

ISBN 3-88314-263-8

Forschungsbericht 89

BUNDESANSTALT FÜR
MATERIALPRÜFUNG (BAM)
BERLIN

Untersuchungen zur Zerfallsfähigkeit von Distickstoffoxid

von Dr. rer. nat. Dietrich Conrad und
Dr.-Ing. Siegmund Dietlen

April 1983

11 Seiten, 18 Abbildungen, 2 Tabellen

•

Herausgegeben von der
Bundesanstalt für Materialprüfung (BAM)
Unter den Eichen 87, 1000 Berlin 45
Telefon 030/8104-1 Telex 183261 bamb d

Copyright © 1982 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

Es wurde untersucht, unter welchen Bedingungen der Zerfall von Distickstoffoxid explosionsartig abläuft. Dazu wurden Zündversuche in verschiedenen Zündgefäßen mit unterschiedlichen Zündquellen bei Raumtemperatur und Anfangsdrücken zwischen 0,05 und 8 bar ausgeführt. Gemessen wurde der zeitliche Druckverlauf im Gefäß. In einigen Fällen wurde der Reaktionsverlauf mit einer Hochgeschwindigkeitskamera gefilmt, und es wurden zur Ermittlung der Reaktionsprodukte gaschromatographische Analysen gemacht. Im Überdruckbereich zeigte der Quotient aus Explosionsdruck und Anfangsdruck mit wachsendem Anfangsdruck steigende Tendenz. Bei dem relativ trägen Zerfall des Distickstoffoxids hatten jedoch die Art und Lage der Zündquelle und die Geometrie und Größe des Zündgefäßes wesentlichen Einfluß auf die Entwicklung der Reaktion und den Anteil des zerfallenen Gases. Weiterhin wurde festgestellt, wie hoch der Anteil an Sauerstoff, Stickstoff oder Luft im Gemisch mit Distickstoffoxid sein muß, um einen explosionsartigen Zerfall zu verhindern. Es zeigte sich, daß dafür bei allen drei Gasen ein Volumenanteil von 30 % ausreichte. Bei tiefen Temperaturen wurden die Grenzbedingungen für den Zerfall im Phasengleichgewicht flüssig-gasförmig ermittelt. Ein Zerfall ließ sich dann nicht mehr einleiten, wenn der Dampfdruck unterhalb 5,7 bar (Gleichgewichtstemperatur -55 °C) lag.

Abstract

We have investigated under which conditions the decomposition of nitrous oxide occurs like an explosion. Therefore we made ignition experiments in various explosion vessels with different ignition sources at roomtemperature and pressures between 0.05 and 8 bar. The progress of the pressure as a function of time during explosion was measured. In some cases the run of reaction was filmed by a high speed camera. In order to determine the reaction products some gaschromatographic analyses were done. In the range of pressures greater than atmospheric the pressure ratio (i. e. explosion pressure divided by initial pressure) showed growing tendency with increasing initial pressure. Because the decomposition of nitrous oxide compared with other reactions takes a slow course, the run of reaction and the portion of gas decomposed were essentially influenced by the kind and location of the ignition source and the figure and size of the explosion vessel. Further we have determined the necessary portion of oxygen, nitrogen or air in the mixture with nitrous oxide to prevent the explosive decomposition. We found, that for these three gases a portion of 30 % by volume was sufficient. At low temperatures the conditions for the non-decomposition of nitrous oxide in the vapour-liquid equilibrium were determined. At vapour pressures less than 5,7 bar an explosive decomposition couldn't be started. The corresponding temperature of the system is -55 °C.

Inhalt	Seite
1. Einleitung, Anlaß der Untersuchungen	1
2. Physikalische und chemische Eigenschaften von N₂O	1
2.1 Physikalische Eigenschaften	1
2.2 Chemische Eigenschaften	1
3. Untersuchungen an gasförmigem N₂O bei Raumtemperatur	1
3.1 Versuchsaufbau und Versuchsdurchführung	2
3.1.1 Versuche im Kugelautoklav mit Drahtzündung im Zentrum	2
3.1.2 Versuche im Kugelautoklav mit Gleitfunkenzündung	2
3.1.3 Versuche im Fensterautoklav mit Drahtzündung	3
3.1.4 Versuche im Fensterautoklav mit Gleitfunkenzündung	3
3.1.5 Versuche in der „Standard-Apparatur“	3
3.1.6 Versuche in der Standard-Apparatur mit anderen Zündquellen	3
3.1.7 Versuche im Fensterautoklav mit der Induktionsfunkenstrecke	3
3.2 Versuchsergebnisse	4
3.2.1 Einfluß des Anfangsdruckes	5
3.2.2 Einfluß der Zündquelle	5
3.2.3 Einfluß der Geometrie des Zündgefäßes und der Lage der Zündquelle	5
3.2.4 Visuelle Beobachtung und Aufnahmen mit einer Hochgeschwindigkeitskamera	5
3.2.5 Analyseergebnisse	8
4. Untersuchungen an Gemischen aus N₂O mit N₂, O₂ oder Luft	8
5. Untersuchungen an N₂O im Phasengleichgewicht flüssig / gasförmig bei tiefen Temperaturen	9
5.1 Versuchsaufbau	9
5.2 Versuchsdurchführung	9
5.3 Ergebnisse	9
5.3.1 Zündung in der gasförmigen Phase	9
5.3.2 Zündung in der flüssigen Phase	10
6. Zusammenfassung	10
Literaturangaben	11

1. Einleitung, Anlaß der Untersuchungen

Distickstoffoxid, N₂O, auch bezeichnet als Stickoxydul oder Lachgas, ist ein Stoff, der in der Medizin als Narkosemittel und in der Lebensmittel-, Kosmetik- und pharmazeutischen Industrie als Aerosoltreibgas breite Anwendung findet. Demzufolge wird er in großen Mengen sowohl unter Druck verflüssigt in Druckgasflaschen als auch tiefkalt verflüssigt in Kesselwagen und Tanklastzügen transportiert.

Distickstoffoxid hat eine positive freie Bildungsenthalpie von 104 kJ/mol (24,9 kcal/mol) [1], [2], [4]. Es besteht daher die Möglichkeit, daß N₂O instabil ist und exotherm in Stickstoff und Sauerstoff zerfallen kann.

In einigen Arbeiten ist auch bereits über Zerfallsreaktionen bei N₂O berichtet worden [6], [7], [8], [9]. Außerdem wurde über Unfälle berichtet, die sich beim Umgang mit N₂O ereignet haben, bei denen die Vermutung naheliegt, daß auch hier der exotherme Zerfall eine Rolle gespielt haben könnte.

Aus diesen Gründen wurden experimentelle Untersuchungen angestellt, die Aufschluß darüber geben sollten, ob und unter welchen Bedingungen N₂O zu explosionsartigem Zerfall angeregt bzw. durch welche Maßnahmen ein Zerfall verhindert werden kann.

2. Physikalische und chemische Eigenschaften von N₂O

2.1 Physikalische Eigenschaften von N₂O

Die wichtigsten physikalischen Kenngrößen des Distickstoffoxids sind in der *Tabelle 1* zusammengefaßt wiedergegeben. Die

Molare Masse	g/mol	44,013
Dampfdruck bei 20°C	bar	52
Siedepunkt bei 1,013 bar	°C	-88,47
Tripelpunkt Druck	bar	0,878
Tripelpunkt Temperatur	°C	-90,81
Gasdichte bei 1,013 bar und 25 °C	g/l	1,81
Relative Dichte bezogen auf Luft		1,53
Kritische Daten		
Kritische Temperatur	°C	36,4
Kritischer Druck	bar	72,5
Kritische Dichte	g/l	453
Löslichkeit in Wasser		
bei 1,013 bar und 0 °C	cm ³ N ₂ O/cm ³ H ₂ O	1,297
25 °C	cm ³ N ₂ O/cm ³ H ₂ O	0,588
1 l flüssiges N ₂ O verdampft beim Siedepunkt enthält Stoffmenge expandiert auf 1,013 bar 25 °C ergibt Gasvolumen		
	mol	27,78
	l	665
Freie Bildungsenthalpie bei 1,013 bar und 25 °C	kJ/mol	104

Tabelle 1
Physikalische Kenngrößen von Distickstoffoxid

Abb. 1 zeigt die Dampfdruckkurve. Die angegebenen Daten entstammen dem „Matheson Gas Data Book“ 6. Auflage 1980 [4] und der von der L'Air Liquide herausgegebenen „Encyclopedie des Gaz“ [5]. In beiden Büchern sind noch weitere Daten über N₂O zu finden.

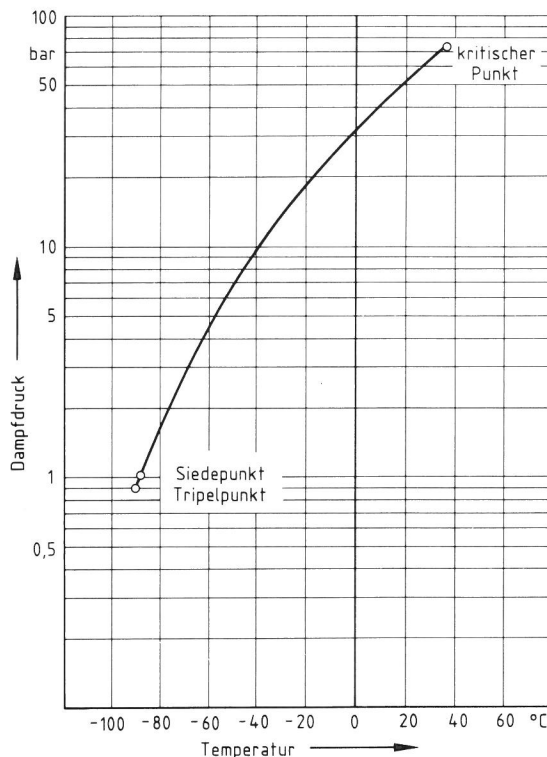
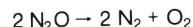


Abb. 1
Dampfdruckkurve von Distickstoffoxid

2.2 Chemische Eigenschaften von N₂O

N₂O unterhält viele Verbrennungsvorgänge unter Selbstzersetzung und ähnelt darin dem Sauerstoff. Die Zerfallsreaktion



verläuft im Temperaturbereich zwischen 600 und 900 °C relativ langsam, d.h. noch nicht explosionsartig, während bei höheren Temperaturen die Zerfallsgeschwindigkeit so groß wird, daß der Zerfall wie eine Explosion abläuft [10]. Die oben angegebene Formel soll nur als Bruttoformel verstanden werden, die keine Aussage über den Reaktionsmechanismus des Zerfalls beinhaltet. Über diesen werden in der Literatur unterschiedliche Angaben gemacht [11], [12], [13], [14], [15]. Danach ist nicht geklärt, ob die Reaktion monomolekular oder bimolekular abläuft.

3. Untersuchungen an gasförmigem N₂O bei Raumtemperatur

Für die Einleitung der Zerfallsreaktion standen drei verschiedene Zündquellen zur Verfügung, die seit längerer Zeit routinemäßig zur Ermittlung sicherheitstechnischer Kenngrößen benutzt werden. Ihre wesentlichen Eigenschaften sind uns aus früheren Untersuchungen bekannt; sie werden weiter unten angegeben. Außerdem standen Zündgefäße unterschiedlicher Größe und Geometrie zur Verfügung. Um den Einfluß der Parameter Größe und Geometrie der Gefäße und Art der Zündquelle auf die Zerfallsreaktion zu untersuchen, wurden mehrere Kombinationen von Gefäß und Zündquelle benutzt.

Sowohl für die hier geschilderten Untersuchungen als auch für die in den Abschnitten 4 und 5 behandelten wurde als Versuchsmaterial N₂O aus Druckgasflaschen in technischer Qualität verwendet, für das durch gaschromatographische Analysen eine Reinheit von mindestens 99,6 % (Stoffmengenanteil) ermittelt wurde.

3.1 Versuchsaufbau und -durchführung

Bei den im folgenden in den Abschnitten 3.1.1 bis 3.1.4 und 3.1.7 beschriebenen Versuchen wurde jeweils ein Autoklav bis zu einem Druck < 1 mbar evakuiert und dann bis zu einem vorgegebenen Anfangsdruck p_a mit N_2O gefüllt. Die Gasfüllung wurde dann der Einwirkung einer im Autoklav befindlichen Zündquelle ausgesetzt. Mit einem piezoresistiven Druckmeßwandler wurde der zeitliche Druckverlauf nach der Zündung auf einem Speicheroszillograph registriert. Aus dem Drucksteigerungsfaktor f , d.h. dem Verhältnis des aus der Druck-Zeit-Kurve ermittelten Explosionsdruckes p_{ex} zum Anfangsdruck p_a

$$f = \frac{p_{ex}}{p_a}$$

wurde geschlossen, ob ein explosionsartiger Zerfall stattgefunden hat. Ein Drucksteigerungsfaktor $f > 1,1$ galt als Kriterium für einen explosionsartigen Zerfall. Bei einigen Versuchen wurden nach dem Ende der Reaktion Gasproben für gaschromatographische Analysen entnommen.

Bei den im Abschnitt 3.1.5 beschriebenen Versuchen wurde ein als „Standard-Apparatur“ bezeichneter Versuchsaufbau benutzt, der von dem oben beschriebenen wesentlich abweicht und bei dem auch das Kriterium $f > 1,1$ für den explosionsartigen Zerfall nicht anwendbar ist.

3.1.1 Versuche im Kugelaufbau mit Drahtzündung im Zentrum

Die Zündversuche wurden begonnen in einem kugelförmigen Autoklav (vergl. Abb. 2) von 29,7 cm Durchmesser (Volumen 13,7 l, maximaler Betriebsdruck 100 bar). Als Zündquelle (vergl.

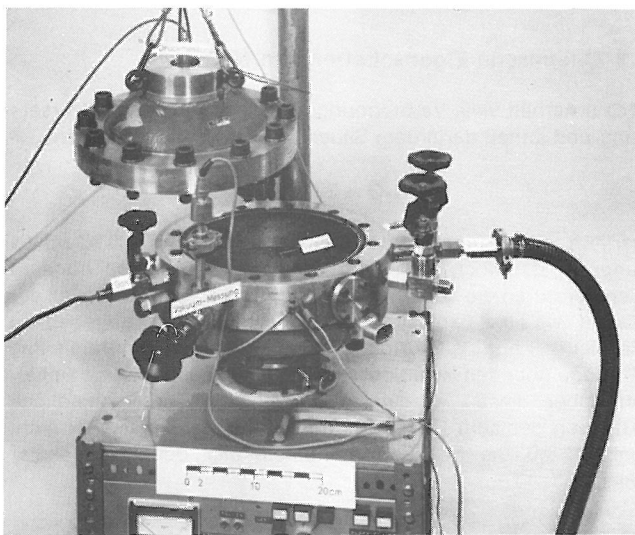


Abb. 2
Kugelaufbau

Abb. 3) wurde ein Nickelindraht von 10 mm Länge und 0,12 mm Durchmesser benutzt, der im Zentrum des Autoklavs an zwei parallelen Haltestäben befestigt war. Über ein spezielles elektronisches Zündgerät wurde genau eine Halbwelle der Netzspannung an diese Haltestäbe geschaltet. Nach dem Durchschmelzen des Drahtes (innerhalb ca. 3 ms) brannte dann für den Rest der Halbwelle (ca. 7 ms) zwischen den Stäben ein Lichtbogen. Die Zündenergie dieser durch die elektrische und mechanische Anordnung definierten Zündquelle hatte einen Wert von ca. 80 Ws. Durch ein Schauglas von 50 mm Durchmesser im „Zenit“ des Kugelaufbaus konnte die bei dem Zerfall auftretende Flamme teilweise beobachtet werden.

3.1.2 Versuche im Kugelaufbau mit Gleitfunkenzündung

Um den Einfluß der Zündquelle zu untersuchen, wurde bei der im Abschnitt 3.1.1 beschriebenen Versuchsanordnung die Drahtzündung durch eine Gleitfunkenzündung ersetzt (vergl. Abb. 4).

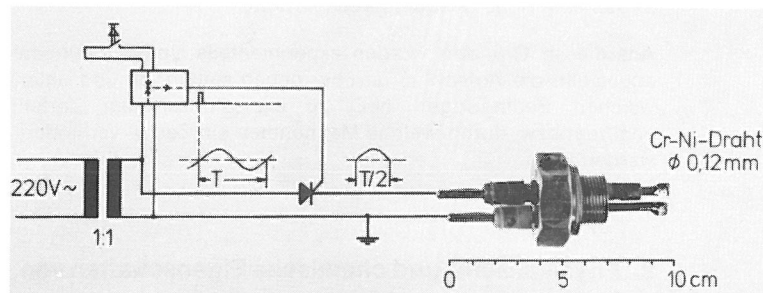
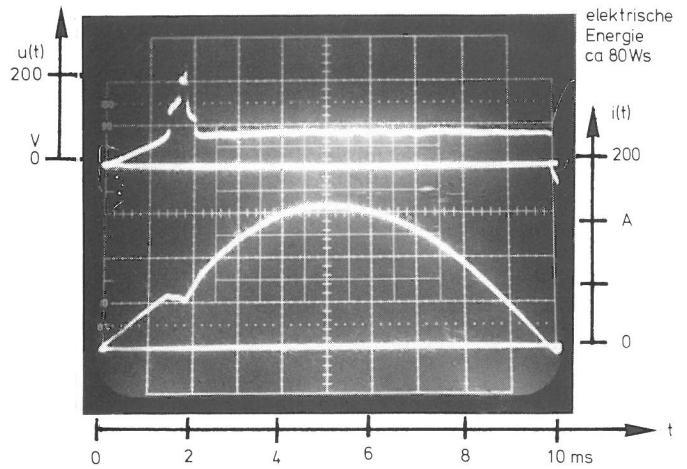


Abb. 3
Drahtzündung

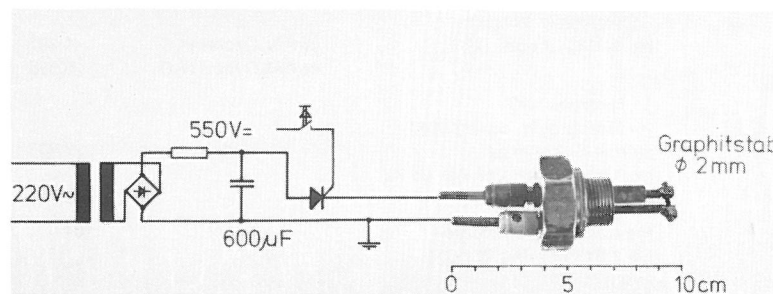
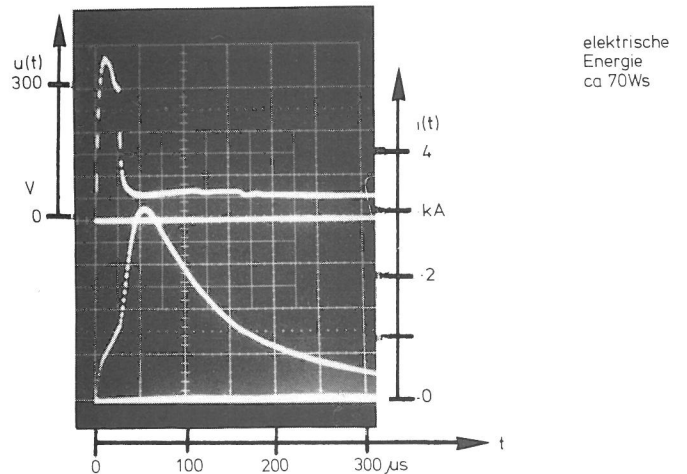


Abb. 4
Gleitfunkenzündung

Dabei handelte es sich um einen Graphitstab von 5 mm Länge und 2 mm Durchmesser, der zwischen den Haltestäben eingespannt war. Über diese Gleitfunkenstrecke wurde ein auf eine bestimmte Spannung aufgeladener Kondensator entladen.

Auch hier bildete sich nach einer Vorionisierungsphase, die nur 20 bis 50 μs dauerte, zwischen den Haltestäben eine Bogenentladung aus, die aufgrund des Ladungsabflusses vom Kondensator schon nach ca. 400 μs erlosch. Die Zündenergie dieser Anordnung ergab sich zu ca. 70 Ws. Der Vorteil dieser Zündquelle liegt u.a. darin, daß man sie im Gegensatz zur Drahtzündung ohne den Autoklav öffnen zu müssen beliebig oft anwenden kann.

Bei Beobachtung der Flammenausbreitung wurde festgestellt, daß Konvektionseinflüsse eine wesentliche Rolle spielten. Deshalb wurde zwecks näherer Untersuchung dieses Einflusses die Zündquelle vom Zentrum an den Boden des Autoklavs verlegt.

3.1.3 Versuche im Fensterautoklav mit Drahtzündung unten im Autoklav

Um die Vorgänge bei und nach der Entzündung genauer beobachten zu können, wurde ein Fensterautoklav benutzt (vergl. Abb. 5). Dieser bestand aus einem liegenden Zylinder von 155 mm innerem Durchmesser und 100 mm innerer Länge

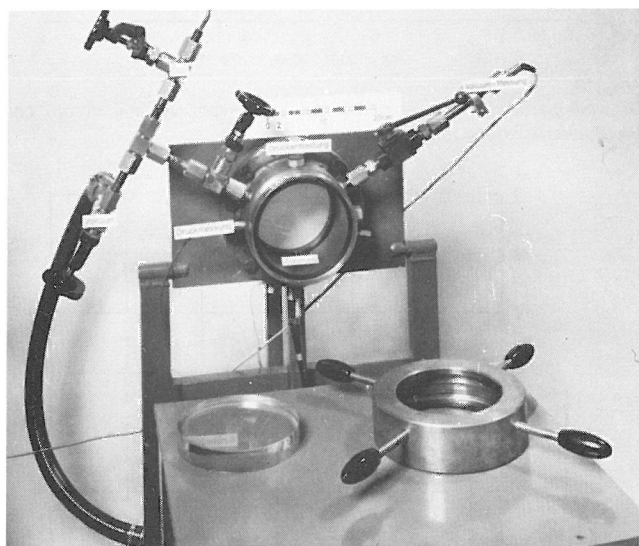


Abb. 5
Fensterautoklav

(Volumen 1,9 l), der vorn und hinten mit einer druckfesten Schauglasplatte abgeschlossen war. In den Zylindermantel konnte von unten ein Zündeinsatz eingeschraubt werden. Bedingt durch die großen Schaugläser hatte dieser Fensterautoklav gegenüber dem Kugelautoklav einen wesentlich geringeren maximalen Betriebsdruck von 25 bar. Deshalb war er zum Schutz mit einer Druckentlastungseinrichtung versehen, die bei den Versuchen bei ca. 11 bis 15 bar ansprach.

Zunächst wurden in diesem Fensterautoklav parallel zu Versuchen im Kugelautoklav, d.h. auch nach gemeinsamer Füllung der beiden durch eine Druckleitung verbundenen Autoklaven, Versuche mit der im Abschnitt 3.1.1 beschriebenen Drahtzündung angestellt.

Bei diesen Versuchen und den im Abschnitt 3.1.4 beschriebenen wurde der Reaktionsablauf im Autoklav mit einer Hochgeschwindigkeitskamera mit einer Bildfrequenz von 200 Bildern/s gefilmt.

3.1.4 Versuche im Fensterautoklav mit Gleitfunkenzündung unten

Um auch im Fensterautoklav den Einfluß der Zündquelle zu erfassen, wurde die Drahtzündung durch die im Abschnitt 3.1.2 beschriebene Gleitfunkenzündung ersetzt.

Um den Einfluß der Konvektion näher untersuchen zu können, war der ganze Fensterautoklav um eine zur Zylinderachse

senkrechte Achse drehbar aufgestellt. Einige Versuche wurden auch mit stehendem Zylinder, d.h. mit der Zündquelle in halber Höhe seitlich am Zylindermantel durchgeführt.

3.1.5 Versuche in der „Standard-Apparatur“

Als Ergebnis der Arbeit eines Dechema-Arbeitskreises war für die Ermittlung der Zündgrenzen von Gasen bei Atmosphärendruck eine Standard-Apparatur (vergl. Abb. 6; genauere Beschreibung siehe [16]) entwickelt worden. Diese besteht im

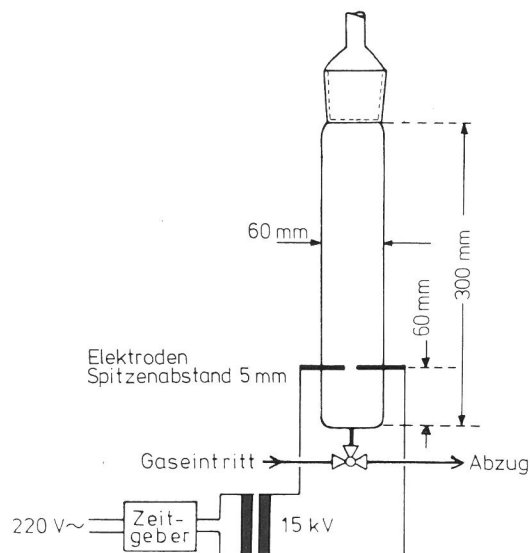


Abb. 6
Standard-Apparatur zur Bestimmung von Explosionsgrenzen

wesentlichen aus einem senkrecht stehenden unten geschlossenen Glasrohr von 60 mm innerem Durchmesser und einer Länge von 300 mm. In 60 mm Höhe über dem Boden des Rohres sind zwei sich gegenüberstehende Elektroden mit einem Spitzenabstand von 5 mm angebracht. In dieser Funkenstrecke wird mit einem Hochspannungstransformator (Leerlaufspannung 15 kV_{eff}, Nennstrom 20 mA) ein stationärer Induktionsfunke erzeugt. Bei der üblichen Funkenbrenndauer von 0,5 s wird eine Energie von etwa 3,5 Ws abgegeben. Bei den Zündversuchen war das Rohr oben mit einem Gummistopfen leicht verschlossen, so daß sich bei einer Explosion kein wesentlicher Überdruck in dem Rohr aufbauen konnte.

In diese Apparatur wurde N₂O — ohne Zusatz von Luft oder anderen Gasen — eingeleitet und beobachtet, ob sich bei Einwirkung des Induktionsfunkens Flammen von der Funkenstrecke ablösten oder andere Erscheinungen auf eine explosionsähnliche Reaktion hindeuteten, da das Kriterium $f > 1,1$ hier nicht anwendbar war.

3.1.6 Versuche in der Standard-Apparatur mit anderen Zündquellen

Abweichend von dem oben beschriebenen Standard-Versuchsaufbau wurde die Induktionsfunkenzündung durch die Draht- und die Gleitfunkenzündung ersetzt, um auch hier den Einfluß der Zündquelle vom Einfluß der Geometrie des Zündgefäßes trennen zu können.

3.1.7 Versuche im Fensterautoklav mit der Induktionsfunkenstrecke

Um zu untersuchen, wie die Zündquelle der Standardapparatur bei erhöhtem Anfangsdruck auf das N₂O wirkt, wurde diese in den Fensterautoklav eingebaut. Es konnten Zündversuche bis zu einem Anfangsdruck von 5 bar ausgeführt werden. Bei höheren Drücken wäre die Funkenstrecke zu klein geworden (Paschensches Gesetz).

3.2 Versuchsergebnisse

Nach der Zündung im Autoklav entwickelte sich in allen Fällen, in denen eine Zerfallsreaktion eingeleitet werden konnte, ein relativ langsamer Druckanstieg bis auf einen Maximaldruck p_{ex} zu einem Zeitpunkt t_{max} mit anschließendem Abfall auf einen Gleichgewichts-Enddruck p_e nach dem Ende der Reaktion und abgeschlossenem Temperaturengleich. Abb. 7 zeigt beispiel-

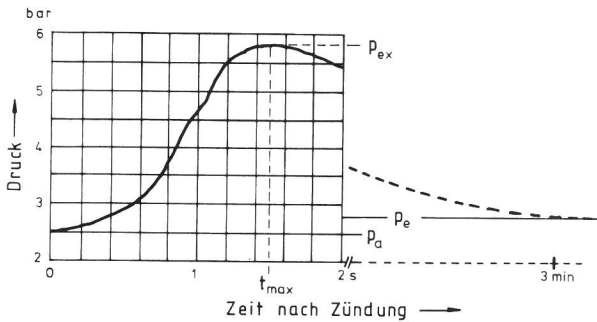


Abb. 7
Druckverlauf bei einem explosionsartigen Zerfall von N_2O .
(Kugelaotklav, Gleitfunkenzündung)

haft eine solche Druckkurve, hier für Entzündung von N_2O mittels Gleitfunkenstrecke bei 2,5 bar Anfangsdruck im Kugelaotklav. Der K_G -Wert als Kenngröße für den zeitlichen Druckanstieg, d.h. für die Heftigkeit der Explosion, ist hier mit 1,3 bar·m/s vergleichsweise gering.

Wie bereits im Abschnitt 3.1 angegeben galt ein Drucksteigerungsfaktor $f > 1,1$ als Zeichen für einen explosionsartigen Zerfall. Ein solcher konnte unter mannigfachen Bedingungen eingeleitet werden. Es soll darauf verzichtet werden, die

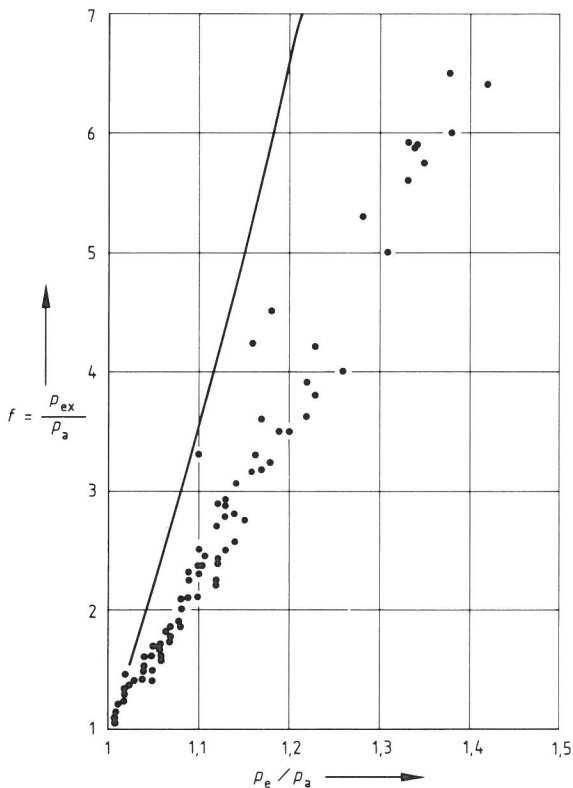


Abb. 8
Drucksteigerungsfaktor f in Abhängigkeit vom Quotienten p_e/p_a (Enddruck/Anfangsdruck)
Die eingetragenen Meßpunkte umfassen nahezu alle Zündversuche unabhängig von der Zündquelle, dem Zündgefäß und dem Anfangsdruck. Die ausgezogene Kurve gibt den theoretischen Zusammenhang nach der Bruttoformel $N_2O \rightarrow N_2 + 1/2 O_2$ ohne Berücksichtigung von Wärmeverlusten an.

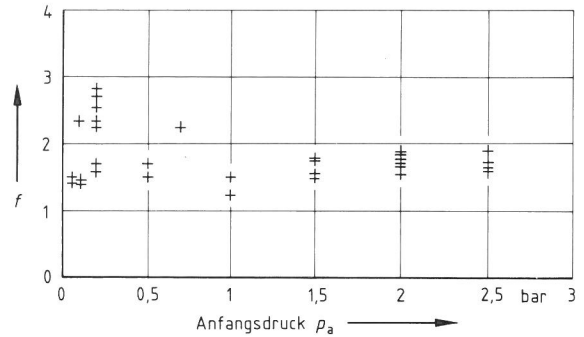


Abb. 9
Drucksteigerungsfaktor f in Abhängigkeit vom Anfangsdruck bei Drahtzündung im Kugelaotklav

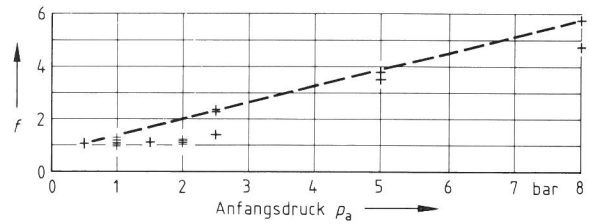


Abb. 10
Drucksteigerungsfaktor f in Abhängigkeit vom Anfangsdruck bei Gleitfunkenzündung im Kugelaotklav

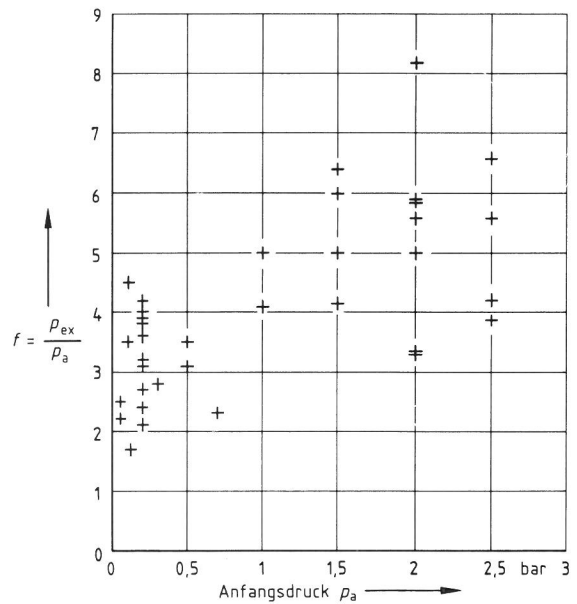


Abb. 11
Drucksteigerungsfaktor f in Abhängigkeit vom Anfangsdruck bei Drahtzündung im Fensterautoklav

Ergebnisse der vielen Zündversuche im einzelnen aufzuführen. Statt dessen sollen nur die Einflüsse der unterschiedlichen Parameter angegeben werden. Zu diesem Zweck sind in den Abbildungen 9 bis 12 die gemessenen f -Werte als Funktion des Anfangsdruckes jeweils für die Kombination einer Zündquelle mit einem Zündgefäß dargestellt.

Bemerkenswert ist, daß der Quotient p_e/p_a zum Drucksteigerungsfaktor f bei allen Zündversuchen in den Autoklaven in gleichem Zusammenhang steht (vergl. Abb. 8). Dies kann als Hinweis dafür gewertet werden, daß der Mechanismus der Reaktion immer der gleiche ist. Unter der Voraussetzung, daß die Zerfallsreaktion so verläuft, wie im Abschnitt 2.2 angegeben, kann der Wert des Quotienten p_e/p_a höchstens 1,5 werden. Da keine größeren Werte für p_e/p_a gefunden wurden, ist anzunehmen, daß diese Voraussetzung richtig ist.

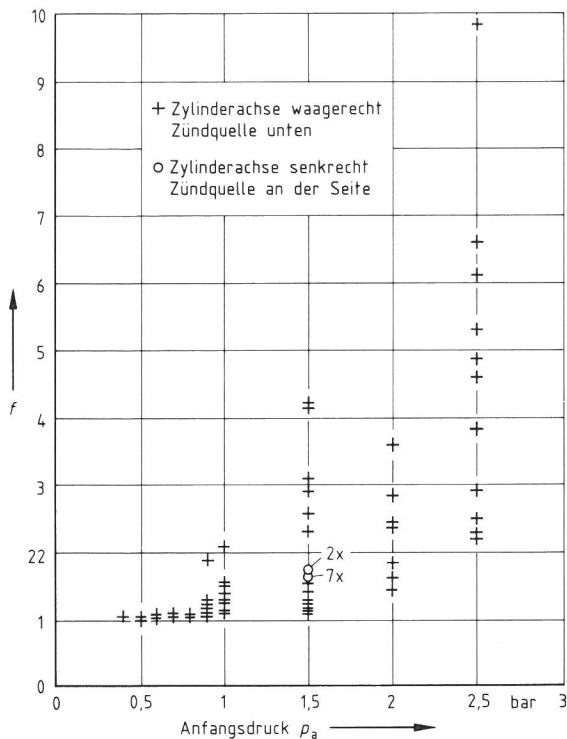


Abb. 12
Drucksteigerungsfaktor f in Abhängigkeit vom Anfangsdruck bei Gleitfunkenzündung im Fensterautoklav

3.2.1 Einfluß des Anfangsdruckes

Der Einfluß des Anfangsdruckes auf die Zerfallsfähigkeit ist nicht eindeutig. Bei höherem Anfangsdruck ergeben sich wegen des größeren Energieinhalts im gleichen Gasvolumen absolut größere Drucksteigerungen. Obwohl der Wert des Drucksteigerungsfaktors f bei gleichem Anfangsdruck große Unterschiede aufweist, läßt sich im Bereich oberhalb des Atmosphärendruckes eine steigende Tendenz der f -Werte mit zunehmendem Anfangsdruck erkennen. Im Unterdruckbereich ist bei der Drahtzündung diese Tendenz durchbrochen, wie die Abbildungen 9 und 11 zeigen.

Je höher bei einem konstanten Anfangsdruck die gemessenen maximalen f -Werte sind, desto größer sind auch die Schwankungen innerhalb einer Meßreihe.

Dieses Verhalten deutet darauf hin, daß die Ausbreitung der Zerfallsreaktion wesentlich davon abhängt, wie groß das von der Zündquelle primär erfaßte Volumen ist und wie stark die die Ausbreitung unterstützenden Vorgänge (Konvektion, Strömung, Turbulenz) sind. Mit steigendem Anfangsdruck wird die Wärmebilanz günstiger und die unterstützenden Vorgänge werden ausgeprägter, so daß sich die steigende Tendenz für die f -Werte ergibt.

3.2.2 Einfluß der Zündquelle

Bei sonst gleichen Bedingungen (Lage der Zündquelle, Geometrie, Anfangsdruck) ergaben sich zwischen den Versuchen mit den beiden Zündquellenarten „Drahtzündung“ und „Gleitfunkenzündung“ im Überdruckbereich keine signifikanten Unterschiede. Im Unterdruckbereich hingegen erwies sich die Drahtzündung wirkungsvoller als die Gleitfunkenzündung. Während mit der Gleitfunkenzündung f -Werte nahe 1 gemessen wurden, ergaben sich mit der Drahtzündung noch f -Werte bis zu 4,5 bei einem Anfangsdruck von 100 mbar (vergl. Abb. 10). Ein eindeutiger Zusammenhang zwischen Anfangsdruck und Drucksteigerungsfaktor f besteht hier nicht mehr.

Mit der Induktionsfunkenstrecke konnte in keinem der Zündgefäße ein explosionsartiger Zerfall eingeleitet werden.

Auch eine Verlängerung der Funkenbrenndauer bis zu 5 s brachte keinen Erfolg. Es wurde nur oberhalb der Funkenstrecke eine kerzenflammenähnliche Aureole beobachtet.

Die beiden Zündquellen Drahtzündung und Gleitfunkenzündung sind in ihrer Funktionsweise ähnlich. Bei beiden wird nach unterschiedlicher Vorionisierung ein Lichtbogen zwischen den Haltestäben gezündet, der durch die elektromagnetischen Kräfte in das Gas hinausgedrückt wird und erhebliche Turbulenz verursacht. Der vergleichsweise geringe Unterschied in der Zündenergie, falls unter Berücksichtigung der Meßgenauigkeit ein solcher überhaupt besteht, ist nicht von Bedeutung.

Die beiden Zündquellen unterscheiden sich durch die Art der Vorionisierung und durch die Dauer. Die glühenden Drahtteilchen, die bei der Drahtzündung weiter durch das Gas fliegen, haben mit der Entzündung nichts zu tun. Dies wird aus den Hochgeschwindigkeits-Filmaufnahmen deutlich. Die Auswertung dieser Aufnahmen hat aber gezeigt, daß bei der Drahtzündung im Unterdruckbereich das von der Zündquelle primär erfaßte Volumen wesentlich größer ist als bei höheren Anfangsdrücken. Dies erklärt das abweichende Verhalten bei Drahtzündung im Unterdruckbereich.

Die Induktionsfunkenstrecke ist eine Zündquelle mit anderen Eigenschaften, da hier nur ein schwacher Lichtbogen zeitlich und räumlich stationär zwischen den Elektroden brennt und von diesem Lichtbogen nur durch Konvektionsströmung eine sehr schwache Turbulenz in dem Gas erzeugt wird.

3.2.3 Einfluß der Geometrie des Zündgefäßes und der Lage der Zündquelle

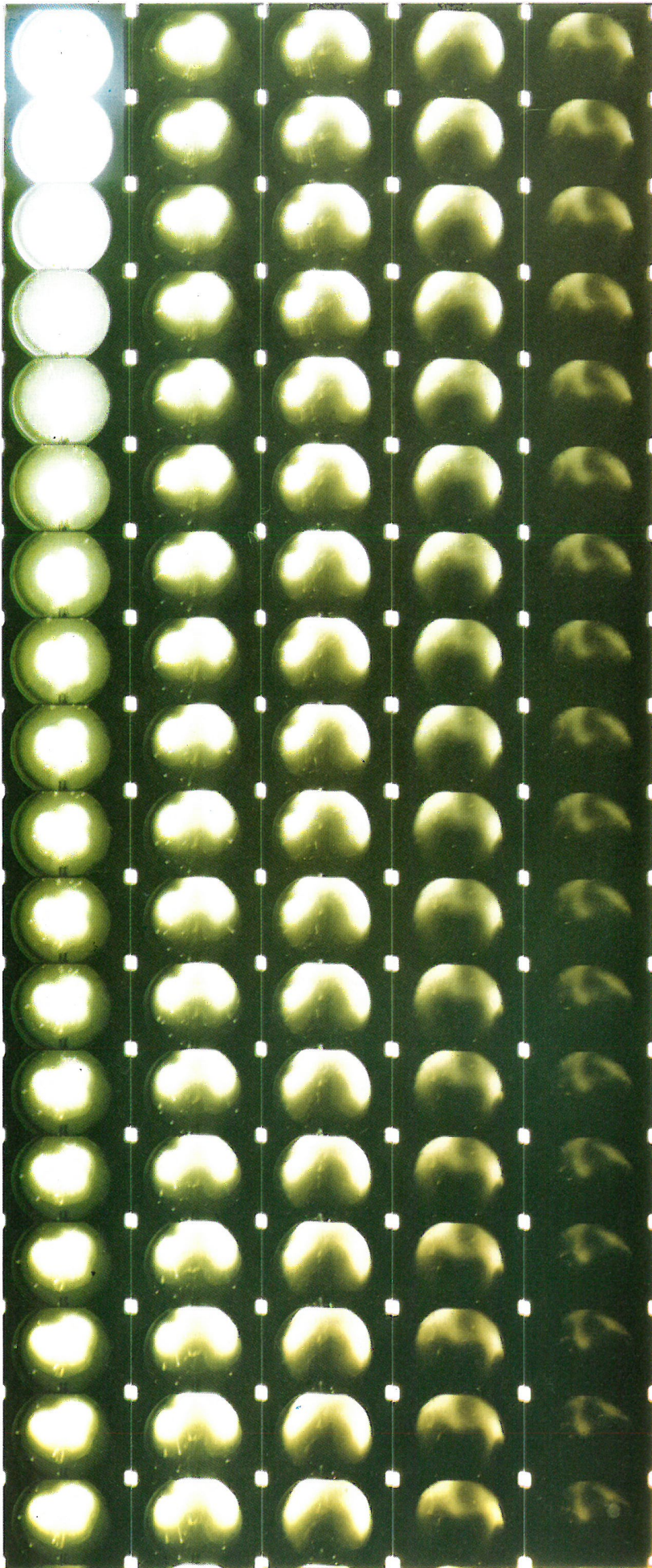
Einen wesentlichen Einfluß auf die Entwicklung der Reaktion nach der Zündung haben folgende Parameter, die die Geometrie der Kombination Zündquelle — Zündgefäß bestimmen: die Lage der Zündquelle im Gefäß (unten, in der Mitte oder oben), die Gestalt des Zündgefäßes (kugelförmig oder rohrförmig), die Struktur des Gefäßes (großer freier Raum oder durch Einbauten zerklüftet) und die Abmessungen des Gefäßes im Vergleich zu denen der Zündquelle.

Bei diesen Einflußgrößen ist vor allem von Bedeutung, ob und in welchem Maße bei und nach Einwirkung der Zündquelle starke Turbulenz und Vermischung der heißen Gase mit dem kalten unzersetzten Gas stattfinden. Dies war zu bemerken bei den im Abschnitt 3.1.3 geschilderten Parallelversuchen, d. h. nach gemeinsamer Füllung der beiden durch eine Druckleitung verbundenen Autoklaven, Kugelautoklav und Fensterautoklav. Nach gleichartiger Zündung ergaben sich im Fensterautoklav immer wesentlich größere Druckanstiege. Hier machte sich bemerkbar, daß in dem Fensterautoklav die Zündquelle eine stark turbulente Strömung in Form eines doppelten Wirbels erzeugte, während in dem Kugelautoklav nur eine relativ ungestörte Flamme in einer kegelförmigen Zone senkrecht nach oben von der Zündquelle aus brannte. Deutlich wurde dieses Verhalten auch bei Versuchen, bei denen der Fensterautoklav gekippt war und mit seiner Zylinderachse senkrecht stand (vergl. Abschnitt 3.1.3). In dieser Anordnung, in der das Schauglas oben war und die Zündquelle in die Mitte des Zylinders seitlich hereinragte, konnte eine sich kegelförmig von der Zündquelle her ausbreitende Flamme beobachtet werden. Die Druckanstiege waren verglichen mit Versuchen im liegenden Autoklav unter sonst gleichen Verhältnissen (Zündquelle, Anfangsdruck) wesentlich geringer (vergl. dazu Abb. 12).

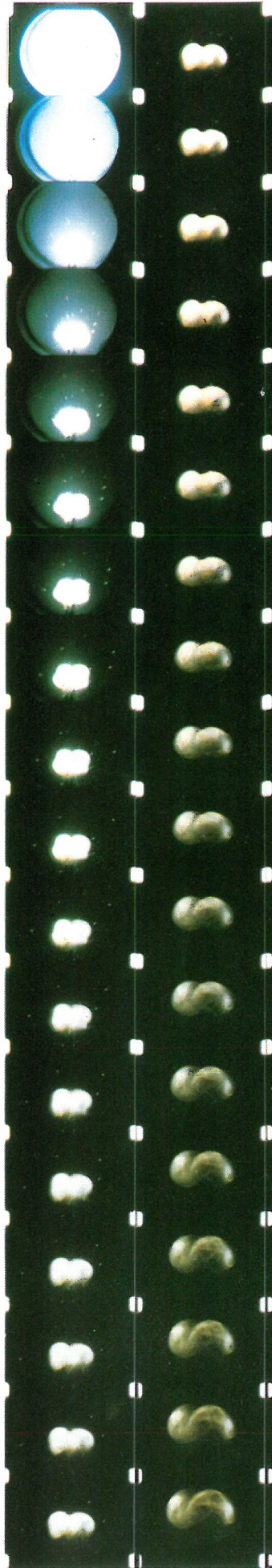
Im Zündgefäß der Standardappatur ließen sich Erscheinungen, die auf einen explosionsartigen Zerfall hindeuten, nur mit der Drahtzündung auslösen.

3.2.4 Visuelle Beobachtung und Filmaufnahmen mit einer Hochgeschwindigkeitskamera

Die visuelle Beobachtung des Reaktionsablaufes im Fensterautoklav zeigte, daß bei den meisten Versuchen mit Anfangsdrücken bis zu 3 bar nicht der gesamte Gasinhalt zerfiel. Dies war

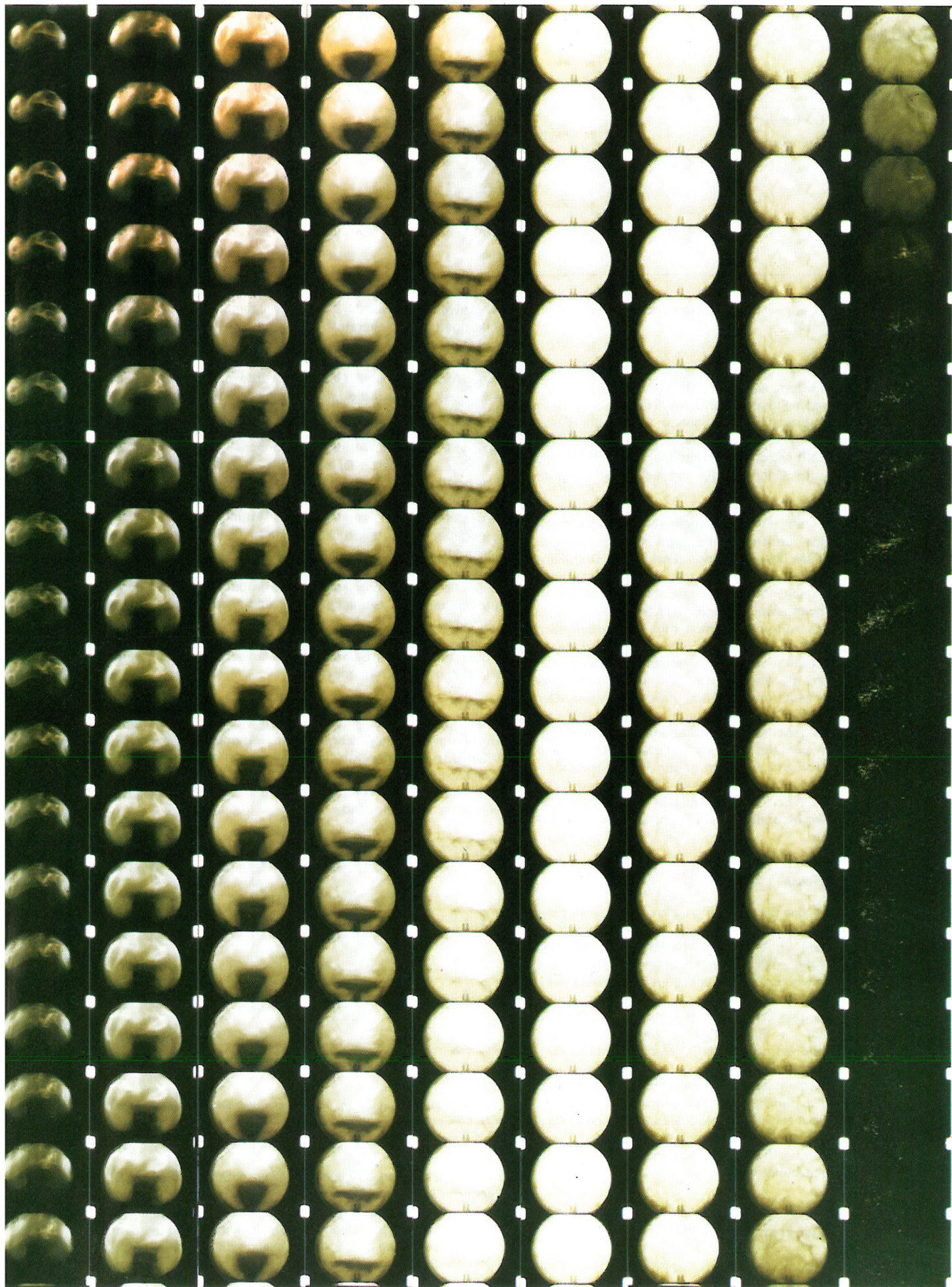


0,5 bar



2,5 bar

Abb. 13
 Zerfallsreaktionen von N_2O bei 0,5 bar und
 2,5 bar Anfangsdruck
 (Fensterautoklav,
 Drahtzündung,
 Bildfrequenz 200 /s)



Versuchsbedingungen		Versuchsergebnisse			Analysergebnisse			
Versuchsgefäß	Zündquelle	Anfangsdruck	Explosionsdruck	Drucksteigerungsfaktor	Volumengehalt an			
		p_a	p_{ex}		f	NO+NO ₂	N ₂ O	N ₂
		bar	bar		%	%	%	%
Fensterautoklav	Gleitfunken-	1,5	12,5	8,3	3,2	nicht gemessen		
Zylinderachse	zündung	1,5	12,3	8,2	3,2	nicht gemessen		
waagrecht	unten	1,5	12,3	8,2	3,4	nicht gemessen		
		1,5	13,3	8,9	3,1	3,4	65,9	27,0
		1,5	11,3	7,5	2,9	11,8	nicht gem.	
		1,5	12,5	8,3	2,9	6,4	nicht gem.	
Kugelaotoklav		8,0	46	5,8	0,8	29,6	47,8	21,4

Tabelle 2
Ergebnisse der Analysen aus dem Gasgemisch nach der Reaktion
(Vergleiche Abschnitt 3.2.5)

deutlich daran zu erkennen, daß im unteren Teil des Autoklavs keine Flammen auftraten. Nach der Reaktion waren nur im oberen vorher von den Flammen erfüllten Teil des Autoklavs braun gefärbte Reaktionsprodukte zu sehen. Das deutet darauf hin, daß das im unteren Teil des Autoklavs befindliche Gas nicht von der Reaktion erfaßt wurde. Bei Anfangsdrücken größer als 3 bar reagierte bei der Mehrzahl der Versuche der gesamte Gasinhalt.

Die Filmaufnahmen mit einer Hochgeschwindigkeitskamera bestätigten nochmals unsere in früheren Untersuchungen gewonnenen Ergebnisse über die Wirkungsweise der Drahtzündung, daß nämlich der Lichtbogen durch die elektromagnetischen Kräfte aus den Haltestäben herausgedrückt und dadurch das im Lichtbogen zwangsweise umgesetzte Gas in Form einer „Stichflamme“ in das Autoklavvolumen hinausgestoßen wird [17]. Dies führte in dem relativ kleinen Fensterautoklav zu der in Abschnitt 3.2.3 beschriebenen wirbelförmigen Strömung. Die heißen Drahtteilchen, die auch durch das ungezündete Gas flogen, lösten keine weiteren Entzündungsvorgänge aus. Der Zündvorgang bei der Gleitfunkenzündung ist so kurz (400 μ s), daß er mit der Hochgeschwindigkeitskamera leider nicht zu untersuchen ist. Man sieht auf dem Film nur, daß zwischen dem Aufblitzen des Gleitfunken und den ersten Flammerscheinungen eine Verzögerungszeit von etwa 300 ms vergeht. In Abb. 13 sind beispielhaft Ausschnitte aus Filmszenen von Versuchen mit der Drahtzündung bei 0,5 und 2,5 bar Anfangsdruck wiedergegeben.

3.2.5 Analysergebnisse

In der Tabelle 2 sind die Ergebnisse gaschromatographischer Analysen der Reaktionsprodukte zusammengestellt worden. Es ist jeweils angegeben, unter welchen Bedingungen das Gas gezündet wurde, wie die Zusammensetzung der Gasphase nach der Reaktion war und wie groß der Drucksteigerungsfaktor f war. Die Ergebnisse zeigen, daß N₂O im wesentlichen in N₂ und O₂ zerfällt. Man findet in dem Gas nach der Reaktion auch andere Stickstoffoxide, was im Einklang mit der Beobachtung braungefärbter Reaktionsprodukte (NO₂) steht. Es ist bekannt, daß bereits geringe Mengen an NO₂ eine deutliche Braunfärbung hervorrufen. Vermutlich entstehen diese anderen Stickstoffoxide erst nach dem Zerfall in dem heißen Reaktionsgas aus N₂ und O₂. Die Restanteile an nicht zerfallenem N₂O stehen im eindeutigen Zusammenhang mit den jeweiligen f -Werten, und zwar unabhängig vom Anfangsdruck und unabhängig davon, mit welchem Autoklav gearbeitet wurde.

4. Untersuchungen an Gemischen aus N₂O mit Stickstoff, Sauerstoff oder Luft

Es entstand die Frage, ob der relativ träge N₂O-Zerfall durch andere Gase zu phlegmatisieren bzw. zu verhindern ist. Wegen

der Anwendung des N₂O als Narkosemittel wurden hier die Wirkungen von Sauerstoff, Luft und dementsprechend auch Stickstoff untersucht. Die Versuche fanden parallel im Kugelaotoklav und im Fensterautoklav mit gemeinsamer Füllung beider Autoklaven statt. Gezündet wurde mit der Drahtzündung, weil diese sich als die wirkungsvollste Zündquelle erwiesen hatte. Gemessen wurde bei Anfangsdrücken von 1,0; 2,0 und 5,0 bar, in wenigen Fällen auch mit 0,5 und 1,5 bar Anfangsdruck. Dazu wurden beide Autoklaven zunächst bis auf einen Druck < 1 mbar evakuiert. Dann wurde die Verbindungsleitung abgesperrt und in dem mit einem Mischer versehenen Kugelaotoklav nach der Partialdruckmethode ein Gemisch hergestellt, indem zunächst das Fremdgas bis zu einem vorgegebenen Partialdruck und dann das N₂O bis zu einem Gesamtdruck gefüllt wurde, der etwa dem 1,2fachen des späteren Anfangsdruckes vor der Zündung entsprach. Nach ausreichender Durchmischung wurde dann auch der Fensterautoklav mit dem Gemisch gefüllt und anschließend in beiden Autoklaven der Druck auf den gewünschten Anfangsdruck abgelassen. Dann wurde die Autoklavverbindung abgesperrt und nacheinander in beiden Autoklaven gezündet und jeweils die Druck-Zeit-Kurve registriert.

In den Abbildungen 14 bis 16 ist als Ergebnis dieser Untersuchungen der Drucksteigerungsfaktor f in Abhängigkeit vom Fremdgasanteil aufgetragen. Parameter ist jeweils der Anfangsdruck. Es zeigt sich, daß durch alle drei Gase ein explosionsartiger Zerfall des N₂O verhindert wird ($f \leq 1,1$), wenn mindestens 30 % (Volumenanteil) des anderen Gases in der Mischung enthalten sind.

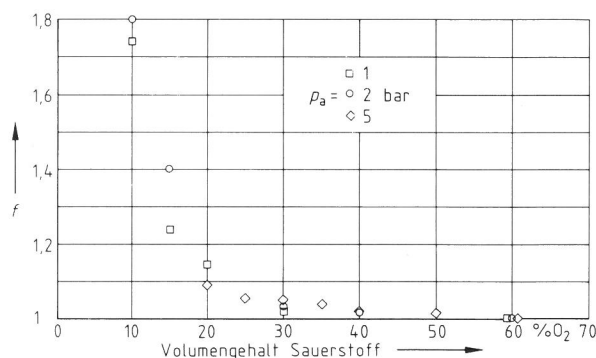


Abb. 14
Drucksteigerungsfaktor f in Abhängigkeit vom Sauerstoffgehalt im N₂O/O₂-Gemisch; (Fensterautoklav) Parameter: Anfangsdruck

Es ist anzunehmen, daß es sich hier um einen thermischen Effekt handelt, denn diese Deutung macht auch verständlich, warum der erforderliche Fremdgasanteil für alle drei Gase gleich ist. Es sind nämlich für Sauerstoff und für Stickstoff (und demzufolge auch für Gemische beider Gase) sowohl die Wärmeleitfähigkeit als auch die molare Wärmekapazität bei konstantem Volumen nahezu gleich groß.

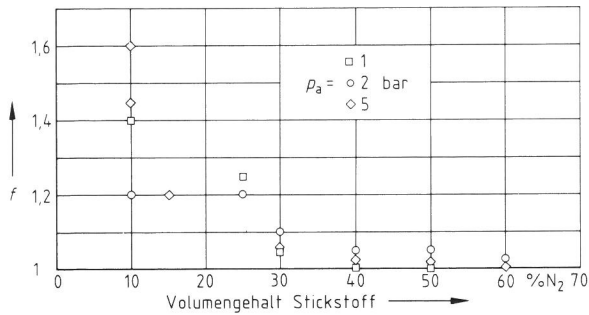


Abb. 15
Drucksteigerungsfaktor f in Abhängigkeit vom Stickstoffgehalt im N_2O/N_2 -Gemisch; (Fensterautoklav) Parameter: Anfangsdruck

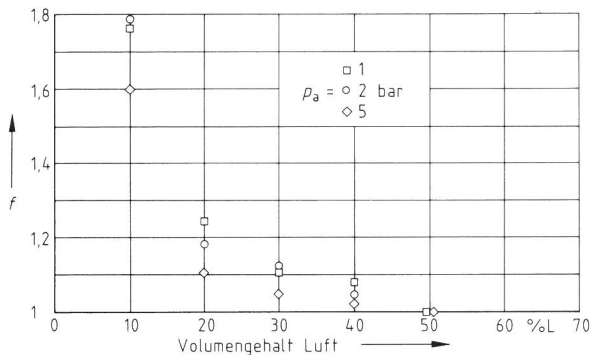


Abb. 16
Drucksteigerungsfaktor f in Abhängigkeit vom Luftgehalt im N_2O /Luft-Gemisch; (Fensterautoklav) Parameter: Anfangsdruck

5. Untersuchungen an N_2O im Phasengleichgewicht flüssig /gasförmig bei tiefen Temperaturen

In einer weiteren Versuchsreihe sollte festgestellt werden, ob und unter welchen Bedingungen N_2O zum explosionsartigen Zerfall anzuregen ist, wenn bei tiefen Temperaturen gasförmige Phase und flüssige Phase im Gleichgewicht vorliegen.

5.1 Versuchsaufbau

Die Versuche wurden in einem kühlbaren Autoklav (vergl. Abb. 17) durchgeführt. Der Innenraum des Autoklavs hatte die Form eines stehenden Zylinders von 200 mm innerem Durchmesser und einer lichten Höhe von 200 mm mit einer unten angesetzten Halbkugel von 100 mm innerem Radius. Das ergab ein freies Volumen von 8,4 l. Der untere Teil des Autoklavs war von einem Aluminiummantel umgeben, in den ein wendelförmiges

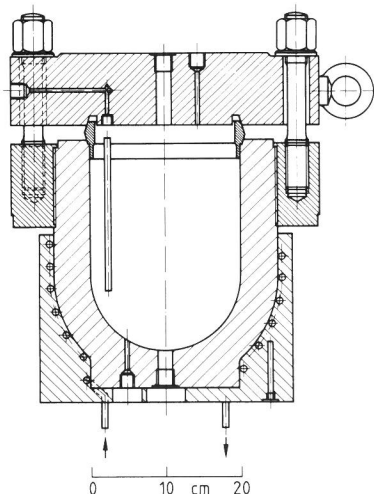


Abb. 17
Kühlbarer Hochdruckautoklav

ges Kühlrohr eingegossen war. Ein Aluminiumring mit einer zweiten Kühlwendel lag auf dem Deckel des Autoklavs. Durch beide Kühlwendeln wurde tiefkaltes Methanol aus einem Ultrakryomaten gepumpt. Der Autoklav war durch eine Umhüllung aus Glasfasermatten gegen Wärmeeinströmung isoliert. Mit dieser Anordnung war es möglich, im Inneren des Autoklavs Temperaturen bis ca. $-60\text{ }^\circ\text{C}$ zu erzeugen, wobei sich wegen der vorgegebenen Anordnung ein Temperaturgradient von unten nach oben nicht vermeiden ließ.

Zur Temperaturmessung im Autoklav dienten zwei Thermoelemente mit nachgeschalteten elektrischen Anpassungsgliedern. Die Temperaturen wurden auf einem UV-Lichtstrahloszillographen registriert. Das eine der beiden Thermoelemente war von unten in den Autoklav eingeführt, seine Meßstelle befand sich ca. 20 mm über dem Autoklavboden in der Nähe der Wand. Das andere war durch den Deckel eingeführt, seine Meßstelle befand sich in der Mitte des freien Gasraumes. Zwischen diesen beiden Meßstellen wurde stets eine Temperaturdifferenz von 4 bis 6 K gemessen.

Zur Druckmessung diente ein Dehnungsmeßstreifen-Druckmeßwandler. Er war über eine seitliche Bohrung am Autoklavdeckel angeschlossen. Elektrisch war er über einen Speiseverstärkerbaustein ebenfalls mit dem UV-Lichtstrahloszillographen verbunden, so daß das Drucksignal zusammen mit den Temperatursignalen registriert werden konnte. Weitere absperrbare Anschlüsse am Deckel führten zu einer Drehschieber-Vakuumpumpe, einem Wärmeleitungs-Vakuummeter und zu dem im Abschnitt 5.2 erwähnten Füllgefäß.

Als Zündquelle diente wiederum die Drahtzündung. Der durchschmelzende Zünddraht befand sich einmal in der Mitte des freien Gasraumes (Abschnitt 5.3.1) und bei einer zweiten Versuchsreihe (Abschnitt 5.3.2) in der flüssigen Phase.

5.2 Versuchsdurchführung

Vor jedem Versuch wurde der Autoklav evakuiert und abgewartet, bis sich die jeweils gewünschte Temperatur eingestellt hatte. Dann wurde ein kleines Zwischengefäß an dem Autoklav befestigt, in das vorher eine abgewogene Menge N_2O aus der Druckgasflasche eingefüllt worden war. Nach dem Öffnen des Ventils strömte dann N_2O -Dampf aus dem warmen Zwischengefäß in den gekühlten Autoklav. Nach dem Schließen des Ventils konnte das Zwischengefäß vom Autoklav getrennt und durch Rückwägung festgestellt werden, welche Menge an N_2O bei jedem Versuch in den Autoklav gefüllt worden war. Die Füllmenge war stets größer als der Gasinhalt des Autoklavs, so daß mit Sicherheit auch stets flüssige Phase im Autoklav vorhanden war. Es wurde dann abgewartet, bis sich Temperatur und Druck im Autoklav wieder auf konstante Werte eingestellt hatten. Daraufhin wurde mit der im Abschnitt 3.1.1 beschriebenen Zündquelle versucht, das im Autoklav befindliche N_2O zu einem explosionsartigen Zerfall anzuregen. Dabei wurde mit den oben beschriebenen Einrichtungen der zeitliche Druck- und Temperaturverlauf im Autoklav registriert.

5.3 Ergebnisse

5.3.1 Zündung in der gasförmigen Phase

Die Ergebnisse dieser Versuchsreihe sind in Abb. 18 zusammengefaßt. Aufgetragen ist auf der Abszisse der im Autoklav vor der Zündung gemessene Gleichgewichtsdampfdruck p_a und auf der Ordinate der Drucksteigerungsfaktor f , d. h. das Verhältnis des bei der Zerfallsreaktion gemessenen maximalen Druckes p_{ex} zu diesem Dampfdruck p_a . Oberhalb eines Dampfdruckes von 6 bar nimmt der Drucksteigerungsfaktor schnell hohe Werte an. Unterhalb von 5,5 bar ist er nahe 1. Definiert man als Grenzwert den Dampfdruck, bei dem der Explosionsdruck höchstens um 10 % über dem Anfangsdruck liegt ($f \leq 1,1$), so erhält man einen Grenzdruck von 5,7 bar. Gemäß Dampfdruckkurve gehört zu diesem Druck eine Sättigungstemperatur von $-55\text{ }^\circ\text{C}$.

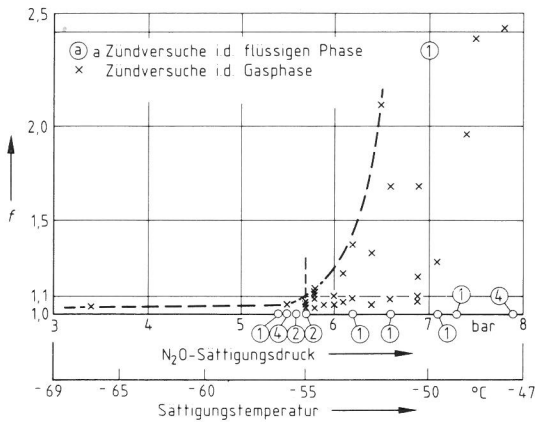


Abb. 18
Drucksteigerungsfaktor f in Abhängigkeit vom Sättigungsdruck bei tiefen Temperaturen

Die während einer Zerfallsreaktion gemessenen Temperaturerhöhungen sind wegen der Trägheit der Thermolemente nur Anhaltswerte. Sie waren naturgemäß umso höher je höher der Anfangsdruck war.

Typische Werte waren:

bei 5,8 bar Dampfdruck: unten $\Delta T = 0$ K, oben $\Delta T = 4$ K
bei 7,8 bar Dampfdruck: unten $\Delta T = 22$ K, oben $\Delta T = 150$ K.

5.3.2 Zündung in der flüssigen Phase

Bei Zündung in der flüssigen Phase konnte unter Bedingungen, bei denen eine Zündung in der Gasphase eine Zerfallsreaktion eingeleitet hätte, unter 9 Versuchen nur einmal eine Zerfallsreaktion ausgelöst werden. Bei Bedingungen, bei denen durch eine Zündung in der Gasphase eine Zerfallsreaktion nicht mehr ausgelöst werden konnte, war bei 9 Versuchen nach einer Zündung in der flüssigen Phase keinerlei Druck- oder Temperaturanstieg im Autoklav festzustellen. Man kann daher davon ausgehen, daß unterhalb der Grenzwerte für eine stabile Gasphase auch bei einer Zündung in der flüssigen Phase N_2O nicht zu einer Zerfallsreaktion anzuregen ist.

Sowohl bei Zündung in der gasförmigen Phase als auch bei dem einen Versuch mit Zerfall des N_2O bei Zündung in der flüssigen Phase ergaben sich Explosionsdrücke und vor allem Enddrücke im thermischen Gleichgewicht nach der Reaktion, die nicht so hoch waren, daß man auf eine Umsetzung größerer Anteile des N_2O im Autoklav schließen könnte. Wenn überhaupt flüssige Phase an der Reaktion beteiligt war, haben nur sehr geringe Anteile davon mitreagiert.

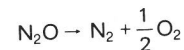
6. Zusammenfassung

Es wurde experimentell untersucht, unter welchen Bedingungen sich Distickstoffoxid (N_2O) zu einem explosionsartigen Zerfall anregen läßt. Als Kriterium für einen solchen Zerfall wurde festgestellt, ob der Drucksteigerungsfaktor f , d. h. das Verhältnis des gemessenen Explosionsdruckes p_{ex} zum Anfangsdruck p_a größer als 1,1 war. Für die Untersuchungen standen drei unterschiedliche Zündquellen, nämlich Drahtzündung, Gleitfunktzündung und Induktionsfunktzündung mit bekannten Eigenschaften (Zündenergie, Art und Dauer der Einwirkung) zur Verfügung. Die Versuche wurden bei Raumtemperatur und Anfangsdrücken von 50 mbar bis 8 bar in einem Kugelautoklav von 300 mm Durchmesser, einem zylinderförmigen Fensterautoklav von 155 mm Durchmesser und 100 mm Länge und in der Standard-Apparatur durchgeführt. Bei einigen Versuchen

wurde der Reaktionsablauf im Fensterautoklav mit einer Hochgeschwindigkeitskamera gefilmt. Außerdem wurden zur Ermittlung der Reaktionsprodukte einige gaschromatographische Analysen gemacht.

Im Überdruckbereich zeigen die f -Werte mit wachsendem Anfangsdruck steigende Tendenz. Je höher jedoch bei konstantem Anfangsdruck die gemessenen maximalen f -Werte sind, desto größer sind auch die Schwankungen innerhalb einer Meßreihe. Bei dem relativ trägen Zerfall des Distickstoffoxids haben die Art und Lage der Zündquelle und die Geometrie und Größe des Zündgefäßes einen wesentlichen Einfluß auf die Entwicklung der Reaktion. Bei diesen Einflußgrößen ist vor allem von Bedeutung, wie groß das von der Zündquelle erfaßte primär umgesetzte Volumen ist, und ob und in welchem Maße bei und nach der Einwirkung der Zündquelle starke Turbulenz und Vermischung der heißen Gase mit dem kalten unzersetzten Gas stattfinden. Mit der Induktionsfunktzündung war in keinem Fall eine explosionsartige Zersetzung einzuleiten. Mit der Drahtzündung konnten auch bei Anfangsdrücken ≤ 100 mbar erhebliche Drucksteigerungsfaktoren erzielt werden.

Zwischen dem Drucksteigerungsfaktor und dem Quotienten Gleichgewichts-Enddruck nach der Reaktion durch Anfangsdruck besteht in allen Fällen ein eindeutiger Zusammenhang. Daraus und aus dem Zusammenhang dieser Werte mit den Analyseergebnissen kann geschlossen werden, daß der Reaktionsablauf immer der gleiche ist und durch die Bruttoformel



beschrieben werden kann.

In weiteren Versuchen wurde untersucht, ob sich der Zerfall von N_2O durch Beimischung anderer Gase phlegmatisieren bzw. verhindern läßt. Es zeigte sich, daß durch Beimischung von Sauerstoff, Stickstoff oder Luft ein explosionsartiger Zerfall des N_2O verhindert wird, wenn mindestens 30 % (Volumenanteil) des anderen Gases in der Mischung enthalten sind.

Im Hinblick auf den Transport des N_2O wurde untersucht, unter welchen Bedingungen sich bei tiefen Temperaturen N_2O zum explosionsartigen Zerfall anregen läßt, wenn flüssige Phase und Gasphase im Gleichgewicht vorliegen. Es ergab sich, daß sich mit der wirksamsten hier angewendeten Zündquelle, der Drahtzündung, ein Zerfall dann nicht mehr einleiten ließ, wenn der Dampfdruck unterhalb 5,7 bar (Gleichgewichtstemperatur $-55^\circ C$) lag. Dies gilt sowohl bei Zündung in der flüssigen Phase als auch bei Zündung in der Gasphase.

Aus diesen Erkenntnissen müssen sicherheitstechnische Folgerungen gezogen werden, die den Umgang mit N_2O betreffen. Gefahr besteht vor allem in den Fällen, in denen reines N_2O bei höheren Drücken vorliegt. Hier bietet sich, soweit es nicht möglich ist, N_2O in tiefkalt verflüssigter Form zu handhaben, eine Phlegmatisierung mit anderen Gasen als Sicherheitsmaßnahme an. Es ist geplant, daß von seiten der BAM die aus den vorliegenden Ergebnissen abzuleitenden sicherheitstechnischen Empfehlungen in einer weiteren Veröffentlichung im einzelnen dargestellt werden.

Wir danken unseren Mitarbeitern H. Koch und H. Timm für die sorgfältige Ausführung der diversen Meßreihen, Herrn Dipl.-Ing. R. Kaulbars, der die Hochgeschwindigkeitsaufnahmen gefilmt hat und den Kollegen des Laboratoriums 4.21 für die Ausführung der gaschromatographischen Analysen. Nicht zuletzt sind wir unserem vorstehenden Fachgruppenleiter, Herrn Dir. u. Prof. Dr.-Ing. P. Voigtsberger, für fördernde Diskussionen zu Dank verpflichtet.

Literatur

- [1] Christen, H. R.:
Thermodynamik und Kinetik chemischer Reaktionen
Frankfurt/Main: Verlag Disterweg und Salle und
Aarau: Verlag Sauerländer, 1974, S. 28
- [2] Moore, W. J.:
Physikal Chemistry
London: Verlag Longmans Green u. Co., 4. Ausg. 1963
S. 172
- [3] JANAF Thermochemical Tables (D. R. Stull u. H. Prophet)
Washington: U.S. Govern. Print. Office, NSRDS-NBS 37
zweite Auflage 1971
- [4] Braker, W., A. L. Mossman:
Matheson Gas Data Book,
Lyndhorst, N. J.: Matheson, 1980
- [5] Encyclopedie des Gaz, S. 1053 - 1060
Amsterdam: Elsevier, 1976
- [6] Rasch, H.:
Die Explosionsgefahr des Stickoxyduls
Zeitschrift für komprim. u. flüssige Gase
7. Jahrg. 1904, S. 148, 157 u. 169
- [7] Brand, B. B., A. I. Roslovskii:
Explosive Decomposition of Nitrous Oxide
Doklady Akademii Nauk SSSR 123 (1960) No. 5,
S. 1129 - 1131
- [8] Strehlow, R. A., A. Cohen:
Limitations of the Reflected Shock Technique for Studying
Fast Chemical Reactions and its Application to the Observa-
tion of Relaxation in Nitrogen and Oxygen
Journ. Chem. Phys. 30 (1959) No. 1, S. 257 - 265
- [9] Schön, G., H. Steen:
Explosionsgrenzen und Zündtemperaturen einiger Inhalationsanaesthetica in Gemischen mit verschiedenen Sauerstoffträgern
Der Anaesthesist 17 (1968) No. 6
- [10] Zeldowitsch, Ja. B., B. I. Jakowlew:
Thermische Selbstentflammung des Distickstoffmonoxids
Doklady Akademii Nauk SSSR 19 (1938) No. 9, S. 699
- [11] Hinshelwood, C. N., C. R. Prichard:
The Catalytic Decomposition of Nitrous Oxide on the Surface of Gold: a Comparison with the Homogenous Reaction
Proc. Royal Society London A 108 (1925) S. 211 - 215
- [12] Vollmer, M., H. Kummerow:
Der thermische Zerfall des Stickoxyduls
Ztschr. phys. Chem. B 9 (1930) S. 141 - 153
- [13] Schwab, G. M., E. Glückauf:
Über den Zerfall von Stickoxydul an glühendem Platin
Ztschr. phys. Chem. B 19 (1932) S. 102 - 106
- [14] Monat, J. P., R. K. Hanson, C. H. Krüger:
Kinetics of Nitrous Oxide Decomposition
Comb. Sci. Techn. 16 (1977) S. 21 - 28
- [15] Szabo, Z. G.:
Fortschritte in der Kinetik der homogenen Gasreaktionen
S. 26 und 105 f.
Darmstadt: Steinkopff Verlag, 1961
- [16] Conrad, D.:
Ullmanns Encyklopädie der technischen Chemie, 4. Auflage, Band 5, S. 973 f.
Weinheim: Verlag Chemie, 1980
- [17] Jahresbericht 1970 der BAM, S. 141/142

Bisher erschienene Forschungsberichte der BAM

Nr. 1/September 1968

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

Nr. 2/Juli 1970 (vergriffen)

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

Nr. 3/September 1970 (vergriffen)

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

Nr. 4/Dezember 1970 (vergriffen)

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

Nr. 5/März 1971

Die Bedeutung der Netzstellenart und der 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

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

Nr. 11/Februar 1972

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

Nr. 12/Mai 1972

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

Nr. 13/Juni 1972

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

Nr. 14/Juli 1972

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

Nr. 15/August 1972

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

Nr. 16/August 1972

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

Nr. 17/August 1972

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

Nr. 18/Januar 1973

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

Nr. 19/Januar 1973

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

Nr. 20/April 1973

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

Nr. 21/Juli 1973

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

Nr. 22/Juli 1973

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

Nr. 23/November 1973

Reichs- und preußische Landesanstalten in Berlin Ihre Entstehung und Entwicklung als außeruniversitäre Forschungsanstalten und Beratungsorgane der politischen Instanzen
von Prof. Dr. rer. nat. habil. Walter Ruske

Nr. 24/November 1973

Das Brandverhalten von Holzstützen unter Druckbeanspruchung
von Dipl.-Ing. J. Stanke, Ing. grad. E. Klement und Dipl.-Ing. R. Rudolphi

Nr. 25/Dezember 1973

Über das Brandgeschehen vor der Fassade eines brennenden Gebäudes unter besonderer Berücksichtigung der Feuerbeanspruchung von Außenstützen
von Dr.-Ing. E. Knublauch

Nr. 26/August 1974

Der Elektronen-Linearbeschleuniger der BAM — Eigenschaften und erste Anwendungen —
von Dipl.-Ing. P. Jost, Dr.-Ing. P. Reimers und Dr.-Ing. P. Weise

Nr. 27/August 1974

Untersuchungen zum Schallfeld von Winkelprüfköpfen für die Materialprüfung mit Ultraschall
von Dr.-Ing. Hermann Wüstenberg

Nr. 28/August 1974

Zum Ablauf von Gasexplosionen in mit Rohrleitungen verbundenen Behältern
von Prof. Dr. rer. nat. Hans-Jürgen Heinrich

Nr. 29/August 1974

Theorie der dissipativen Luftschalldämmung bei einem idealisotropen porösen Material mit starrem Skelett für senkrechten, schrägen und allseitigen Schalleinfall
von Prof. Dr.-Ing. P. Schneider

Nr. 30/September 1974 (vergriffen)

The Application of Systems Thinking and Systems Analysis to Tribology
von Dr. Horst Czichos und Dr. Geert Salomon

Nr. 31/August 1975

Untersuchungen zur Klärung des Verhaltens thermoplastischer Kunststoffe bei Wechseldehnungsbeanspruchung
von Dr.-Ing. Gerhard Fuhrmann

Nr. 32/September 1975

Ein thermo-elektrisches Netzwerkverfahren zur Berechnung stationärer Temperatur- und Wärmestromverteilungen mit Anwendungsbeispielen
von Dipl.-Ing. Reinald Rudolphi und Dr.-Ing. Bernhard Böttcher

Nr. 33/November 1975

Die Bestimmung der Temperaturleitfähigkeit von Baustoffen mit Hilfe eines nichtstationären Meßverfahrens
von Dipl.-Ing. Armin Wagner, Dipl.-Phys. Gerhard Kieper und Dipl.-Ing. Reinald Rudolphi

Nr. 34/Januar 1976 (vergriffen)

Untersuchungen zur Vergütung von Holzwerkstoffen
von Dipl.-Forsting. Dr. rer. sylv. Hans-Joachim Deppe

Nr. 35/Januar 1976

Der Widerstand von Platten, die als Beplankungsmaterial leichter Wände verwendet werden, gegenüber dem Aufprall harter Körper — Vorschlag für ein Prüfverfahren —
von Dipl.-Ing. Ernst Limberger

- Nr. 36/Januar 1976 (vergriffen)
Wärme- und Feuchtigkeitsleitung in Beton unter Einwirkung eines Temperaturgefälles
von Dipl.-Ing. Jürgen Hundt
- Nr. 37/Februar 1976
Die stoßartige Beanspruchung leichter, nichttragender Bauteile durch einen mit der Schulter gegenprallenden Menschen — Vorschlag für ein Prüfverfahren —
von Dr.-Ing. Werner Struck
- Nr. 38/Juni 1976
Verschleißuntersuchungen an gas-, bad- und ionitriertem Stahl 42 CrMo 4
von Dr.-Ing. Karl-Heinz Habig
- Nr. 39/Juni 1976
Untersuchung der viskoelastischen Eigenschaften von Flüssigkeiten (mit nicht-Newtonschem Fließverhalten) insbesondere bei höherer Scherbeanspruchung
von Prof. Dr.-Ing. K. Kirschke und Dipl.-Phys. G. Kempf
- Nr. 40/Juni 1976
Zum Untergrundabzug bei energiedispersiven Spektren nach verschiedenen Verfahren
von Dr. rer. nat. H. Hantsche
- Nr. 41/Okttober 1976
Optische Eigenschaften cholesterinischer Flüssigkeiten
von Dr. rer. nat. Bernhard Böttcher
- Nr. 42/Okttober 1976
Ermittlung der Mindestzündenergie brennbarer Gase in Mischung mit Luft
von Dr.-Ing. Siegmund Dietlen
- Nr. 43/Okttober 1976
Das Sprödbruchverhalten geschweißter Bauteile aus Stahl mit zäh-sprödem Übergang im Bruchverhalten, dargestellt mit Hilfe der Methode des Temperaturvergleiches
von Dr.-Ing. Werner Struck
- Nr. 44/November 1976
Berechnung von räumlichen, linear elastischen Systemen, die aus finiten Stab- und Balkenelementen zusammengesetzt sind, unter Verwendung des Programms „Stab-Werk“
von Dipl.-Ing. W. Matthees
- Nr. 45/Dezember 1976
Untersuchung des Elektrodenverhaltens im Vakuum aufgedampfter Metallschichten
von Dr.-Ing. W. Paatsch
- Nr. 46/Mai 1977 (vergriffen)
Versuchsergebnisse zur Festigkeit und Verformung von Beton bei mehraxialer Druckbeanspruchung
Results of Test Concerning Strength and Strain of Concrete Subjected to Multiaxial Compressive Stresses
von Dipl.-Ing. Gerald Schickert und Dipl.-Ing. Helmut Winkler
- Nr. 47/Juni 1977
Bautechnische Einflüsse auf die Tragfähigkeit von Kunststoffdübeln für Fassadenbekleidungen
von Dr.-Ing. Arno Plank
- Nr. 48/Okttober 1977
Setzung von Fundamenten infolge dynamischer Last, angewendet auf die Fundamente einer geplanten Schnellbahn
von Dr.-Ing. U. Holzlöhner
- Nr. 49/Dezember 1977
Untersuchungen zur Anwendung von Mikrowellen in der zerstörungsfreien Prüfung
von Dr.-Ing. Günther Wittig
- Nr. 50/Juni 1978 (vergriffen)
Zur Meßtechnik für die Sicherheitsbeurteilung und -überwachung von Spannbeton-Reaktordruckbehältern
von Prof. Dipl.-Phys. Norbert Czaika, Dipl.-Phys. Norbert Mayer, Dipl.-Ing. Claus Amberg, Dipl.-Ing. Götz Magiera, Dr.-Ing. Götz 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/Oktober 1978
Magnetisches Verhalten dünner Eisenschichten bei mechanischer Wechselbeanspruchung
von Dr.-Ing. Harro Sander
- Nr. 55/November 1978
Beobachtung und Orientierungsbestimmung der Oberflächenkristallite polykristalliner 99,999 %-Al-Proben bei Biegewechselbeanspruchung
von Dr.-Ing. Dieter Klaffke
- Nr. 56/Januar 1979
Stabilität von Sandwichbauteilen
von Dipl.-Ing. W. Brünner und Prof. Dr.-Ing. C. 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 Farbmeterik mit Hilfe des Gegenfarbensystems
von Dr. Klaus Richter
- Nr. 62/Dezember 1979
Geomagnetobiologisch bedingter Zusammenhang zwischen der Fraßaktivität von Termiten und der Zahl der Sterbefälle
von Dir. u. Prof. Dr.-Ing. Wolfgang Gerisch und Prof. Dr. habil. Dr. h. c. Günther Becker
- Nr. 63/Dezember 1979
Untersuchungen an Stopfbuchsen von Ventilen und Schiebern für Gase
von Dipl.-Ing. E. Behrend und Dipl.-Ing. J. Ludwig
- Nr. 64/Februar 1980
Ermittlung der Schwingungserregung beim Betrieb schienengebundener Fahrzeuge in Tunneln sowie Untersuchung des Einflusses einzelner Parameter auf die Ausbreitung von Erschütterungen im Tunnel und dessen Umgebung
von Dr.-Ing. Werner Rucker
- Nr. 65/Februar 1980
Untersuchungen über den Einfluß des Spannungszustandes auf bruchmechanische Kennwerte
von Dr.-Ing. Peter Schmidt, Dr.-Ing. Dietmar Aurich, Dr.-Ing. Rolf Helms, Dr.-Ing. Helmut Veith und Dr.-Ing. Josef Ziebs
- Nr. 66/Mai 1980
Auswirkung von Druckentlastungsvorgängen auf die Umgebung
von Dr. rer. nat. Martin Hattwig
- 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 vollezentrischen Präzisions-Goniometers
von Dr. rer. nat. Dieter Petersohn
- Nr. 69/Juni 1980
Untersuchungen zur Integrität des Liners von Reaktorsicherheitshüllen (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 instationärer Temperaturverteilungen mit Anwendungen aus dem Brand- und Wärmeschutz

von Dr.-Ing. Reinald Rudolphi 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 Kalttribneigung 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 Kerbschlagbiegeversuches
Assessment of the mechanical behaviour of materials in the notched bar impact test**

von Rolf Helms, Hans-Joachim Kühn und Siegmund Ledworuski

Nr. 83/Juli 1982

Tribologisches Verhalten von thermoplastischen Kunststoffen — Kontaktdeformation, Reibung und Verschleiß, Oberflächenuntersuchungen —

von Prof. Dr.-Ing. Horst Czichos und Dr.-Ing. Paul Feinle

Nr. 84/Juli 1982

Übertragbarkeit der Ergebnisse von Brandprüfungen im Kleinprüfstand (Vergleichsversuche)

von Dipl.-Inform. Renate Müller und Dr.-Ing. Reinald Rudolphi

Nr. 85/ISBN 3-88314-231-X/Okttober 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

Kinetic Load Bearing Capacity of Impulsively Loaded Reinforced Concrete Members

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

