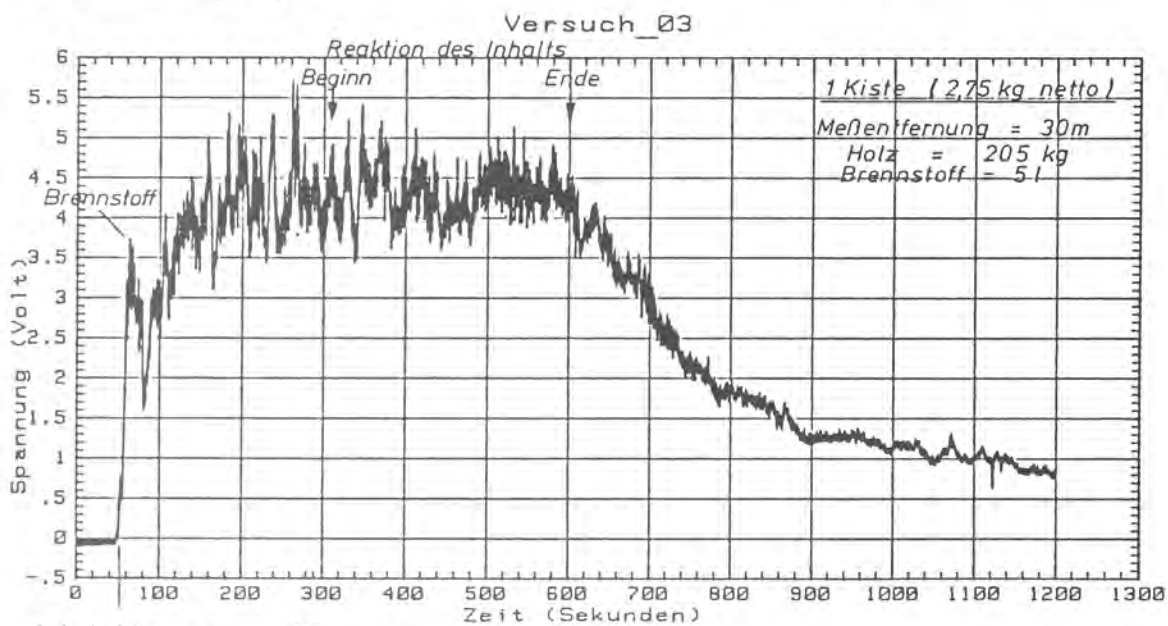


Abbildung 11



Abbildung 12
Versuch 5, Stapel
beim Aufbau



Abbildung 13
Versuch 5, Stapel
beim Aufbau



Abbildung 14
Aufbau für Versuch 4
(links) und 5 (rechts)

Versuch_05

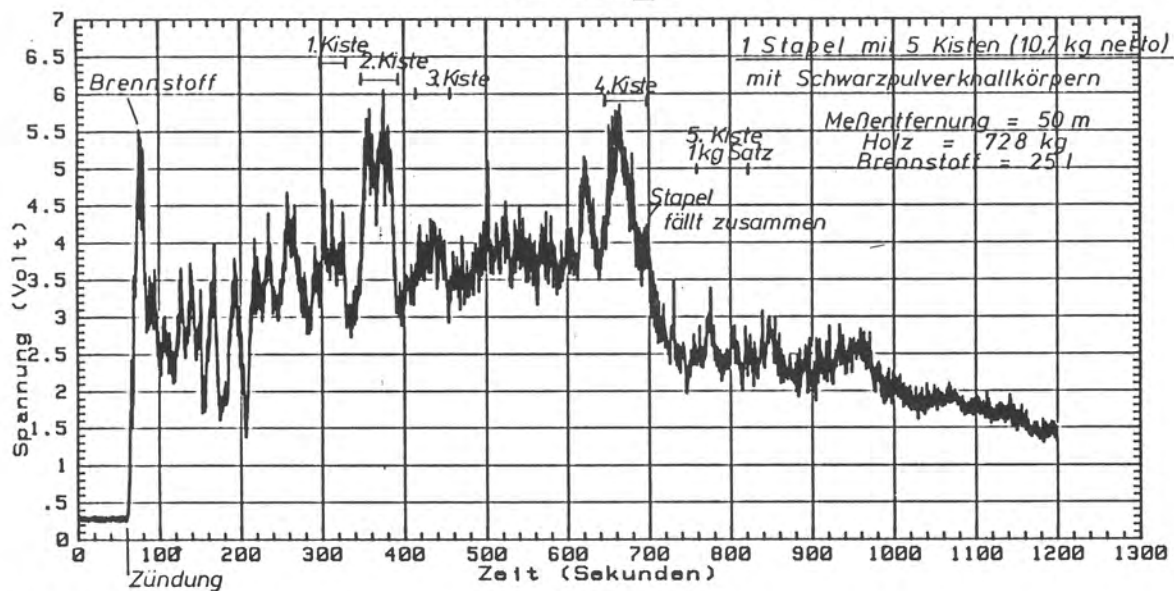


Abbildung 15



Abbildung 16

Inhalt der Kiste
von Versuch 4



Abbildung 17

Versuch 4 während
der Reaktion des
Kisteninhalts



Abbildung 18
 Versuch 4 während der
 Reaktion des Kisteninhalts

Versuch_04

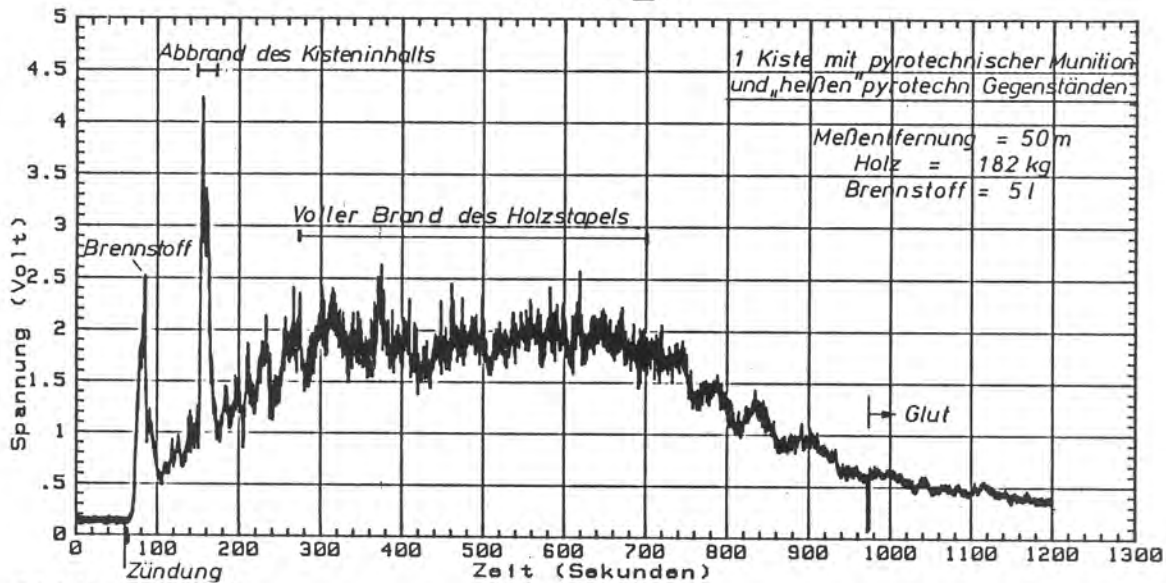


Abbildung 19

Versuch_04

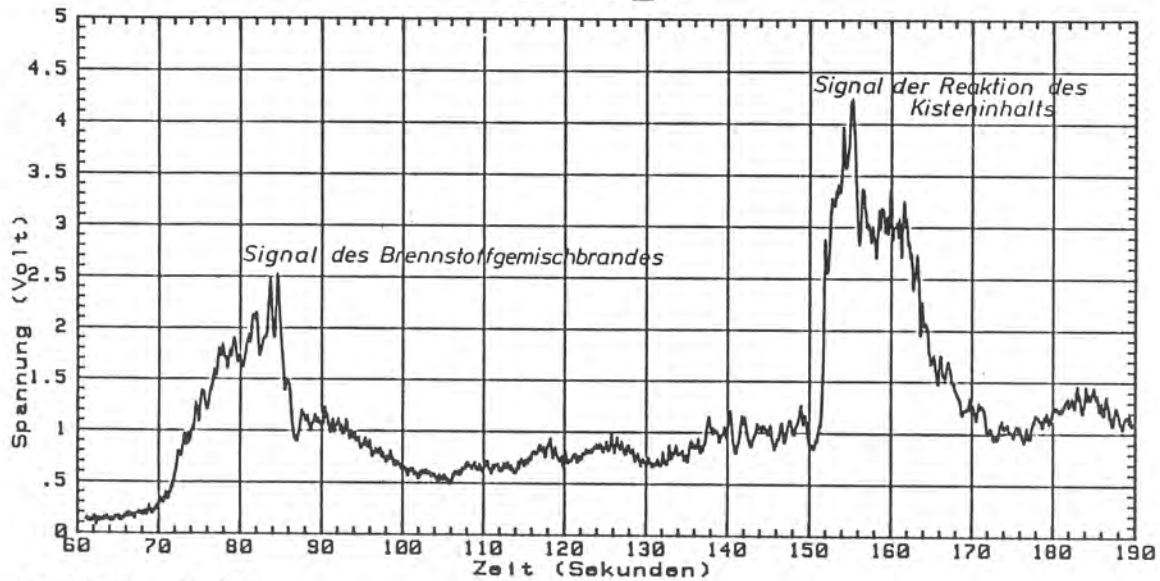


Abbildung 20

Versuch_04

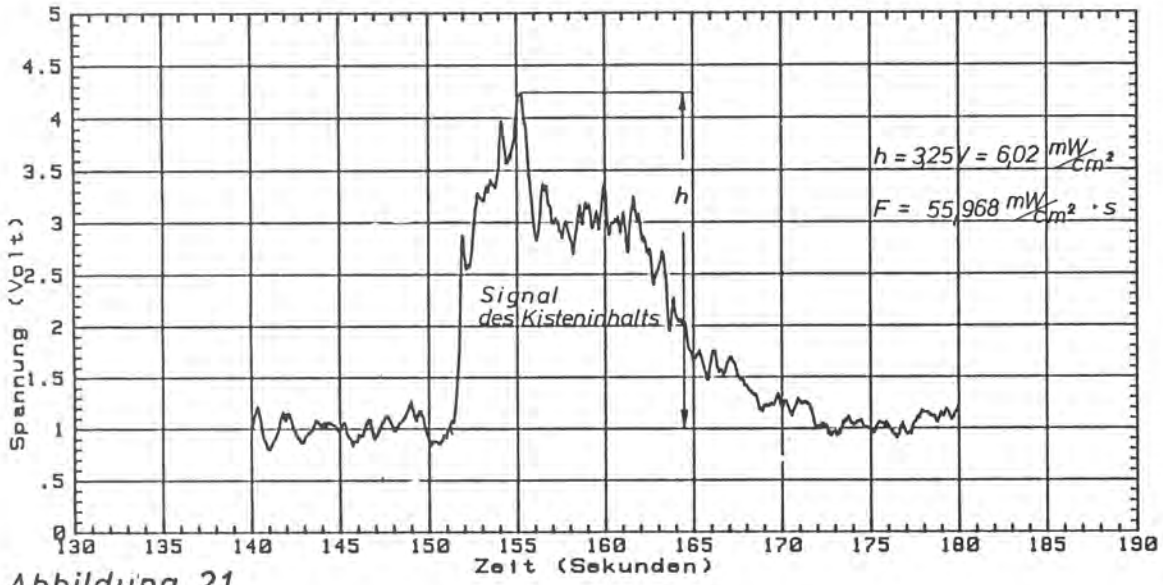


Abbildung 21

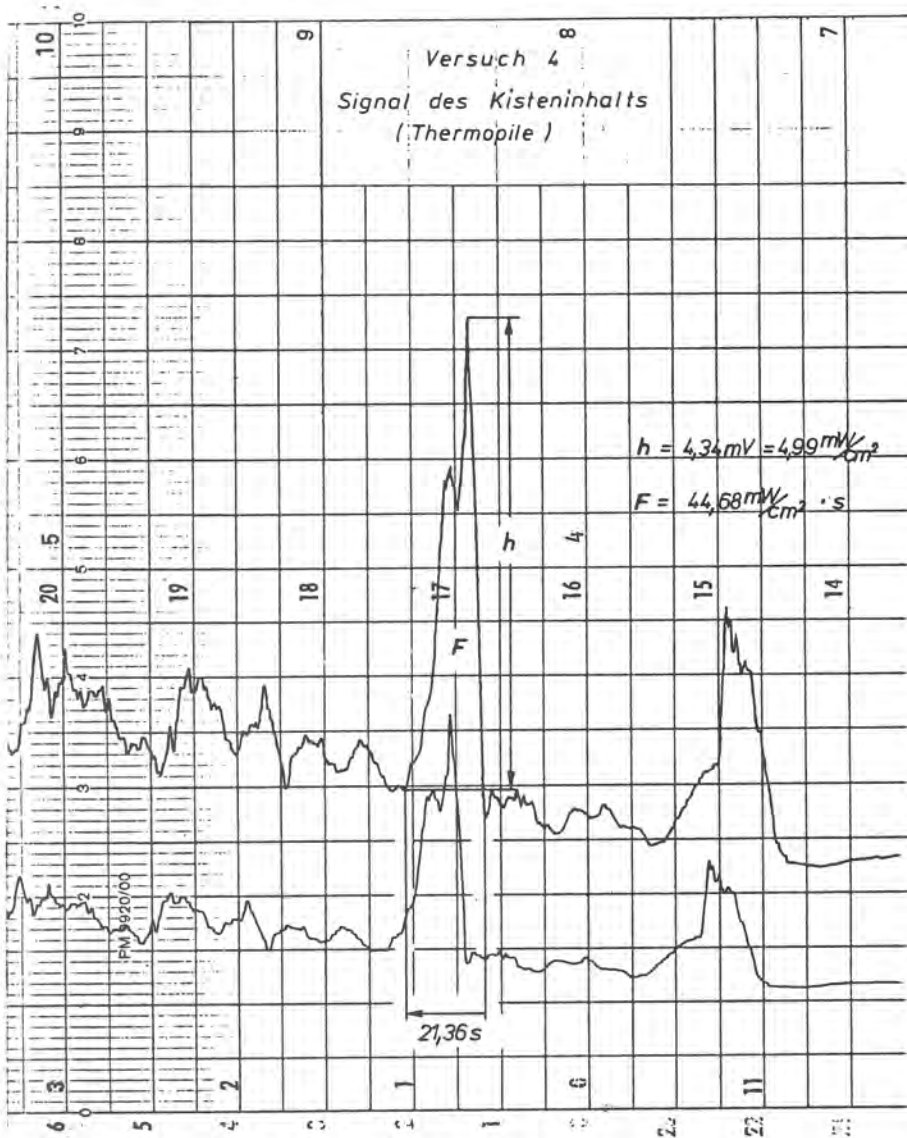


Abbildung 22

Versuch_03

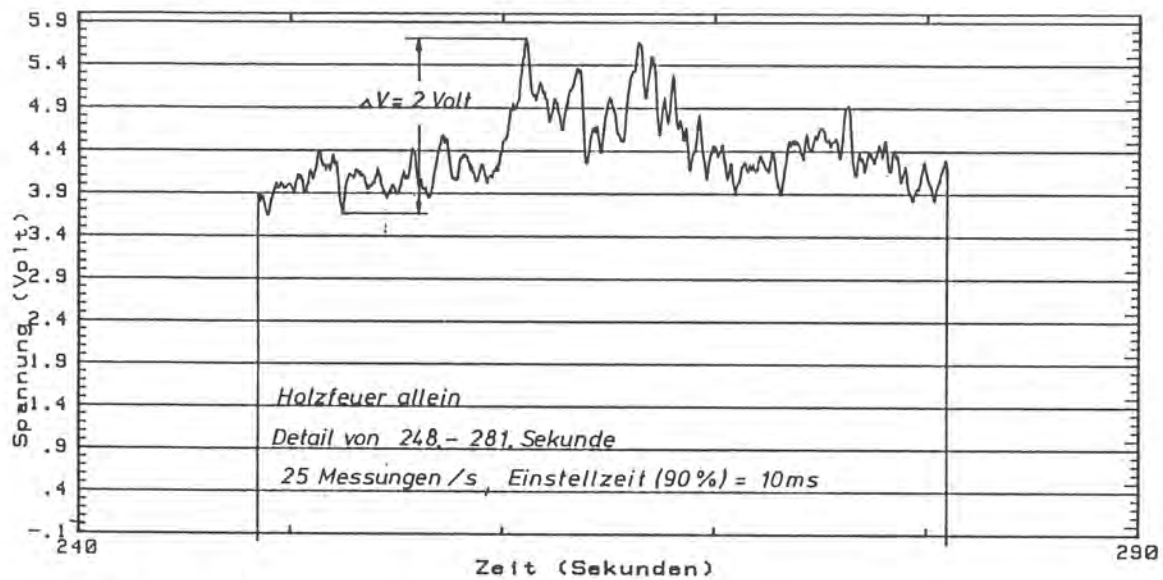


Abbildung 23

Teil V. Vergleichende Betrachtungen

N. Pfeil

1. Einleitung

In den voranstehenden Teilen dieses Berichtes wurden Ergebnisse von Brand- und Explosionsversuchen in verschiedenen Maßstäben und Versuchsanordnungen zusammengestellt und diskutiert. Die Gründe für die Wahl der entsprechenden Versuchsbedingungen sind dort im einzelnen angegeben. Die Situation in der betrieblichen Praxis ist insofern ähnlich, als die Bedingungen, unter denen explosionsgefährliche Stoffe zu einer ungewollten Reaktion kommen können, von Fabrik zu Fabrik, aber auch zwischen einzelnen Fertigungen sehr verschieden sind, bedingt durch stoffliche, bauliche und fertigungstechnische Unterschiede. Um so wichtiger ist es, die beobachteten Phänomene auf ihre Allgemeingültigkeit hin zu untersuchen und damit zum Verständnis der Reaktionen und der Wirkung entsprechender explosionsgefährlicher Stoffe beizutragen. Dies soll, soweit allgemeingültige Zusammenhänge aus den erhaltenen Ergebnissen ersichtlich sind, in diesem letzten Teil des Forschungsberichtes geschehen. Insbesondere werden in den Abschnitten 2, 3 und 4 die verschiedenen Druckmaxima (p_1 , p_{max} usw., vgl. auch Abschnitt 4 Seite 210), die im 1-m^3 -Stahlkasten, im Modellgebäude und im Freifeld aufgetreten sind, zusammenfassend gedeutet.

2. Deflagration unter Eigenverdämmung (Druckmaximum p_1)

Wird Schwarzpulver in loser Schüttung von unten gezündet, also mittig an der Basis des Schüttkegels, so reagiert ein Teil der gesamten Schwarzpulvermenge unter Eigenverdämmung durch äußere, noch nicht reagierende Schichten der Schwarzpulverschüttung. Der Vorgang dauert so lange, bis die Schwarzpulverschüttung durch den steigenden Innendruck aufgewirbelt wird und damit die Eigenverdämmung zusammenbricht. Diese Deflagration unter Eigenverdämmung verursacht in der Umgebung der deflagrierenden Schwarzpulverschüttung einen Druckstoß kurzer Dauer, der sowohl bei Freifeldversuchen als auch bei Versuchen in druckentlasteten Räumen verschiedener Maßstäbe gefunden wurde. Für den dazugehörigen Maximaldruck p_1 wurde bei Freifeldversuchen mit Tischplatten aus Holz die

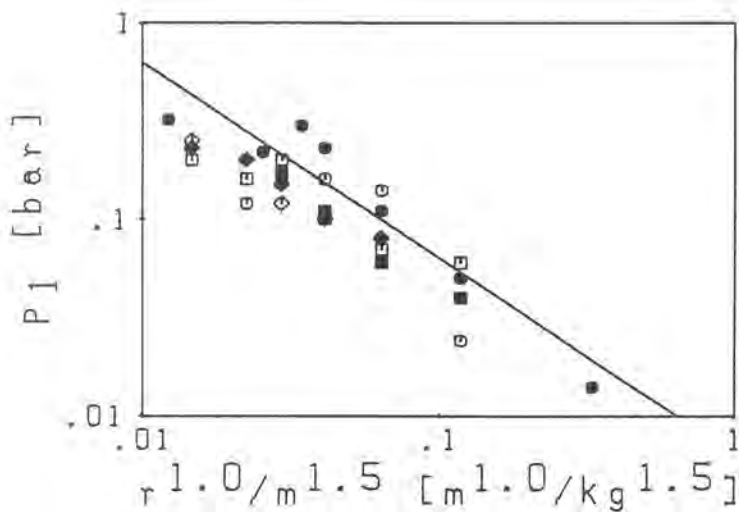


Bild 1

Maximaldrücke p_1 bei Versuchen mit Schwarzpulver in Modellgebäude im Vergleich zur Druckausbreitungsfunktion für Freifeldversuche - Tischplatte aus Holz - offener Raum \circ , Ausblasewände aus Holz \square und Kunststoffolie \diamond , leichte Dachausführung, offene und schwere Dachausführung ausgefüllte Symbole

Druckausbreitungsfunktion $p_1 = 0,0063 \cdot (m^{1,5}/r^{1,0})$ ermittelt (Teil III Abschnitt 3.1.2 Seite 144). Diese Funktion sollte in erster Näherung auch für den Maximaldruck p_1 in druckentlasteten Räumen gültig sein, da der Druckstoß mengenabhängig durch die Druckentlastung der aufbrechenden Schwarzpulverschüttung erzeugt wird und dann p_1 mit steigender Entfernung sinkt. Die Orientierung der Quarzkristalldruckaufnehmer war bei allen Versuchsreihen dieselbe (mit Ausnahme einiger Freifeldversuche auf Stahlunterlage), als Abstand r wurde die Entfernung zwischen dem Zündpunkt in der Schwarzpulverschüttung und dem Druckaufnehmer angesetzt. Für den Stahlkasten ergibt sich daher $r = 0,5$ m, für das Modellgebäude $r = 0,94$ m.

Bild 1 zeigt zunächst alle Meßwerte, die im Modellgebäude mit Tischplatten aus Holz erhalten wurden, im Vergleich zu der o. a. Druckausbreitungsfunktion. Im Rahmen der gegebenen Meßwertschwankungen ist also die aus Freifeldversuchen ermittelte Druckausbreitungsfunktion auch für das Modellgebäude gültig, und zwar sowohl für den Raum mit schwerer Dachausführung als auch für den mit leichter Dachausführung und für Versuche in offenen Räumen in gleicher Weise wie für Versuche in Räumen mit Ausblasewänden aus Holz oder Kunststoffolie. Übereinstimmende Ergebnisse liefern auch alle neueren Versuche mit Schwarzpulver auf Stahlunterlage; im Freifeld, im 1-m³-Stahl-

kasten und ein Versuch im Modellgebäude (Bild 2). Allerdings weicht die Druckausbreitungsfunktion $p_1 = 0,011 \cdot m^{1,8}/r^{1,3}$ von der für Versuche mit Schwarzpulver auf Tischplatten aus Holz ab, und zwar errechnet man mit den entsprechenden Mengen und Abständen aus der Druckausbreitungsfunktion für die Stahlunterlage etwa 2 bis 3,5 mal größere Drücke als für Tischplatten aus Holz. Diese Auswirkung der starren und widerstandsfähigen Stahlunterlage gegenüber den Tischplatten aus Holz überrascht nicht, wenn einerseits die stark vereinfachenden Annahmen bei der allgemeinen Ableitung der Druckausbreitungsfunktion - Explosivstoffkugel und sphärische Druckausbreitung - und andererseits die bekannten Unterschiede in den Druckausbreitungsfunktionen von kugel- und halbkugelförmigen Explosivstoffladungen [44] berücksichtigt werden.

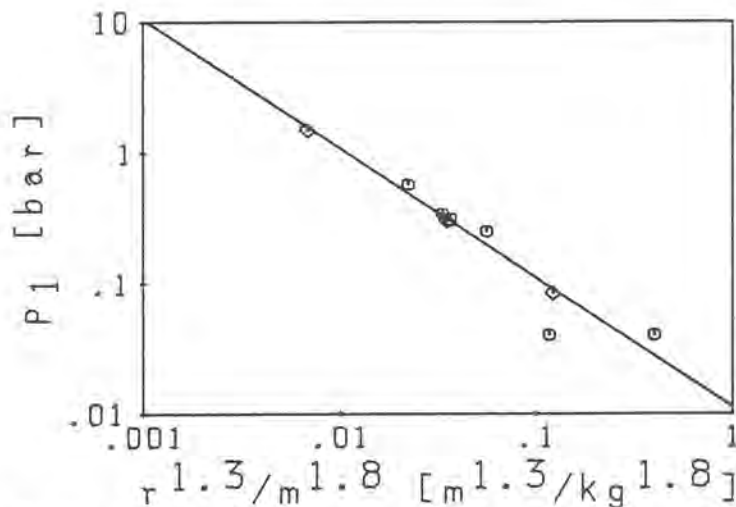


Bild 2

Maximaldrücke p_1 bei Versuchen mit Schwarzpulver auf Stahlunterlage - Freifeldversuche ◇, 1-m³-Stahlkasten ○, Modellgebäude □

Zur Zeit nicht geklärt werden kann eine Erscheinung, auf die kurz hingewiesen werden soll. Im Gegensatz zu den oben zitierten neueren Messungen im 1-m³-Stahlkasten ergaben die ersten Messungen (mit einer anderen Schwarzpulvercharge gleicher Zusammensetzung) eine stark abweichende Mengenabhängigkeit des Maximaldruckes $p_1 \sim m^{3,7}$, gemeinsam für die 10 %- und die 17 %-Öffnung. Es ist nicht völlig ausgeschlossen, daß dieses Ergebnis zufällig ist, wobei an die erheblichen Standardabweichungen des Druckes p_1 besonders bei größeren Schwarzpulvermengen erinnert wird (Tabelle 1, Teil II Abschnitt 3.1.1) und an die Tatsache, daß die Parameter der

Ausgleichfunktion für den Maximaldruck p_{\max} (aufgewirbeltes Schwarzpulver) bei der 10-%-Öffnung aus der allgemeinen Abhängigkeit von der relativen Öffnung herausfielen und sich sinnvolle Werte erst durch Berücksichtigung anderer Versuchsergebnisse ergaben (Teil II Abschnitt 3.1.5). Ebenso gut ist aber auch möglich, daß hier Stoffeigenschaften des Schwarzpulvers eine Rolle spielen, die im Rahmen der üblichen Charakterisierung durch Zusammensetzung, Korngröße, Dichte und Oberflächenbeschaffenheit variieren und z. B. eine stark abweichende Mengenabhängigkeit des Innendruckes verursachen könnten.

Das hier diskutierte Druckmaximum p_1 wurde eingangs als Druckstoß kurzer Dauer bezeichnet. Es muß darauf hingewiesen werden, daß die tatsächliche Dauer des Druckstoßes nur in den Fällen genau angegeben werden kann, in denen keine Überlagerung mit der Druckwirkung des aufgewirbelten Schwarzpulvers auftritt. Die Druckanstiegszeiten t_1 lagen etwa zwischen 2 ms und 8 ms, wobei die kürzesten Zeiten im allgemeinen bei Freifeldversuchen und die längsten im kleinsten untersuchten Raum, im 1-m³-Stahlkasten, gefunden wurden. In erster Näherung ist als Dauer dieses Druckstoßes vom ersten Ansteigen des Druckes bis zum Absinken auf Umgebungsdruck die doppelte Zeit anzusetzen.

3. Deflagration im aufgewirbelten Zustand

Die im vorangehenden Abschnitt benutzte Bezeichnung "aufgewirbeltes Schwarzpulver" meint einen Zustand dieses Stoffes, der verschieden von dem in der noch "ruhenden" Schüttung unter Eigenverdämmung reagierenden Schwarzpulver ist. Grad und Gleichmäßigkeit der Verteilung des Schwarzpulvers in der Wolke können nicht angegeben werden. Dem Druckmaximum p_1 , verursacht durch die Deflagration von Schwarzpulver unter Eigenverdämmung, folgt im Druck-Zeit-Verlauf im allgemeinen ein Druckmaximum p_{\max} , welches auf eben dieses aufgewirbelte Schwarzpulver zurückzuführen ist.

Da das Druckmaximum p_{\max} bei Versuchen mit freier Druckentlastungsfläche sowohl im 1-m³-Stahlkasten als auch im Modellgebäude, im Versuchsbunker und auch im Freifeld gefun-

den wurde, soll versucht werden, eine allgemeine Beziehung für diesen Maximaldruck in Abhängigkeit von der Schwarzpulvermenge, dem Volumen des jeweiligen Raumes und der Druckentlastungsfläche abzuleiten.

Es ist aber nur bei einer bestimmten Schwarzpulvermenge (4 kg) bekannt, wieviel Schwarzpulver in der ruhenden Schüttung und wieviel aufgewirbelt reagiert, deshalb wird im folgenden ausschließlich empirisch vorgegangen. Die Tabelle 1 enthält die dafür erforderlichen Daten aus den Teilen I bis III dieses Berichtes. Die Freifeldversuche können in die Betrachtung nicht einbezogen werden, da für sie Volumen und Druckentlastungsfläche des umgebenden "Raumes" nicht definiert sind. Ebenfalls unberücksichtigt bleiben Versuchsergebnisse, die im Rahmen eines anderen Forschungsvorhabens [31] an einem zylindrischen Stahlgefäß ($V = 0,0018 \text{ m}^3$, $F = 0,0113 \text{ m}^2$) mit Schwarzpulvermengen von 0,05 bis 0,3 kg erhalten wurden. Diesen Mengen entsprechen Ladedichten von

Tabelle 1

Vergleich der Ausgleichsfunktionen $p_{\max} = a \cdot m^b$ für die Maximaldrücke p_{\max} in Abhängigkeit von der Schwarzpulvermenge m in verschiedenen Räumen, die durch Volumen V und freie relative Öffnung F_{rel} bzw. Druckentlastungsfläche F charakterisiert sind

Bezeichnung des Raumes	V [m ³]	F _{rel} [%]	F [m ²]	experimentell		berechnet	
				a	b	a Gl.(3)	b Gl.(4)
1-m ³ -Stahlkasten	1,0	0	0	2,9	0,87	3,5/2,9*	0,9/1,1*
		1	0,051	1,9	1,2	2,0	1,2
		4	0,24	0,42	1,5	0,36	1,5
		10	0,57	0,10	1,8	0,10	1,8
		17	0,98	0,037	2,1	0,042	2,1
Modellgeb. schweres Dach,	21	21	7,6	0,029	1,1	0,0094	1,6
Modellgeb. leichtes Dach,	13	12	4,0	0,014	1,6	0,019	1,6
Versuchsbunker	190	3	7,0	0,014	1,2	0,013	1,1

* fiktive Druckentlastungsfläche $F = 0,023 \text{ m}^2$

28 bis 168 kg/m³, wobei das Schwarzpulver bis zu etwa 21 % des Reaktionsvolumens einnimmt und damit nicht als aufgewirbelt angesehen werden kann, wie es bei den anderen Versuchsreihen der Fall ist, bei denen das Eigenvolumen des Schwarzpulvers immer unter 1 % des Reaktionsvolumens blieb. Zur Tabelle 1 ist vorweg noch zu bemerken, daß die Parameter der Ausgleichsfunktion für die 10-%-Öffnung über alle Versuche mit dieser Öffnung, also auch mit Ausblasewänden aus Holz und Kunststoffolie, ermittelt wurden (vgl. Teil II Abschnitt 3.1.5). Ferner sind für den Raum des Modellgebäudes mit leichter Dachausführung Volumen und Druckentlastungsfläche nicht eindeutig definiert. Bezieht man die Dachfläche mit ein, so ist $F = 8 \text{ m}^2$, und betrachtet man den gesamten Raum zwischen den Widerstandswänden, so ist $V \approx 27 \text{ m}^3$ und $F \approx 15 \text{ m}^2$. In der Tabelle sind aber nur die Voraussetzungen eingetragen, mit denen die am besten vergleichbaren Ergebnisse erzielt wurden.

Für die empirische Ableitung der Vorzahl a in den angegebenen Ausgleichsfunktionen $p_{\max} = a \cdot m^b$ wird von folgender Überlegung ausgegangen:

$$a = \frac{K}{V \cdot k} \quad (1),$$

wobei K eine Stoffkonstante und V das Reaktionsvolumen ist und ferner k die Tatsache berücksichtigt, daß a mit steigender Druckentlastungsfläche F kleiner wird.

K kann durch Druckmessungen in geschlossenen Behältnissen bestimmt werden. Da der geschlossene 1-m³-Stahlkasten streng genommen nicht gasdicht ist, werden die Ergebnisse der Druckmessungen im 6-1-Stahlrohr herangezogen ($K = 3,5 \text{ bar kg}^{-1} \text{ m}^3$ für das hier betrachtete Standardschwarzpulver).

Der von der Druckentlastungsfläche F abhängige Faktor k muß die Randbedingung $k = 1$ für $F = 0$ erfüllen (geschlossenes Behältnis). Ferner zeigt sich, daß k nicht nur von F allein, sondern ebenfalls von V abhängen muß. Somit ist eine geeignete Funktion $k - 1 = f(F, V)$ zu finden. Aus den experimentell ermittelten Vorzahlen a für den 1-m³-Stahlkasten ($V = \text{konst.}$) wird mit Gleichung (1) das jeweilige k und dann zunächst der Einfluß der Fläche ermittelt; es ergibt sich $k - 1 = 85,3 \cdot F^{1,58}$ (ohne 0-%-Öffnung). Damit läßt sich nun für die verschiedenen untersuchten Räume der Einfluß des Volumens be-

stimmen: $(k-1)/F^{1,58} = 80,7 \cdot V^{-1,68}$. Die Beträge der Exponenten von Fläche und Volumen können hier als gleich angesehen werden, übereinstimmend mit der zeitlichen Druckänderung dp/dt , die in einem unter Überdruck stehenden Behälter des Volumens V auftritt, wenn Gas durch eine Düse des Querschnitts F in die Umgebung ausströmt und die proportional F/V ist [32].

Bestimmt man nun die Funktion $k - 1 = f(F/V)$ mit gemeinsamem Exponenten für Fläche und Volumen nur für den 1-m³-Stahlkasten, da wegen der Zahl der durchgeführten Versuche für diesen die zuverlässigsten Ergebnisse vorliegen, so ergeben sich wegen $V = 1,0 \text{ m}^3$ die oben für $k - 1 = f(F)$ angegebenen Parameter. Mit

$$k - 1 = 85 \cdot \left(\frac{F}{V}\right)^{1,6} \quad (2)$$

(gerundete Exponenten, vergl. Bild 3) folgt für die Vorzahl a einer allgemeinen Beziehung $p_{\max} = a \cdot m^b$ aus (1)

$$a = \frac{K}{V(1 + 85\left(\frac{F}{V}\right)^{1,6})} \quad (3).$$

Gleichung (2) ermöglicht ferner, dem "geschlossenen" Stahlkasten (0-%-Öffnung) eine fiktive Druckentlastungsfläche zuzuordnen, unabhängig davon, ob die gegenüber dem 6-l-Stahlrohr verminderten Maximaldrücke durch Undichtigkeiten oder größere Wärmeverluste oder andere Effekte verursacht sind. Aus $k = 1,2$ nach Gleichung (1) folgt $F = 0,023 \text{ m}^2$ (bzw. 230 cm^2); dies entspräche etwa einer Undichtigkeit, die durch einen 5 mm breiten Spalt am Rand der Frontplatte entsteht. Diese Fläche darf aber keinesfalls als real angesehen werden, weil sie - wie im folgenden gezeigt wird - zwar durch die Vorzahl, nicht aber durch den Exponenten der Masse in der abgeleiteten Beziehung begründet ist und sie sich außerdem nicht auf die anderen untersuchten Räume übertragen läßt.

Für den Exponenten in der Beziehung $p = a \cdot m^b$ gilt die Randbedingung $b = 0,9$ für $F = 0$ (vergl. Teil III Abschnitt 2.2.1, Versuche mit Schwarzpulver im 6-l-Stahlrohr). Darüberhinaus ist auch b sowohl von F als auch von V abhängig. Entsprechend dem Vorgehen bei der empirischen Ableitung einer allgemeinen Formulierung für die Vorzahl a wird zunächst der Exponent der Fläche in der Funktion $b-0,9 = f(F, V)$ für den Stahlkasten

($V = \text{konst.}$) ermittelt: $b - 0,9 = 1,19 \cdot F^{0,47}$ ($F^{0,47}$ ist fast genau \sqrt{F} ; ob dies physikalisch bedingt ist, kann hier nicht entschieden werden). Damit folgt für die verschiedenen untersuchten Räume $(b - 0,9)/F^{0,47} = 0,90 V^{-0,47}$. Auch hier gehen Fläche und Volumen mit Exponenten gleichen Betrages ein, für den Stahlkasten (vgl. Bild 4) ist daher mit gerundeten Exponenten

$$b - 0,9 = 1,2 \cdot \left(\frac{F}{V}\right)^{0,5} \quad (4).$$

Die gesamte Funktion lautet also

$$p_{\max} = \frac{K}{V(1+85\left(\frac{F}{V}\right)^{1,6})} \cdot m(0,9+1,2\left(\frac{F}{V}\right)^{0,5}) \quad (5).$$

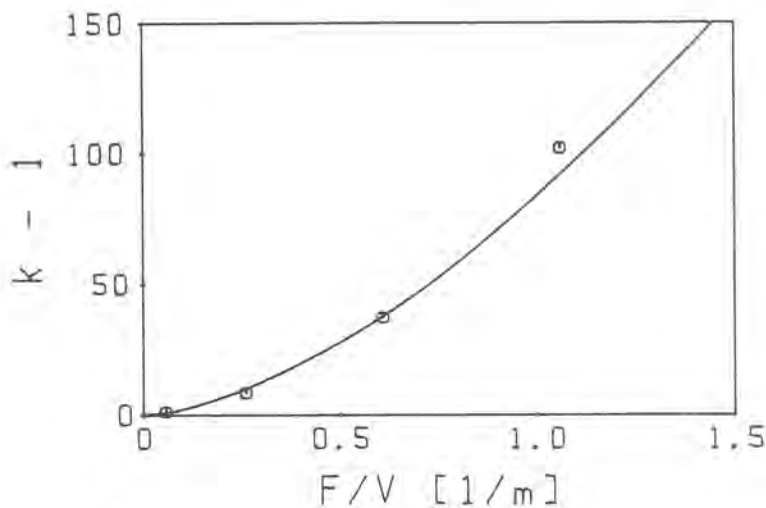


Bild 3

Abhängigkeit der Faktoren k aus der Vorzahl a der Funktion $p_{\max} = a \cdot m^b$ vom Quotienten F/V

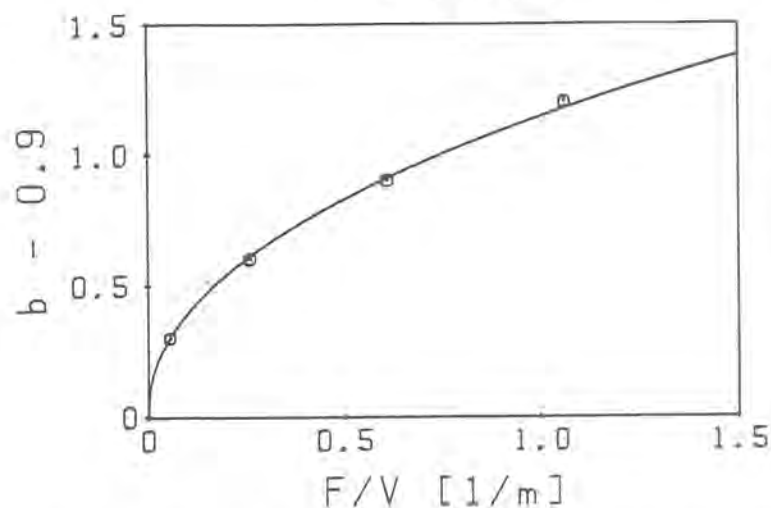


Bild 4

Abhängigkeit des Exponenten b der Funktion $p_{\max} = a \cdot m^b$ vom Quotienten F/V

Die berechneten Parameter a und b der Gleichung (5) sind in Tabelle 1 den experimentell ermittelten gegenübergestellt. Zwangsläufig ist für den $1-m^3$ -Stahlkasten eine gute Übereinstimmung festzustellen, sofern für die Berechnung des Parameters a der 0-%-Öffnung die fiktive Druckentlastungsfläche eingesetzt wird. Für die anderen Räume ist die Übereinstimmung

mehr oder minder gut, wobei darauf hinzuweisen ist, daß im Falle des Modellgebäudes beim Raum mit schwerer Dachausführung der zu kleine Parameter a im untersuchten Bereich von dem zu großen Parameter b teilweise kompensiert wird und beim Raum mit leichter Dachausführung die Festlegung von Fläche und Volumen problematisch ist. Berücksichtigt man aber die Tatsache, daß die Parameter a und b in diesen Fällen wegen der beschränkten Zahl von Messungen - besonders bei größeren Schwarzpulvermengen - nur bedingt zuverlässig sind, so ist mit Gleichung (5) eine allgemeine Beziehung für eine grobe Abschätzung des Druckes p_{max} in Räumen mit freien Druckentlastungsöffnungen gegeben. Voraussetzung ist aber, daß der betrachtete Stoff die gleiche oder zumindest eine sehr ähnliche Druckanstiegsgeschwindigkeit hat wie das untersuchte Standardschwarzpulver. Wie der Einfluß der Druckanstiegsgeschwindigkeit in einer Funktion wie Gleichung (5) zu berücksichtigen ist, kann erst geklärt werden, wenn ausreichend Messungen mit Stoffen anderer Druckanstiegsgeschwindigkeiten durchgeführt worden sind. Einem abweichenden Maximaldruck im geschlossenen Behältnis aufgrund anderer thermochemischer Eigenschaften (Zusammensetzung) eines Stoffes kann bereits jetzt durch Bestimmung der Stoffkonstante K Rechnung getragen werden. Auf diese Weise ist es auch jetzt bereits möglich, eine sicherheitstechnische Abschätzung durchzuführen, sofern nur sichergestellt ist, daß der fragliche Stoff eine geringere Druckanstiegsgeschwindigkeit hat als das hier untersuchte Schwarzpulver und somit die abgeschätzten Drücke p_{max} größer sind als die tatsächlich möglichen.

4. Deflagration in Räumen mit Ausblasewänden

Vergleicht man die Druckkurven, die bei Versuchen in Räumen mit Ausblasewänden aus Holz oder aus Kunststoffolie erhalten wurden, so stellt man fest, daß bei der Deflagration von Schwarzpulver insgesamt drei verschiedenartige Druckmaxima zu betrachten sind, die aber bisher nur in Kombination von jeweils zwei Maxima gefunden wurden. Das Maximum p_1 tritt auf, wenn eine Schwarzpulverschüttung von unten gezündet wird und ist von der Reaktion des Schwarzpulvers unter Eigenverdämmung verursacht (Seite 16). Das Maximum $p_{max,1}$ ist auf den Druckentlastungsvorgang durch die Ausblasewände zurückzuführen

(Seite 30). Das bis dahin noch nicht umgesetzte, nicht unter Eigenverdämmung reagierende Schwarzpulver führt dann zu einem Druckmaximum $p_{max,2}$, welches bei Messungen in Räumen mit freien Ausblaseflächen nur p_{max} genannt wurde.

Zum Maximum p_1 bleibt an dieser Stelle nur zu bemerken, daß es in kleinen Räumen (1-m³-Stahlkasten) anscheinend mit $p_{max,1}$ zusammenfällt, so daß dort nur $p_{max,1}$ und $p_{max,2}$ gefunden werden (Spanplatte und Kunststoffolie, Seite 76 und 81). Im Modellgebäude wiederum treten p_1 und $p_{max,1}$ (im Teil I nur p_{max} genannt) getrennt auf; offensichtlich spielen die Zeiten, in denen sich der jeweilige Druck im Raum verteilen kann, hierfür eine entscheidende Rolle. Dafür wurde im Modellgebäude, mit einer Ausnahme, kein Druckmaximum $p_{max,2}$ neben $p_{max,1}$ gefunden, d. h. daß wegen der Menge-Volumen-Relation sich das gesamte Schwarzpulver während der Zeit der Druckentlastung durch die Ausblasewand umgesetzt haben muß. Die Ausnahme sind die Versuche mit Schwarzpulver auf Horden, bei denen die langsamere Umsetzung und die wesentlich größeren Mengen (bis 70 kg) zur Ausbildung eines Maximums $p_{max,2}$ führten (Seite 30). Wegen der Anordnung des Schwarzpulvers auf Horden trat dafür kein Druckmaximum p_1 auf.

Allgemein ist festzustellen, daß sich die Mengenabhängigkeit des Druckmaximums $p_{max,1}$ grundsätzlich durch eine Ausgleichsgerade beschreiben läßt, oft ebenso gut wie durch eine Potenzfunktion (vgl. z. B. Seite 79 Bild 12). In den meisten Fällen ergibt sich dabei ein Ordinatenabschnitt der Ausgleichsgeraden, der sich als statische Belastbarkeit der Ausblasewand (Berstdruck oder Entlastungsdruck) verstehen läßt. Da die Druckentlastung (sowohl das Bersten oder Nachgeben der Ausblasewand als auch die Druckentwicklung und das Abströmen der Schwaden) ein dynamischer Vorgang ist, überschreitet $p_{max,1}$ im allgemeinen diese statische Belastbarkeit der Ausblasewand. Der Anstieg der Ausgleichsgeraden $p_{max,1} = f(m)$ ist dabei um so größer, je größer die statische Belastbarkeit der Ausblasewand und die Umsetzungsgeschwindigkeit ist; dies ist der Grund für die sicherheitstechnisch selbstverständlichen Maßnahmen, eine Ausblasewand möglichst leicht zu bauen und explosionsgefährliche Stoffe derart aufzubewahren bzw. anzuordnen, daß ihre Umsetzungsgeschwindigkeit möglichst gering ist.

Im einzelnen hat sich folgendes ergeben. Im 1-m³-Stahlkasten ist die statische Belastbarkeit der Ausblasewand aus Holz des Typs I (Gewindebolzen und Flügelmuttern, vgl. Seite 77 Bild 11) etwa 0,15 bar, gefunden bei zwei Meßreihen, die zu unterschiedlichen Anstiegen der Ausgleichsgeraden, aber zu entsprechenden Ordinatenabschnitten führten (Seite 79 Bild 12). Wurden die Spanplatten nicht festgeschraubt, sondern nur auf die Befestigungsbolzen aufgesteckt, so verschwand folgerichtig der Ordinatenabschnitt, d. h. die Druckentlastung setzte praktisch bei 0 bar Überdruck ein; dieses Ergebnis wird noch für die Betrachtung des Modellgebäudes wichtig werden.

Die Ausblasewand des Typs II (mit Holzschrauben befestigt) führte zu einem geringeren Ordinatenabschnitt (0,05 bar) und auch zu einem geringen Anstieg der Ausgleichsgeraden $p_{max,1} = f(m)$ (vgl. Teil II, wie oben). Völlig in Übereinstimmung sind damit die Ergebnisse, die mit Zündschnurpulver und Feuerwerksternen erhalten wurden. Aufgrund der langsamen Umsetzung dieser Sätze ergab sich jeweils mengenunabhängig für $p_{max,1}$ die statische Belastbarkeit von $0,06 \pm 0,01$ bar (Seite 92 und 94). Die Versuche mit Kaliumperchlorat-Aluminium-Knallsatz ergaben einen wesentlich steileren Anstieg der Ausgleichsgeraden, damit zusammenhängend wird der geringe Ordinatenabschnitt (0,01 bar für die Ausblasewand des Typs I, Seite 96) aufgrund der wenigen Meßwerte nicht für hinreichend aussagekräftig gehalten.

Am Modellgebäude sind die Verhältnisse wesentlich komplizierter. Die Türen in den Ausblasewänden der Typen I und III (Beschreibung der Typen in Teil I Abschnitt 3.1.1.2 und 3.2.1.1) könnten die Ursache dafür sein, daß die Druckentlastung im Raum mit schwerer Dachausführung praktisch bei 0 bar Überdruck einsetzt (Seite 24, siehe auch oben). Mit dem Typ II (ohne Tür) wurden nur zwei vergleichbare Messungen durchgeführt. Allerdings wurde mit der langsameren Reaktion des Schwarzpulvers auf Horden (Typ I) nur ein sehr geringer Anstieg von $p_{max,1}$ mit der Menge erhalten und dafür ein Ordinatenabschnitt in der Größenordnung der am Stahlkasten gefundenen Werte (0,18 bar, Seite 31). Im Raum mit leichter Dachausführung ergab sich für die Typen I und II sogar 0,32 bar Ordina-

natenabschnitt, möglicherweise ist hier $p_{\max,1}$ zusätzlich durch einen Druckstau wegen des nach vorn abfallenden Daches und des Betonbalkens an der Vorderseite des Raumes beeinflusst. Andererseits haben Versuche mit Leuchtsätzen und Ausblasewänden des Typs II zu Druckentlastung ab etwa 0,06 bar (Seite 53) geführt, übereinstimmend mit dem Wert für den 1-m³-Stahlkasten. Mengunenabhängige Werte wurden bei den Versuchen mit Feuerwerkssternen gefunden (Raum mit schwerer Dachausführung, Ausblasewand Typ III, durchschnittlich 0,01 bar mit roten und 0,06 bar mit silbernen Sternen, Seite 66), aber verschieden für die beiden Sternsorten und abhängig von der Umsetzungsgeschwindigkeit wegen der Dynamik des Druckentlastungsvorganges. Allgemeinere Angaben lassen sich wegen der Komplexheit der Vorgänge und wegen der teilweise nur geringen Zahl an Meßwerten noch nicht machen. Ergänzende Versuche sind beabsichtigt.

Anders als bei den Ausblasewänden aus Holz, die im Modellgebäude aus einzelnen Platten bestanden oder Türen hatten, entspricht der Aufbau der Ausblasewand aus Kunststoffolie am 1-m³-Stahlkasten genau dem am Modellgebäude, d. h. mit dem Volumen des Versuchsraumes steigt auch die Fläche der Kunststoffolie (Teil I Abschnitt 3.1.1.3 und Teil II Abschnitt 3.1.3).

Als Sicherheitsmembran im Sinne einer Brechsicherung [35] ist die untersuchte Gitterfolie nur in der Einspannung anzusehen, die am 6-l-Stahlrohr gegeben war; für kreisförmige Membranen aus zähem, verformungsfähigen Werkstoff wird dann der Berstdruck als umgekehrt proportional zum Durchmesser angesehen (für spröde, nicht verformungsfähige Werkstoffe als proportional zur Fläche). Im 6-l-Stahlrohr entlastete die Folie mit 0,8 dm² Fläche bei etwa 2 bar durch Aufplatzen.

Am Stahlkasten und am Modellgebäude hingegen wurden die Folien durch den Innendruck lediglich vom Rahmen gerissen, nur selten traten einzelne Risse auf, die weiter in die eigentliche Folienfläche hineinreichten. Bei einer mit dem 6-l-Stahlrohr vergleichbaren Einspannung hätten die statischen Berstdrucke $p_{\max,1}$ in der Größenordnung 0,2 bar (1-m³-Stahlkasten) und 0,06 bar (Modellgebäude, Raum mit schwerer Dachausführung) liegen müssen. Aus den Ausgleichsgeraden $p_{\max,1} = f(m)$ für

Schwarzpulver ergaben sich die Ordinatenabschnitte 0,04 bar (Seite 81) und 0,02 bar (Tabellenwerte Seite 28). Eine Abschätzung nach [35] liegt somit auf der sicherheitstechnisch günstigen Seite. Am Raum mit leichter Dachausführung wurden die Druckwerte $p_{max,1}$ nur für zwei Schwarzpulvermengen ermittelt, die Ergebnisse decken sich mit dem hohen Ordinatenabschnitt, der mit Ausblasewänden aus Holz gefunden wurde. Ferner wird noch einmal auf Bild 29 im Teil I hingewiesen, das deutlich macht, wie geringfügig Ausblasewände aus Kunststoffolien die Druckentlastung gegenüber der freien Ausblasefläche beeinflussen. Damit sind Kunststoffolienwände den Ausblasewänden aus festeren Baustoffen wie z. B. Holz in den Fällen vorzuziehen, in denen kein besonderer Schutz des Raumes vor äußeren Einwirkungen erforderlich ist. Im übrigen gefährden Kunststoffolienwände bei Druckentlastung wegen der ungefährlicheren Wurfstücke auch die Umgebung weniger als beispielsweise Holzwände.

Das Druckmaximum $p_{max,2}$ kann nicht wie das Druckmaximum p_{max} in Räumen mit freier Ausblasefläche allgemein behandelt werden (vgl. Abschnitt 3.), da die Zahl der Meßwerte im Modellgebäude zu gering ist (es liegen nur zwei Meßwerte für Schwarzpulver auf Horden vor). Es bleibt also nur, daran zu erinnern, daß sich $p_{max,2}$ im 1-m³-Stahlkasten mit 10-%-Öffnung als in erster Näherung unabhängig von der Art der Ausblasewand gezeigt hat (offen, Holz, Kunststoffolie; vgl. Seite 90 Bild 26 und Abschnitt 3.1.5 in Teil II). Dies weist deutlich darauf hin, daß in dem kleinen Volumen des 1-m³-Stahlkastens nur ein kleiner Teil des Schwarzpulvers an der Bildung des Druckmaximums beteiligt ist, das auf die Druckentlastung durch die Ausblasewand zurückzuführen ist und mit der Druckentlastung durch die Schwarzpulverschüttung zusammenfällt ($p_1, p_{max,1}$). Im Modellgebäude ist die Situation umgekehrt, so daß $p_{max,2}$ nur bei großen Schwarzpulvermengen oder als entsprechendes Druckmaximum bei den Versuchen mit anderen pyrotechnischen Sätzen auftritt.

5. Mengenabhängiges Verhalten und Stoffeigenschaften

In diesem Abschnitt soll noch einmal auf Phänomene eingegangen werden, die im Rahmen der vorliegenden Untersuchungen nur bei einigen Stoffen sichtbar geworden sind, die aber wegen ihrer Mengenabhängigkeit von großer sicherheitstechnischer Bedeutung sind. Dies ist die mehr oder minder sprunghafte Änderung des Reaktionsmechanismus bzw. der Umsetzungsgeschwindigkeit eines explosionsgefährlichen Stoffes ab einer bestimmten Menge, einer sogenannten Grenzladung, die in Teil II (siehe Seite 97) bereits entsprechend definiert wurde. Diese Grenzladung ist außer von den chemischen und physikalischen Eigenschaften des Stoffes noch von äußeren Bedingungen, z. B. Einschluß, Anordnung, Zündort und natürlich auch Art der Zündung, abhängig. Sie muß aber auch nicht zwangsläufig bei jedem Stoff auftreten, sofern nur eine entsprechend große Menge überschritten wird. Überhaupt sind im Unterschied zum Phänomen der kritischen Masse bei der Kernspaltung, oberhalb derer es zu einer Kettenreaktion kommt, die physikalisch-chemischen Ursachen eines sprunghaften Mechanismuswechsels bei Explosivstoffen, wie z. B. der Übergang von einer Deflagration in eine Detonation, nicht ausreichend bekannt. So kann hier nur zur Kenntnis genommen werden, daß sich beispielsweise das untersuchte Schwarzpulver bis zu einer Menge von 100 kg unter gleichbleibenden Versuchsbedingungen (Untenzündung, Eigenverdämmung) auch gleichbleibend verhält, während Knallsätze (Kaliumperchlorat-Aluminium bei etwa 0,1 kg (Seite 95) und Schwarzpulver-Aluminium bei etwa 3 kg (Seite 115), jeweils unter Eigenverdämmung) aber auch ein weißer Leuchtsatz (bei etwa 10 kg in einer Papptrommel, Seite 53) das oben diskutierte Phänomen einer sprunghaften Änderung ihrer explosiven Eigenschaften zeigen. Auf die Ergebnisse älterer Untersuchungen [36] sei hier nur hingewiesen. Ebenso ist bekannt, daß pyrotechnische Sätze (wie z. B. die roten, chlorathaltigen Feuerwerkssterne) unter bestimmten Bedingungen sogar detonieren können; und aus diesem Grund wurden die Versuche mit Feuerwerkssternen unter möglichst praxisnahen Bedingungen durchgeführt, damit für die betriebliche Praxis sichergestellt ist, daß die Feuerwerkssterne bei der Trocknung im Falle einer Zündung nicht entsprechend heftig reagieren, mit anderen Worten, daß die Grenzladung nicht überschritten wird.

Damit wird aber auch klar, welche sicherheitstechnische und wirtschaftliche Bedeutung hinter der Frage steht, ob ein Stoff in der betrieblichen Situation detonieren, deflagrieren oder nur abbrennen kann. Das Brand- und Explosionsverhalten bestimmt entscheidend die Gruppeneinteilung von Explosivstoffen bzw. pyrotechnischen Sätzen und Gegenständen nach den UVV'en 46a und 46k mit [5,13]. Die Beispielsammlung zu diesen Gruppeneinteilungen basieren auf Erfahrungen beim Umgang mit den Stoffen und aus Unfällen, auf speziellen Versuchen z. B. zur Ermittlung des Verhaltens größerer Mengen pyrotechnischer Sätze nach thermischer Zündung [36] und auf sicherheitstechnischen Kenndaten [37]. Diese sicherheitstechnischen Kenndaten sind abgesehen von weiteren explosionsfähigen Stoffen in einer zusammenfassenden Arbeit veröffentlicht worden [38] und werden ferner speziell für die pyrotechnischen Sätze ermittelt, deren Gruppeneinteilung strittig ist. Die Bewertung der sicherheitstechnischen Kenndaten wird nach einem an pyrotechnischen Sätzen einschließlich binärer Modellmischungen erprobten Verfahren [39] vorgenommen. Eine derart ermittelte Wertzahl für den Gefährlichkeitsgrad läßt sich direkt einer Gruppe der UVV 46k zuordnen. Nun wird für die Gruppeneinteilung jedoch nicht nur die mögliche Wirkung im Explosionsfall berücksichtigt, sondern ebenso die Empfindlichkeit der Stoffe (Auslösewahrscheinlichkeit).

Für die Druckauslegung eines Gebäudes oder Raumes, der gegenüber der Explosionswirkung einer bestimmten Menge Explosivstoffes widerstandsfähig sein soll, bzw. für die entsprechende Mengenbegrenzung bei gegebener Bauweise ist jedoch nur die Wirkung entscheidend. Die sicherheitstechnischen Kenndaten, die Wirkungsparameter liefern (Stahlhülsenverfahren, Bleiblockprüfung, Verhalten im Stahlrohr), sind aber entweder an kleinen Mengen ermittelt oder die Untersuchungsmethoden simulieren größere Mengen durch einen sehr festen Einschluß. Mit Hilfe dieser Methoden kann die größte mögliche Wirkung, z. B. durch Untersuchung der Sensibilität gegen Detonationsstoß, abgeschätzt und eine Reihenfolge relativer Gefährlichkeiten der untersuchten Stoffe aufgestellt werden. Die Methoden liefern aber nicht die für die oben angesprochene Wirkungs-Widerstandsfähigkeits-Betrachtung wünschenswerten quantitativen Parameter. Hier wäre eine Weiterführung der Untersuchungen an

pyrotechnischen Sätzen mit den im vorliegenden Bericht vorgestellten Methoden erforderlich, insbesondere

- der Messung des Druckes in reagierenden Sätzen, um das Phänomen der Grenzladung näher zu untersuchen und
- der Messung des Druckverlaufes im 1-m³-Stahlkasten und im Modellgebäude, um die hier am Schwarzpulver durchgeführten allgemeinen Betrachtungen auf andere Stoffe auszudehnen.

Auf Versuche im Modellgebäude kann verzichtet werden, wenn ausreichend Daten für verschiedene Maßstäbe gesammelt sind und wenn durch Kenntnisse an ähnlichen Stoffen die Übertragbarkeit der am 1-m³-Stahlkasten gewonnenen Ergebnisse auf andere Maßstäbe sichergestellt ist.

Im Rahmen dieser Untersuchungen könnten die sicherheitstechnischen Kenndaten pyrotechnischer Sätze gegenüber[38] aktualisiert und um die entsprechenden Parameter der Druckwirkung erweitert werden. Basis für die zu untersuchenden Mengen wären die derzeitigen Regelungen der UVV 46 k "Herstellen pyrotechnischer Gegenstände". Die Ergebnisse eines derartigen Vorhabens würden dann zwangsläufig zu einer kritischen Auseinandersetzung mit der Gruppeneinteilung dieser Unfallverhütungsvorschrift führen. Der Verband der Hersteller pyrotechnischer Gegenstände wurde auf das geschilderte Vorhaben angesprochen und zeigt sich an den zu erwartenden Ergebnissen interessiert und auch zur Zusammenarbeit hinsichtlich der Auswahl und Herstellung der pyrotechnischen Sätze bereit, da Kenntnisse gewonnen würden, die sowohl die Arbeitssicherheit erhöhen als auch eine wirtschaftlichere Produktion ermöglichen könnten. Besonders hervorgehoben sei hier, daß die an pyrotechnischen Sätzen ausgeführten Untersuchungen Modellcharakter für die Gesamtheit aller explosionsgefährlichen Stoffe besitzen.

6. Auswirkungen auf die Umgebung

Über die möglichen Auswirkungen eines Brand- oder Explosionsunfalles auf in dem betroffenen Raum befindliche Menschen bestehen keine Zweifel. Eine grundsätzliche Schutzmaßnahme ist die Forderung der UVV 46a [5], daß unabhängig von der zulässigen Höchstmenge an Explosivstoff in einem Raum nur die für den Fortgang der Arbeit notwendige Menge vorhanden sein darf. Darüberhinaus soll die Ausblasebauart bei Reihengebäuden mit Widerstandswänden zwischen den einzelnen Räumen sicherstellen, daß ein Brand oder eine Explosion in einem Raum nicht auf Nachbarräume übertragen wird.

Zur Druckauslegung dieser Widerstandswände bzw. zur Mengengrenzung bei gegebener Belastbarkeit liefert der vorliegende Bericht einen Beitrag. Unter der Voraussetzung, daß die schweren Bauteile eines Gebäudes in Ausblasebauweise (Widerstandswände) im Explosionsfall von ausreichender Festigkeit sind, bleiben die folgenden Auswirkungen auf die Umgebung des Gebäudes zu berücksichtigen:

- Druckwellen,
- Wurfstücke von Ausblaseflächen (Wände und Dächer),
Sprengstücke
- Flammen, Flugfeuer
- Wärmestrahlung

(nicht diskutiert werden Bodenerschütterungen und Schadstoffemissionen, da nicht Gegenstand der vorliegenden Untersuchungen).

Wie in den Teilen I und II des Berichtes gezeigt werden konnte, sind die Maximaldrücke in einem Raum und die Druckamplituden außerhalb des Raumes auch bis in größere Entfernungen (Schallwellen) näherungsweise miteinander in Beziehung zu setzen. Dazu wurde von einer kugelförmigen Schallausbreitung mit $p_{\max} \sim 1/r$ ausgegangen, wobei aus der Größe des betreffenden Raumes ein Radius r_0 für den dazugehörigen Druck $p_{\max,0}$

festgelegt wurde. Tatsächlich kann die Amplitude der Druckwelle im Nahbereich meist schneller abklingen als mit $1/r$ (Exponent von r größer als 1), wie z. B. bei Detonationen. Eine Druckabschätzung mit der Abstandsabhängigkeit $1/r$ liegt daher auf der Seite der höheren Drücke und ist somit aus Sicherheitstechnischer Sicht vorzuziehen. Es muß aber darauf hingewiesen werden, daß besondere topologische und meteorologische Verhältnisse speziell im Fernbereich Abweichungen von der kugelförmigen Ausbreitung bedingen werden; so sinkt z. B. die Druckamplitude einer Zylinderwelle mit $1/r^{1/2}$.

Hinsichtlich der Auswirkung von Luftstoßwellen auf Gebäude sei auf die Anlage 3 zur UVV 46a [5] verwiesen, die dort angegebenen Werte können natürlich nur Richtwerte sein. Ebenso problematisch ist es, der Schadensart Fensterscheibenbruch, die die häufigste im Fernbereich von Explosionen ist, entsprechende Maximaldrücke zuzuordnen. Obwohl es einige Veröffentlichungen über Untersuchungen an speziellen Fenstertypen gibt, ist im allgemeinen nur eine sehr grobe Angabe zur Widerstandsfähigkeit von Fensterscheiben möglich. Generell kann davon ausgegangen werden, daß Fensterscheiben mindestens der Windlast widerstehen, für die in der DIN 1055 [40] höhenabhängige Werte angegeben werden, z. B. etwa 0,01 bar in 20 m Höhe. Für physiologische Schäden am Menschen durch kurzzeitige Druckeinwirkung finden sich in der Literatur nur Werte, die sich auf Stoßwellen mit nahezu momentanen Druckanstieg beziehen. Die folgenden Schwellenwerte sind einmal für die kurze Dauer der positiven Druckphase bei Sprengstoffdetonationen (3 ms) und daneben für die längere Dauer bei nuklearen Explosionen (400 ms) angegeben [41]:

	3 ms Dauer	400 ms Dauer
Riß des Trommelfelles	0,34 bar	0,34 bar
Lungenschaden	2,6 - 3,4 bar	0,83 - 1,03 bar
Tod des Menschen	7,7 - 10,8 bar	2,6 - 3,6 bar

Im allgemeinen wird die Dauer der positiven Druckphase bei der Deflagration pyrotechnischer Sätze zwischen diesen Werten liegen, wobei der Druckanstieg allerdings wesentlich langsamer

mer als bei Detonationsstoßwellen ist. Bei verschmierten Stoßfronten mit Druckanstiegszeiten von 10 ms und mehr soll der menschliche Körper ein mehrfaches (2 - 5 faches) der bei plötzlichem Druckanstieg schädigenden Drücke ertragen [42], genau sind die Verhältnisse aber nicht bekannt. Dennoch kann im Vergleich mit den üblichen Druckauslegungen von Gebäuden in der Pyrotechnik (Größenordnung 1 bar) aus den o. a. Werten geschlossen werden, daß bei einer Explosion innerhalb eines derartigen Gebäudes Menschen außerhalb des Gebäudes aufgrund primärer Druckeinwirkung (Luftstoß) anscheinend nur der Gefahr eines Trommelfellrisses ausgesetzt sind, sofern die Explosivstoffmenge entsprechend der Widerstandsfähigkeit des Gebäudes bemessen ist.

Eine mittelbare, durch den Druck verursachte Gefährdung der Umgebung ist durch Wurfstücke der Ausblaseflächen (ggf. auch des Inventars eines Raumes) und durch Sprengstücke, d.h. durch Teile explodierter Gegenstände gegeben. Auf die diesbezüglichen Vorteile leichtester Ausblaseflächen (z. B. Kunststoffolien) wurde bereits hingewiesen (Seite 159). Im übrigen läßt sich aus Unfällen und den hier beschriebenen Versuchen nur feststellen, daß bereits Drücke in der Größenordnung 0,1 bar zu erheblichen Wurfweiten von selbst großen Teilen der Ausblasewand führen können, sofern aufgrund großer Stoffmengen auch große Gasmengen freiwerden (Teil I Seite 50). Bei der Ausblasebauart mit leichter Dachausführung kommt zu der Wurfstückbildung in horizontaler Vorzugsrichtung noch die starke Streuung der Wurfstücke des Daches hinzu.

Über eine mögliche Gefährdung durch Sprengstücke kann nur im Einzelfall an Hand der in Frage kommenden Gegenstände entschieden werden. Der Begriff "Gefährdung der Umgebung" ist auch hier bei Wurf- und Sprengstücken sowohl hinsichtlich der Verletzung von Menschen als auch der Brand- und Explosionsübertragung zu verstehen. In diesem Zusammenhang sei bemerkt, daß die UVV 46 k "Herstellen pyrotechnischer Gegenstände" [13] zwischen den Ausblaseseiten einander zugekehrter Gebäude - ausgenommen Trockengebäude - 25 m Mindestabstand verlangt.

In Teil I wurde gezeigt, daß die Mengenabhängigkeit der Flammenausbreitung l_{F1} in Druckentlastungsrichtung für alle mit

Schwarzpulver durchgeführten Versuche näherungsweise durch $l_{F1} \approx m^{0,7}$ beschrieben ist (Seite 44 Bild 30) und daß auch die mit anderen pyrotechnischen Sätzen erhaltenen Ergebnisse in diese Darstellung mit einzubeziehen sind (Bild 35, Abschnitt 3.2.3). Bei Freifeldversuchen wurden dagegen Flammendurchmesser d_{F1} gefunden, die relativ gut mit Literaturangaben ($d_{F1} \sim m^{0,3}$, vgl. Teil III Seite 115) übereinstimmen. Offensichtlich beeinflußt die Vorzugsrichtung bei der Druckentlastung auch den Exponenten der Mengenabhängigkeit.

Die rückwärtige Flammenausbreitung um die vorgezogenen Widerstandswände herum ist von der Windrichtung abhängig und führte nur bei den Versuchen mit Feuerwerkssternen wegen der großen Mengen und niedrigen Drücke zu einer erheblichen Belastung der benachbarten Ausblasewand. In diesen und vergleichbaren Fällen sind also Ausblasewände aus Holz solchen aus Kunststoffolie vorzuziehen.

Für Flugfeuer, das sind brennende umherfliegende Teile aus einem Brand- oder Explosionsherd, gilt also grundsätzlich das zum Punkt Wurf- und Sprengstücke gesagte, mit erhöhter Gefahr der Brand- und Explosionsübertragung.

Über die Gefährdung der Umgebung durch Wärmestrahlung wurde bereits berichtet [6, 7]. Grundsätzlich ist festzustellen, daß die Wärmestrahlung in Druckentlastungsrichtung sowohl durch die Ausblasewände bzw. Wurfstücke derselben als auch durch die Schwaden selbst geschwächt wird. So konnten bei Freifeldversuchen, bei denen die Explosionsschwaden nach oben abziehen, sowohl mit Schwarzpulver als auch mit einer Schwarzpulver-Aluminium-Mischung bis etwa 1/3 der entsprechenden Explosionswärme als Wärmestrahlung gefunden werden. Bei Versuchen in Räumen mit freier Ausblasefläche waren es in Druckentlastungsrichtung nur noch 5 - 9 % im Modellgebäude bzw. 9 - 16 % (mit steigender Menge abnehmend) im 1-m³-Stahlkasten. Mit Ausblasewänden aus Holz wurden nur noch 1,5 bis 2,5 % erhalten. Langsamere Reaktionen führten auch mit Ausblasewänden aus Holz zu höheren Strahlungsanteilen, da die Reaktion nur anfänglich im geschlossenen Raum abläuft und ferner, wegen der niedrigeren Drücke, die Schwaden früher nach oben abziehen (Schwarzpulver auf Horden 7 - 12 %, rote Feuerwerkssterne 7 - 9 %, silberne Feuerwerkssterne 22 - 26 %). Bei

langsameren Reaktionen spielt natürlich auch die Umsetzung mit Luftsauerstoff noch in der eigentlichen Reaktionszone eine größere Rolle. Die Messungen bei Freifeldversuchen und mit dem 1-m³-Stahlkasten (Teil I Abschnitt 3.1.2 und Teil II Abschnitt 3.1.1) haben die quadratische Abstandsabhängigkeit der Wärmestrahlung außerhalb des Schwadenbereiches im Abstand zwischen 20 m und 80 m sehr gut bestätigt.

Die Schwächung der Wärmestrahlung in den Explosionsswaden führt allerdings dazu, daß eine Extrapolation der Wärmestrahlungsparameter über die quadratische Abstandsabhängigkeit in den Schwadenbereich hinein zu kleine Werte liefert. Für die nähere Umgebung des Versuchshauses ist daher eine Abschätzung des Abstandes, in dem bestimmte physiologische Reaktionen beim Menschen aufgrund von Wärmestrahlung auftreten, z. B. unerträglicher Schmerz oder Verbrennungen 1., 2. und 3. Grades, sehr unsicher. Nach Buettner [43] stellt sich nach der Zeit t_s unerträglicher Schmerz ein, wenn die Haut (Außenseite des Unterarms) der Bestrahlungsstärke E_s ausgesetzt ist; wobei bei seinen Meßwerten im Bereich $2 \text{ s} \leq t_s \leq 40 \text{ s}$ ein Zusammenhang $E_s \approx c/t_s^{0,7}$ mit $c \approx 2900 \text{ mW cm}^{-2} \text{ s}^{0,7}$ entnommen werden kann. Formt man den im Abstand r gemessenen Verlauf der Bestrahlungsstärke in einen Rechteckimpuls um (mit der Dauer t_s gleich der Breite der gemessenen Kurve bei $E = E_{\text{max}}/2$), so kann man E_s mit der angegebenen Gleichung abschätzen. Über die quadratische Abstandsabhängigkeit $E_s : E_{\text{max}} = r^2 : r_s^2$ läßt sich dann der Abstand r_s als Grenze für unerträglichen Schmerz berechnen.

Nimmt man z. B. für die Versuche mit Feuerwerkssternen den Mittelpunkt der Strahlungsquelle 10 m vor dem Modellgebäude an ($r = 95 \text{ m}$), dann erhält man mit $t_s = 0,65 \text{ s}$ für 200 kg silberner Sterne (Seite 51) $E_s = 3920 \text{ mW/cm}^2$ und $r_s = 25,5 \text{ m}$. Zuzüglich der 10 m liegt diese Grenze in der Größenordnung der Flammenausbreitung in Druckentlastungsrichtung. Die Wärmestrahlung scheint daher die Umgebung nicht in größerer Entfernung zu gefährden als die Flammen selbst, wobei wegen der im Schwadenbereich nicht gültigen Abstandsabhängigkeit dort mit einer höheren Bestrahlungsstärke gerechnet werden muß als hier angenommen. Außerdem muß berücksichtigt werden, daß nicht nur im Bereich der Flammen, sondern auch in dem Bereich der kälteren Schwaden, der visuell nicht mehr als Flamme

wahrgenommen wird, neben der Wärmestrahlung eine Wärmeübertragung durch Wärmeleitung bzw. -mitführung (z. B. durch heiße Partikel) zu physiologischen Schäden führen kann.

7. Zusammenfassung

Im vorliegenden Teil des Berichtes wurde zunächst noch einmal auf die in Teil III abgeleitete Druckausbreitungsfunktion für den Maximaldruck p_1 bei Freifeldversuchen eingegangen, der durch die Umsetzung von Schwarzpulver unter Eigenverdämmung verursacht wird. Es konnte gezeigt werden, daß diese Funktion auch für die Versuche im Modellgebäude gilt, sofern die Schwarzpulverschüttung auf einer entsprechenden Unterlage (Tisch mit Holzplatte) gezündet wurde. Für Versuche auf einer Stahlunterlage (Freifeld, Modellgebäude, 1-m^3 -Stahlkasten) wurde eine etwas abweichende Funktion erhalten.

Für Räume mit freier Ausblasefläche konnte eine Beziehung zur näherungsweise Abschätzung des Maximaldruckes p_{\max} in Abhängigkeit von Volumen und Druckentlastungsfläche abgeleitet werden, die Anwendbarkeit dieser Beziehung für andere Stoffe als das untersuchte Schwarzpulver wurde diskutiert.

Während die Deflagration unter Eigenverdämmung bei entsprechender Zündung des Schwarzpulvers im Freifeld die höheren Drücke liefert, war die hauptsächliche Druckbelastung bei den hier beschriebenen Versuchen in druckentlasteten Räumen immer durch die Deflagration des restlichen, nicht mehr unter Eigenverdämmung reagierenden Schwarzpulvers gegeben. Diese Relationen können sich verschieben, wenn andere geometrische Bedingungen (Abstände und Raumgrößen) vorliegen und wenn zu anderen Stoffen übergegangen wird.

In dem Zusammenhang sei besonders an den Effekt der hier etwas umfassender definierten Grenzladung erinnert. Es wurden Vorstellungen entwickelt, wie man die sicherheitstechnischen Kenndaten speziell pyrotechnischer Sätze im Rahmen eines Forschungsvorhabens und in Zusammenarbeit mit der pyrotechnischen Industrie aktualisieren und um sicherheitstechnisch relevante Druckdaten erweitern kann. Abschließend wurden mögliche Auswirkungen von Brand- und Explosionsunfällen in Gebäuden in Ausblasebauart auf die Umgebung diskutiert.

Schlußbetrachtung und Ausblick

H. Treumann

In der Begründung zu diesem Forschungsvorhaben wurde ausführlich auf dessen ursprüngliche Zielsetzung eingegangen, aber auch auf die weitere Entwicklung der betreffenden Rechtsvorschriften einschließlich der in Sprengstofflager-Richtlinien festgelegten sicherheitstechnischen Regeln. Infolge dieser Entwicklung war - insbesondere für pyrotechnische Gegenstände - die Unterscheidung der Lagergruppen 1.3 (Massenfeuer) und 1.4 (Auswirkungen weitgehend auf die Packung beschränkt) aufgrund der Wärmestrahlung das wesentliche noch offene Problem.

Ungeachtet einiger noch zu klärender Fragen wurde im Rahmen des Vorhabens ein Wärmestrahlungsmeßsystem entwickelt, das den besonderen Eigenschaften pyrotechnischer Sätze und Gegenstände gerecht wird. Da die pyrotechnischen Sätze infolge der Vielfalt ihrer Reaktionen das gesamte Erscheinungsbild der Reaktionen der anderen explosionsfähigen Stoffe abdecken, ist folglich das Meßsystem allgemein verwendbar.

Das Rahmenthema "Vergleichende Untersuchungen explosionsgefährlicher Stoffe in verschiedenen Maßstäben" wurde gleichfalls durch die eingangs erwähnte geänderte Zielsetzung begründet und ist in den anderen Teilen des Berichtes abgehandelt. In diesen Teilen ist eine Fülle von Versuchsergebnissen zusammengestellt, die materielle Entscheidungshilfen bei der Konzeption neuer und der Überprüfung bestehender betrieblicher Einrichtungen, bei Genehmigungsverfahren und bei Unfallaufklärungen geben, beispielsweise bei Konstruktion und Ausführung von Ausblasewänden und bei der Berechnung der notwendigen Abstände von Betriebsgebäuden untereinander. Die Verwendung von pyrotechnischen Sätzen, insbesondere von Schwarzpulver, hatte auch dabei Modellcharakter.

Für den weniger Sachkundigen ist zumindest auf bestehendes Datenmaterial hingewiesen worden bzw. auf die Möglichkeit, bestimmte Fragen experimentell untersuchen zu lassen. Das erarbeitete Material ist in gleicher Weise als Grundlage für die wünschenswerte Fortsetzung der Forschungsarbeiten und für

die Durchführung der entsprechenden gesetzlichen Aufgaben geeignet.

Die wichtigsten verbleibenden Fragen, die einer Bearbeitung bedürfen, sind im folgenden aufgeführt:

1. Ein Problem bei der Lagergruppenzuordnung, das im vorliegenden Bericht bisher nicht angesprochen wurde, wird seit kurzem immer häufiger diskutiert. Die Gliederung der Lagergruppen ist militärischen Vorschriften entlehnt und berücksichtigt somit nicht alle Belange des zivilen Bereiches. Aus diesem Grunde wurden z. B. für sonstige explosionsgefährliche Stoffe, die nicht wegen ihrer explosiven Eigenschaften hergestellt werden, zusätzliche Lagergruppen geschaffen. Auch bei pyrotechnischen Gegenständen ist gelegentlich festzustellen, daß keine der zur Verfügung stehenden Lagergruppen die Eigenschaften der Gegenstände in den jeweiligen Verpackungen ausreichend berücksichtigt. Insbesondere die Frage, was im zivilen Bereich ein gefährliches Sprengstück im Sinne der Lagergruppe 1.2 ist, lohnt der eingehenden Untersuchung.
2. Auch die Quantifizierung des Begriffes "Massenexplosion" (Lagergruppe 1.1) ist von besonderer Aktualität.
3. Einen noch direkteren Nutzen, sowohl in sicherheitstechnischer als auch in wirtschaftlicher Hinsicht, hätte die in den vergleichenden Betrachtungen vorgeschlagene Fortführung der Untersuchungen explosionsgefährlicher Stoffe in verschiedenen Maßstäben mit dem Ziel, für eine größere Zahl ausgesuchter pyrotechnischer Sätze eine aktuelle Liste sicherheitstechnischer Kenndaten unter Angabe relevanter Druckdaten aufzustellen. Der Verband der Hersteller pyrotechnischer Gegenstände hat sein Interesse an einer derartigen Arbeit bereits bekundet. Selbstverständlich sind entsprechende Untersuchungen auch an anderen explosionsgefährlichen Stoffen als pyrotechnischen Sätzen möglich und wünschenswert. Es wird jedoch für sinnvoll gehalten, zunächst weitere Kenntnisse an pyrotechnischen Sätzen zu erwerben. Auf jeden Fall müßten auch die Berufsgenossenschaft der chemischen Industrie und der Bun-

desminister für Arbeit und Sozialordnung, der an der Vergabe des abgeschlossenen Vorhabens maßgeblich beteiligt war, an der Weiterführung der Untersuchungen mit den beiden hier aufgezeigten Zielsetzungen interessiert sein.

Abschließend ist dem Bundesminister für Arbeit und Sozialordnung und der Bundesanstalt für Arbeitsschutz für die Förderung der durchgeführten Arbeiten zu danken, sowie all denen, die insgesamt an der Durchführung der Versuche, an der Auswertung der Ergebnisse und an der Fertigstellung des Abschlußberichtes beteiligt waren.

Literaturverzeichnis

- 1) Zweite Verordnung zum Sprengstoffgesetz (2. SprengV) vom 23. November 1977 (BGBl. I, S. 2189) mit Berichtigung vom 18. April 1978 (BGBl. I, S. 590)
- 2) Richtlinie für das Zuordnen explosionsgefährlicher Stoffe zu Lagergruppen - SprengLR 010. Bek. des BMA vom 25. April 1978. Arb Sch. H. 6/1978 S. 231
- 3) Richtlinie für das Zuordnen sonstiger explosionsgefährlicher Stoffe zu Lagergruppen - SprengLR 011. Bek. des BMA vom 6. April 1981. B ArbBl. 2/1980 S. 101
- 4) Gesetz über explosionsgefährliche Stoffe (Sprengstoffgesetz - SprengG) vom 13. September 1976 (BGBl. I, S. 2737) in der F. der Achten Verordnung zur Änderung der Listen der explosionsgefährlichen Stoffe vom 10. April 1981 (BGBl. I, S. 376)
- 5) Unfallverhütungsvorschrift 46a. Explosivstoffe und Gegenstände mit Explosivstoff - Allgemeine Vorschrift -, Berufsgenossenschaft der chemischen Industrie, 1978
- 6) Treumann, H.; Pfeil, N.: Widerstandsfähigkeit von Gebäuden in der Pyrotechnik - Versuche mit Schwarzpulver. Bericht der Bundesanstalt für Materialprüfung, Berlin 1980
- 7) Treumann, H.; Pfeil, N.: Widerstandsfähigkeit von Gebäuden in der Pyrotechnik - Versuche mit Feuerwerkssternen auf Horden. Bericht der Bundesanstalt für Materialprüfung, Berlin 1981
- 8) Unfallverhütungsvorschrift 46a. Allgemeine Sprengstoffvorschrift. Berufsgenossenschaft der chemischen Industrie, 1959 mit Nachtrag 1966
- 9) Zerna, W.; Stangenberg, F.: Zur Auslegung von Kernkraftwerksgebäuden. Der Bauingenieur 49 (1974) S. 157-165
- 10) Limberger, E.: Private Mitteilung. Bundesanstalt für Materialprüfung, Berlin 1980
- 11) Burde, E.; Mathieu, G.: Konstruktions- und Funktionsbeschreibung einer Anlage zur quasidynamischen Kalibrierung von Druckstoßempfängern bis 10 bar für den Einsatz auf Schießplätzen und im Labor. Deutsch-Französisches Forschungsinstitut Saint-Louis. Technischer Bericht ISL-RT 516/77, Saint-Louis 1977
- 12) Nakano, Y.; Mizushima, Y.: Radiation from flame of fireworks. Kogyo kayaku kyokaishi 38 (1977) S. 345-348
- 13) Unfallverhütungsvorschrift 46k. Herstellen pyrotechnischer Gegenstände. Berufsgenossenschaft der chemischen Industrie, 1981
- 14) Unfallverhütungsvorschrift 46b. Herstellung von Schwarzpulver. Berufsgenossenschaft der chemischen Industrie, 1961 i. d. F. 1978

- 15) Hahn, H.; Hintze, W.; Treumann, H.: Safety and technological aspects of black powder. Propellants and Explosives 5 (1980) S. 129-134
- 16) Suppressive shields structural design and analysis handbook. U.S. Army Corps of Engineers. Huntsville Division, 1977
- 17) Buettner, K.: Effects of extreme heat and cold on human skin. II Surface temperature, pain and heat conductivity in experiments with radiant heat. J. Applied Physiol. 3 (1951) S. 703-713
- 18) Erste Verordnung zum Waffengesetz (1. WaffV) vom 15. Februar 1979 (BGBl. I, S. 184), geändert durch die Dritte Verordnung zum Waffengesetz vom 22. Dezember 1980 (BGBl. I, S. 2344)
- 19) Allgemeine Verwaltungsvorschrift zum Waffengesetz (WaffVwV) vom 29. November 1979 (Beilage zum BAnz. Nr. 229 vom 7. November 1979, berichtigt in BAnz. Nr. 231 vom 11. Dezember 1979)
- 20) Andre, H.; Pfeil, N.: Der Einfluß von Ausblaseöffnungen auf den Druckverlauf bei Schwarzpulverexplosionen. Internationale Jahrestagung des Fraunhofer-Instituts für Treib- und Explosivstoffe (ICT), Karlsruhe 1980, S. 637-656
- 21) Hahn, H.; Hintze, W.; Treumann, H.: Safety and technological aspects of black powder. Propellants and Explosives 5 (1980) S. 129-134
- 22) Wild, R.: Blast waves produced by pyrotechnic mixtures compared to those produced by high explosives. Minutes of the 18th explosives safety seminar, San Antonio 1978, S. 727-738
- 23) Jenkins, J.M.; Nicholls, R.F.; Peer, M.: Explosive power of pyrotechnic compositions. Minutes of the 19th explosives safety seminar, Los Angeles 1980, S. 77-88
- 24) Mc Intyre, F.L.; Rindner, R.M.: A compilation of hazard and test data for pyrotechnic compositions. U.S. Army Armament Research and Development Command, AD A 096248, Dover 1980
- 25) Napadensky, H.S.; Swatosh, J.J.: TNT Equivalency of Black Powder. Volume I + II. IIT Research Inst., Chicago 1972, AD-A044 443/4
- 26) Lehmann, K.: Vergleich verschiedener Druckausbreitungsfunktionen detonierender fester Explosivstoffe und deren Bedeutung für den Schadensumfang. Explosivstoffe 21 (1973) S. 165-176
- 27) Richtlinie für die Zusammenlagerung sonstiger explosionsgefährlicher Stoffe (Lagergruppen I - III) - SprengLR 340, Bek. d. BMA vom 24. Oktober 1978. Arb.Sch. Heft 12/1978 S. 449

- 28) Westphal, W.H.: Physik - Ein Lehrbuch. Springer Verlag 1956
- 29) Glockmann, W.: persönliche Mitteilung. Firma Heimann, Wiesbaden, 1984
- 30) Lemke, D.: Bericht über Großbrandversuche mit den organischen Peroxiden tert. Butylperbenzoat und tert. Butylper-2-ethylhexanoat. Bundesanstalt für Materialprüfung, Tgb.-Nr. 4-2079, Berlin, 1981
- 31) Treumann, H.; Andre, H.; Pfeil, N.: Behältnisse zur Aufbewahrung von explosionsgefährlichen Stoffen in kleinen Mengen. Forschungsbericht der Bundesanstalt für Materialprüfung im Auftrag des Bayerischen Staatsministeriums für Arbeit und Sozialordnung, in Vorbereitung
- 32) Heinrich, H.-J.: Beitrag zur Kenntnis des zeitlichen und örtlichen Druckverlaufs bei der plötzlichen Entlastung unter Druck stehender Behälter und Behälterkombinationen. Forschungsbericht 75 der Bundesanstalt für Materialprüfung, Berlin, 1980
- 33) Treumann, H.: Explosive Stoffe. "Hütte", Taschenbuch der Werkstoffkunde (Stoffhütte). Verlag von Wilhelm Ernst & Sohn, 4. Aufl., Berlin/München 1967, S. 1251-1259
- 34) Verordnung über die Beförderung gefährlicher Güter mit Seeschiffen (GefahrgutVSee) vom 5. Juli 1978 (BGBl. I, S. 1017)
- 35) Merkblatt Druckbehälter 305, Richtlinien für Brechsicherungen, VdTÜV, Essen, Oktober 1959
- 36) Swart, K.-H.; Treumann, H.; Krüger, G.: Über Versuche zur Ermittlung des Verhaltens größerer Mengen pyrotechnischer Sätze nach thermischer Zündung. Die Berufsgenossenschaft (1969) S. 163-166 und 203-207
- 37) Koenen, H.; Ide, K.H.; Swart, K.-H.: Sicherheitstechnische Kenndaten explosionsfähiger Stoffe. I. Mitteilung. Explosivstoffe 9 (1961) S. 4-13 und 30-42
- 38) Ide, K.H.; Koch, H.W.; Swart, K.-H.; Treumann, H.: Sicherheitstechnische Kenndaten explosionsfähiger Stoffe. II. Mitteilung. Explosivstoffe 18 (1970) S. 56-65
- 39) Treumann, H.: Quantification of the degree of hazard of pyrotechnic compositions. Proceedings of the Seventh International Pyrotechnic Seminar, 14. - 18. Juli 1980, Vail, Colorado. S. 878-897
- 40) DIN 1055 Teil 4. Lastannahmen für Bauten - Verkehrslasten, Windlasten nicht schwingungsanfälliger Bauteile
- 41) White, C.S.: The scope of blast and shock biology and problem areas in relating physical and biological parameters. In: Prevention of and Protection against accidental explosions of munitions, fuels and other hazardous mixtures. Ann. N.Y. Acad. Sciences 152 (1968) S. 89-102

- 42) Haerter, H.: Empfindlichkeit des Menschen. In: Handbuch der Waffenwirkungen für die Bemessung von Schutzbauten. Bundesamt für Zivilschutz, Bern, 1964
- 43) Buettner, K.: Effects of extreme heat and cold on human skin. II. Surface temperature, pain and heat conductivity in experiments with radiant heat. J. Applied Physiol. 3 (1951) S. 703-713
- 44) Structures to resist the effects of accidental explosions. Department of the Army, the Navy and the Air Force. TM 5-1200, NAV FAC P-397, AM 88-22, Washington, D.C., 1969

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 Feuchtigkeitschutzes von Dehnungsmeßstreifen und Halbleitern
von Dr.-Ing. Götz Andrae

Nr. 3/September 1970 (vergriffen)

Über das mechanische Verhalten von Aluminium-Stahl-Freileitungssellen 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 Netzwerkkettendichte 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 (vergriffen)

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

Festkörperlithographie 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 Sorptionsverhalten 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.-Forstling, 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 ionisiertem 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. Holzöhner
- 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 Czálka, Dipl.-Phys. Norbert Mayer, Dipl.-Ing. Claus Amberg, Dipl.-Ing. Götz Magiera, Dr.-Ing. Götz Andreae 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. Dieler Klaffke
- Nr. 56/Januar 1979
Stabilität von Sandwichbauteilen
von Dipl.-Ing. W. Brünner und Prof. Dr.-Ing. G. Langlie
- 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 Farbmetrik 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 Rücker
- 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
- Nr. 67/Mai 1980
Beitrag zur dynamischen Analyse von vorgespannten und vorbelasteten Feder-Masse-Systemen mit veränderlicher Gliederung unter stoßartiger Beanspruchung
von Dr.-Ing. Wolfgang Matthees
- Nr. 68/Mai 1980
Oberflächenmeßverfahren unter besonderer Berücksichtigung der Stereomeßtechnik.
Entwicklung eines volleuzentrischen Präzisions-Goniometers
von Dr. rer. nat. Dieter Petersohn
- Nr. 69/Juni 1980
Untersuchungen zur Integrität des Liners von Reaktorsicherheitschillen (Containments) in Stahlbeton- und Spannbetonbauweise
von Dr.-Ing. Frank Buchhardt und Dipl.-Ing. Peter Brandl
- Nr. 70/August 1980 (vergriffen)
Schwellenwerte beim Betondruckversuch
von Dr.-Ing. Gerald Schickert
- Nr. 71/August 1980
Untersuchungen über durch den Boden gekoppelte dynamische Wechselwirkungen benachbarter Kernkraftwerksbauten großer Masse unter seismischen Einwirkungen
von Dr.-Ing. Wolfgang Matthees und Dipl.-Ing. Götz Magiera
- Nr. 72/September 1980
Übertragbarkeit der Ergebnisse von Brandprüfungen am Beispiel von Stahl- und Holzstützen
von Dr.-Ing. Reinald Rudolphi

Nr. 73 /November 1980

Vergleichende Untersuchungen zum Tragverhalten von Klemmkupplungen für Stahlrohrgerüste nach bestehenden deutschen Prüfvorschriften und geplanten europäischen bzw. internationalen Prüfnormen
von Dipl.-Ing. Peter Wegener

Nr. 74 /November 1980

ALGOL-Computerprogramm zur Berechnung zweidimensionaler Installationärer Temperaturverteilungen mit Anwendungen aus dem Brand- und Wärmeschutz
von Dr.-Ing. Reinald Rudolph und Dipl.-Inform. Renate Müller

Nr. 75 /November 1980

Beitrag zur Kenntnis des zeitlichen und örtlichen Druckverlaufs bei der plötzlichen Entlastung unter Druck stehender Behälter und Behälterkombinationen
von Dir. u. Prof. Dr. Hans-Jürgen Heinrich

Nr. 76 /November 1980

Deformationsverhalten von Rein- und Reinstaluminium sowie Cu 99,9 und St 37 bei Biegewechselbeanspruchung im Rasterelektronenmikroskop
von Dr.-Ing. Dieter Klaffke und Prof. Dr.-Ing. Wolfgang-Werner Maennig

Nr. 77 /April 1981

Untersuchung des Verhaltens von Lagerzementen
von Dipl.-Ing. Michael Gierloff und Dr.-Ing. Matthias Maultzsch

Nr. 78 /September 1981

Dynamische Wechselwirkung eines Schienen-Schwellensystems mit dem Untergrund
von Dr.-Ing. Werner Rücker

Nr. 79 /Dezember 1981

Ein Beitrag zur Untersuchung der wasserstoffbeeinflussten Kaltrißneigung höherfester niedriglegierter Feinkornbaustähle mit dem Implantversuch
von Dr.-Ing. Volker Neumann

Nr. 80 /Dezember 1981

Ursachen des Teileinsturzes der Kongreßhalle in Berlin-Tiergarten
von Dr.-Ing. Arno Plank, Dr.-Ing. Werner Struck und Dr.-Ing. Manfred Tzschätzsch

Nr. 81 /Dezember 1981

Graphisch-rechnerisches Verfahren zum Erfassen der Zündhäufigkeit zündbarer Stoffe; Anwendung auf Datenmaterial aus dem Bereich der Statistik
von Dipl.-Ing. Jürgen Schmidt

Nr. 82 /April 1982

Zur werkstoffmechanischen Beurteilung des Kerbschlagbegeversuches
Assesment of the mechanical behaviour of materials in the notched bar impact test
von Rolf Helms, Hans-Joachim Kühn und Siegmund Ledworowski

Nr. 83 /Juli 1982

Tribologisches Verhalten von thermoplastischen Kunststoffen — Kontaktdeformation, Reibung und Verschleiß, Oberflächenuntersuchungen —
von Prof. Dr.-Ing. Horst Czichos und Dr.-Ing. Paul Feintke

Nr. 84 /Juli 1982

Übertragbarkeit der Ergebnisse von Brandprüfungen im Kleinprüfstand (Vergleichsversuche)
von Dipl.-Inform. Renate Müller und Dr.-Ing. Reinald Rudolph

Nr. 85 /ISBN 3-88314-231-X /Oktober 1982

Technische Materialforschung und -prüfung — Entwicklungstendenzen und Rahmenvorschläge für ein EG-Programm „Basic Technological Research“ — Materials Research and Testing — Development Trends and Outline Proposals for a Community Programme „Basic Technological Research“ —
von Prof. Dr. Horst Czichos

Nr. 86 /ISBN 3-88314-232-8 /November 1982

Zur quantitativen Kennzeichnung des Verwitterungsverhaltens von Naturwerksteinen anhand ihrer Gefügemerkmale
von Dr.-Ing. Konrad Niesel und Dr. rer. nat. Peter Schimmelwitz

Nr. 87 /ISBN 3-88314-240-9 /Dezember 1982

Einfluß baupraktischer Umgebungsbedingungen auf das Korrosionsverhalten von Spannstählen vor dem Injizieren
von Dr.-Ing. Bernd Isecke und Dr.-Ing. Wolfgang Stichel

Nr. 88 /ISBN 3-88314-254-9 /Februar 1983

Untersuchungen zur Ausbreitung von Longitudinalwellen an Oberflächen bei der Materialprüfung mit Ultraschall
von Dr.-Ing. Anton Erhard

Nr. 89 /ISBN 3-88314-263-8 /April 1983

Untersuchungen zur Zerfallsfähigkeit von Distickstoffoxid
von Dr. rer. nat. Dietrich Conrad und Dr.-Ing. Siegmund Dietlen

Nr. 90 /ISBN 3-88314-264-6 /April 1983

Kinetische Grenztragfähigkeit von stoßartig belasteten Stahlbetonbauteilen

Konzeption für geregelte Versuche

Versuchseinrichtung

Vorversuche an Stahlbetonbalken

von Dr.-Ing. Klaus Brandes, Dipl.-Ing. Ernst Limberger und Dipl.-Ing. Jürgen Herter

Nr. 91 /ISBN 3-88314-265-4 /April 1983

Dreidimensionale Analyse von unbewehrtem Beton mit nichtlinear-elastischem Materialgesetz
von Dr.-Ing. Michael Weber

Nr. 92 /ISBN 3-88314-266-2 /August 1983

Ausbreitung von Erschütterungen durch den Boden
von Dipl.-Ing. Lutz Auersch

Nr. 93 /ISBN 3-88314-283-2 /August 1983

Unterdrückung stick-slip-induzierter Kurvengeräusche schienengebundener Fahrzeuge durch eine physikalisch-chemische Oberflächenbehandlung der Schienen
von Dr. rer. nat. Peter Studt

Nr. 94 /ISBN 3-88314-284-0 /August 1983

Untersuchungen der Störschwingungen beim Kerbschlagbiegeversuch und deren Abschwächungen
von Dr.-Ing. Xian-Quan Dong

Nr. 95 /ISBN 3-88314-289-1 /August 1983

Über die Fokussierung des Schallfeldes von Ultraschall-Prüfköpfen mit Fresnelschen Zonenplatten
von Dr.-Ing. Manfred Römer

Nr. 96 /ISBN 3-88314-296-4 /Oktober 1983

Verbundverhalten zwischen Beton und geripptem Betonstahl sowie sein Einfluß auf inelastische Verformungen biegebeanspruchter Stahlbetonbalken
von Dr.-Ing. Heinz Eifler

Nr. 97 /ISBN 3-88314-297-2 /November 1983

Typische Bruchflächenbildung thermoplastischer Kunststoffe nach wechselnder mechanischer Beanspruchung
von Dipl.-Ing. Gerhard Fuhrmann und Prof. Dr. rer. nat. Wolfram Schwarz

Nr. 98 /ISBN 3-88314-312-X /Dezember 1983

Bestimmung des elastischen Verhaltens von Maschenwaren — Stretch- und Erholungsvermögen —
von Dr. rer. nat. Edmund Schnabel

Nr. 99 /ISBN 3-88314-317-0 /Dezember 1983

Kinetische Grenztragfähigkeit von stoßartig belasteten Stahlbetonbauteilen
Versuche an Stahlbetonbalken mit Biegebewehrung aus Betonstahl BSt 420/500 RK und BSt 1080/1320
von Dr.-Ing. Klaus Brandes, Dipl.-Ing. Ernst Limberger und Dipl.-Ing. Jürgen Herter

Nr. 100 /ISBN 3-88314-298-0 /Januar 1984

Untersuchungen zur Prüfung von Beton auf Frostwiderstand
von Günter Klamrowski und Paul Neustupny

Nr. 101 /ISBN 3-88314-327-8 /Februar 1984

Röntgen- und Gammastrahlen Computer-Tomographie
von Dr.-Ing. Peter Reimers, Dr. rer. nat. Jürgen Goebels, Dr.-Ing. Heinrich Heidt, Dr.-Ing. Hans-Peter Weise und Dipl.-Phys. Kay Wilding

Nr. 102 /ISBN 3-88314-335-9 /März 1984

Weiterentwicklung des hydraulischen Kompensationsverfahrens zur Druckspannungsmessung in Beton
von Dr.-Ing. Götz Magiera

Nr. 103 /ISBN 3-88314-328-6 /März 1984

Radiographie mit Elektronen aus Metallverstärkerrollen
von Dr.-Ing. Dierk Schnitger

Nr. 104 /ISBN 3-88314-339-1 /April 1984

Beeinflussung von Betoneigenschaften durch Zusatz von Kunststoffdispersionen
von Dr.-Ing. Michael Gierloff

Nr. 105 /ISBN 3-88314-345-6 /Juni 1984

Beitrag zum Bremsverhalten energieumwandelnder Aufsetzpuffer in Aufzugsanlagen
von Dr.-Ing. Bernd Schulz-Förberg

Nr. 106 /ISBN 3-88314-360-X /Oktober 1984

Setzung von Fundamenten infolge dynamischer Last
von Dr.-Ing. Jan Lehnert

Nr. 107 /ISBN 3-88314-361-8 /Oktober 1984

Korrosion von Stahlradiatoren
von Dr.-Ing. Wolfgang Stichel und Jörg Ehreke

Nr. 108 /ISBN 3-88314-363-4 /Oktober 1984

Durch Bodenerschütterungen angeregte Gebäudeachswingungen — Ergebnisse von Modellrechnungen
von Dipl.-Ing. Lutz Auersch

Nr. 109/ISBN 3-88314-381-2/Februar 1985

Zur Wirkung der Schrumpfbinderung auf den Schweißeigenspannungszustand und das Sprödbruchverhalten von unterpulvergeschweißten Blechen aus St E 460 N

von Dr.-Ing. Mohamed Omar

Nr. 110/ISBN 3-88314-382-0/Februar 1985

Wasserstoff als Energieträger

von Dr. Hermann Walde (Mitglied des Kuratoriums der BAM i. R.) und Dr. Bernhard Kropp

Nr. 111/ISBN 3-88314-383-9/Februar 1985

Über den Einfluß der Initiierung auf die detonative Umsetzung von Analex-Sprengstoffen unter Berücksichtigung sicherheitstechnischer Gesichtspunkte

von Dr.-Ing. Kurt Ziegler

Nr. 112/ISBN 3-88314-409-6/Juli 1985

Zeitstandverhalten und strukturelle Veränderungen von vielfach wiederverarbeiteten Polyethylenen

von Dr.-Ing. Wolfgang Lützw

Nr. 113/ISBN 3-88314-410-X/Juli 1985

Untersuchungen zum Frequenzeinfluß auf die Schwingungsrißkorrosion von Offshore-Konstruktionen

von Rolf Helms, Horst Henke, Gerhard Delrich (BAM, Berlin) und Tetsuya Saito (NRIM, Japan)

Nr. 114/ISBN 3-88314-419-3/Juli 1985

Neue Verfahren für die Prüfung von Reaktorkomponenten mittels Röntgen- und Gammastrahlen

von Dipl.-Ing. Peter Rose, Dipl.-Ing. Peter Raabe, Dipl.-Ing. Werner Daum und Andreas Szameit

Nr. 115/ISBN 3-88314-420-7/Juli 1985

Farbempfindungsmerkmal Elementaruntun und Buntheitsabstände als Funktion von Farbart und Leuchtdichte von In- und Umfeld

von Privatdozent Dr. Klaus Richter

Nr. 116/ISBN 3-88314-460-6/Okttober 1985

Theoretische Ermittlung des Wärmedurchgangskoeffizienten von Fensterkonstruktionen unter besonderer Berücksichtigung der Rahmenproblematik

von Dr. rer. nat. Franz-Josef Kasper, Dipl.-Inform. Renate Müller, Dr.-Ing. Reinald Rudolphi und Dr.-Ing. Armin Wagner

Nr. 117/ISBN 3-88314-468-1/Okttober 1985

**Materials Technologies and Techno-Economic Development
A study for the German Foundation for International Development
(Deutsche Stiftung für Internationale Entwicklung)**

by Prof. Dr. H. Czichos in cooperation with Dr. G. Sievers, Bundesministerium für Forschung und Technologie (BMFT), Bonn

Nr. 118/ISBN 3-88314-469-X/Okttober 1985

Brand- und Explosionsgefahren explosionsgefährlicher Stoffe bei Herstellung und Lagerung

Modellversuche mit pyrotechnischen Sätzen und Gegenständen
von Dr. rer. nat. Hartwig Treumann, Dipl.-Ing. Hilmar Andre, Dr. rer. nat. Eduard Blossfeld, Dr. rer. nat. Norbert Pfeil und Ing. grad. Matthias-Michael Zindler