

BIA-Report 12/97

Brenn- und Explosionskenngrößen
von Stäuben



BAM



DECHEMA



HVBG

Hauptverband der
gewerblichen
Berufsgenossenschaften

An diesem Report haben mitgewirkt: DMT-Gesellschaft für Forschung und Prüfung mbH, Fachstelle für Brand- und Explosionsschutz über Tage - Bergbau-Versuchsstrecke - BVS, Dortmund; Berufsgenossenschaft Nahrungsmittel und Gaststätten - BGN/Forschungsgesellschaft für angewandte Systemsicherheit und Arbeitsmedizin e.V. - FSA, Mannheim; CHEMSAFE - Datenbank für bewertete sicherheitstechnische Kenngrößen der Deutschen Gesellschaft für Chemisches Apparatewesen, Chemische Technik und Biotechnologie e.V. - DECHEMA, Frankfurt am Main/Bundesanstalt für Materialforschung und -prüfung - BAM, Berlin/Physikalisch-Technische Bundesanstalt - PTB, Braunschweig; Henkel KGaA, TTA-Sicherheitstechnik, Düsseldorf.

Dieser Report entstand mit finanzieller Unterstützung der Europäischen Kommission, Generaldirektion V - Beschäftigung, Arbeitsbeziehungen und soziale Angelegenheiten, Brüssel und Luxemburg.

Verfasser: H. Beck, N. Glienke, C. Möhlmann
HVBG, Berufsgenossenschaftliches Institut für
Arbeitssicherheit — BIA

Herausgeber: Hauptverband der gewerblichen Berufsgenossenschaften
(HVBG)
Alte Heerstraße 111, 53757 Sankt Augustin
Tel.: 02241 / 231 - 01
Fax: 02241 / 231 - 1333
Internet: <http://www.hvbg.de>
— November 1997 —

Satz und Layout: BIA, Referat 3.4

Umschlag: Dominik Pesch, EDV & Layout-Service, Bonn

Druck: Druckerei Plump OHG, Rheinbreitbach

ISBN: 3-88383-468-8

ISSN: 0173-0387

Kurzfassung

Als Grundlage zum sicheren Handhaben brennbarer Stäube und zum Projektieren von Schutzmaßnahmen gegen Staubexplosionen in stauberzeugenden und -verarbeitenden Anlagen werden wichtige Brenn- und Explosionskenngrößen von annähernd 4300 untersuchten Staubproben aus nahezu allen Bereichen der gewerblichen Wirtschaft zusammenfassend dargestellt. Die angewandten Untersuchungsverfahren werden beschrieben, und es wird auf weitere Einflußgrößen hingewiesen.

Da die Brenn- und Explosionskenngrößen in erheblichem Umfang sowohl vom jeweiligen Staubzustand als auch von den Bestimmungsverfahren abhängigen, wird die Bedeutung der "Grenzen der Anwendbarkeit" besonders hervorgehoben. Die Anwendungsgrenzen müssen vom Benutzer beachtet werden, da es andernfalls zu folgenschweren Fehleinschätzungen beim Beurteilen von Gefahren oder beim Auslegen von Schutzmaßnahmen kommen kann.

Abstract

Important combustion and explosion characteristics of approximately 4300 dust samples from virtually all sectors of industry were determined as a basis for the safe handling of combustible dusts and for the planning of preventive and protective measures against dust explosions in dust-generating and processing plants. The test methods applied are described. Attention is also drawn to further influencing factors.

As the numerical values of the characteristics depend to a large extent on the determination methods, the importance of the "limits of applicability" is emphasized. The application limits must be noted by the user, otherwise faulty assessments with serious consequences may occur in the evaluation of hazards or in the design of preventive and protective measures.

Résumé

Près de 4300 échantillons de poussières en provenance de presque tous les secteurs de l'industrie ont fait l'objet d'analyses afin de déterminer des caractéristiques importantes de combustion et d'explosion; en effet, ces caractéristiques doivent servir de base au maniement sûr des poussières inflammables et à l'étude de mesures de prévention et de protection contre les coups de poussière dans les installations générant et transformant des poussières. Les méthodes d'investigation appliquées sont décrites et d'autres facteurs d'influence sont mentionnés.

Etant donné que les caractéristiques de combustion et d'explosion dépendent, dans une très grande mesure, à la fois de l'état de la poussière et de la méthode de détermination, l'importance des "limites de l'applicabilité" est tout particulièrement soulignée. L'utilisateur doit impérativement respecter les limites d'application, car il peut sinon se produire de graves erreurs lors de l'appréciation des dangers ou lors de l'établissement de mesures de prévention et de protection.

Resumen

Tomando unas 4.300 pruebas de polvo de prácticamente todos los sectores de la industria se han determinado sus parámetros característicos de combustión y explosión. Sobre esta base se desarrollaron medidas dirigidas a una manipulación segura de polvos inflamables así como a la protección contra explosiones de polvo en las plantas de generación y procesamiento de polvo. Se describen los métodos de análisis haciendo referencia también a otros factores de influencia.

Dado que los parámetros característicos de combustión y explosión dependen en gran medida tanto de la condición del polvo como también de los métodos de determinación, se hace especial hincapié a la importancia de "los límites de aplicación". Tales límites han de ser observados por el usuario ya que, en caso contrario, pueden producirse evaluaciones erróneas acarreado consecuencias graves a la hora de valorar los peligros o de proyectar medidas preventivas adecuadas.

Inhaltsverzeichnis

Seite

1	Einleitung	6
2	Begriffsbestimmungen/Kenngrößen	8
3	Schutzmaßnahmen und zu beachtende Kenngrößen	10
4	Untersuchungsschema	11
5	Untersuchungsverfahren	13
6	Einfluß verschiedener Parameter auf das Explosionsverhalten	23
7	Grenzen der Anwendbarkeit	28
8	Schrifttum	30
9	Erläuterungen zum Tabellenwerk	32
	Tabellenwerk Brenn- und Explosionskenngrößen von Stäuben	35
	Stichwortverzeichnis der Stoffe	447

1 Einleitung

Der sichere Umgang mit feinteiligen Feststoffen (z.B. Pulver, Mehl, Staub) setzt voraus, daß ihre die Sicherheit beeinflussenden Eigenschaften bekannt sind. Dies sind neben gesundheitlichen Aspekten auch die Brennbarkeit und die Explosionsfähigkeit. Je umfassender die Kenntnisse über das Brenn- und Explosionsverhalten sind, desto sinnvoller können erforderliche Schutzmaßnahmen getroffen werden.

In Zusammenarbeit mit der Bergbau-Versuchsstrecke (BVS) und mit finanzieller Unterstützung des Hauptverbandes der gewerblichen Berufsgenossenschaften wurde bereits Ende der 70er Jahre ein Forschungsvorhaben zum Bestimmen brenn- und explosionstechnischer Kenngrößen repräsentativer Stäube konzipiert und durchgeführt. Das Ergebnis wurde 1980 als Forschungsbericht Staubexplosionen, Brenn- und Explosions-Kenngrößen von Stäuben, veröffentlicht [1].

Für mehr als 800 Stäube und staubförmige Produkte wurden Brenn- und Explosionskenngrößen ermittelt. Wenn auch nicht jeweils alle sicherheitstechnischen Kenngrößen eines Stoffes aufgeführt wurden, so stellen die Daten des Tabellenwerks für die Praxis der Arbeitssicherheit doch eine hilfreiche Orientierungsgrundlage dar und wurden insbesondere von Sicherheitsfachkräften und Aufsichtsbehörden dankbar angenommen.

Im Rahmen der Loseblattsammlung des BIA-Handbuchs bot sich die Gelegenheit, einem häufig vorgetragenen Wunsch nach Veröffentlichung weiterer Kenngrößen Rechnung zu tragen. Neben Daten von den Prüfstellen Bergbau-Versuchsstrecke - BVS und Berufsgenossenschaftliches Institut für Arbeitssicherheit - BIA wurden auch Daten der bei der Berufsgenossenschaft Nahrungsmittel und Gaststätten - BGN eingerichteten Prüfstelle mit aufgenommen, so daß die zweite Ausgabe des Tabellenwerks explosionstechnische Kenngrößen von nahezu 1900 Stäuben beinhaltet. Neu waren zwei zusätzliche Tabellen mit Angaben über Mindestzündenergien und Sauerstoffkonzentrationen [2].

Im Rahmen eines von der Kommission der Europäischen Gemeinschaft geförderten Projekts wurden in erheblichem Umfang weitere Datensätze mit von verschiedenen Prüfstellen ermittelten Kenngrößen in das Tabellenwerk integriert. Das Tabellenwerk enthält nun Datensätze von annähernd 4300 Staubproben.

Der damit erreichte Umfang des Tabellenwerks sprengt den Rahmen des BIA-Handbuchs, so daß künftig eine Veröffentlichung als BIA-Report erfolgen wird. Das Ergebnis des Projekts erscheint daher sowohl in englischer als auch in deutscher

Sprache bereits im BIA-Report-Format. Dieser Forschungsbericht soll in erster Linie Experten beim Beurteilen von Staubexplosionsgefahren und beim Abschätzen der mit dem Umgang mit brennbaren Stäuben verbundenen Risiken zur Verfügung stehen.

Die an dem EU-Projekt mit Datensätzen beteiligten Prüfstellen sind:

- Berufsgenossenschaftliches Institut für Arbeitssicherheit - BIA, Sankt Augustin
- DMT-Gesellschaft für Forschung und Prüfung mbH, Fachstelle für Brand- und Explosionsschutz über Tage - Bergbau-Versuchsstrecke - BVS, Dortmund
- Berufsgenossenschaft Nahrungsmittel und Gaststätten - BGN/Forschungsgesellschaft für angewandte System-sicherheit und Arbeitsmedizin e.V. - FSA, Mannheim

- CHEMSAFE - Datenbank für bewertete sicherheitstechnische Kenngrößen, Deutsche Gesellschaft für Chemisches Apparatewesen, Chemische Technik und Biotechnologie e.V. - DECHEMA, Frankfurt am Main/Bundesanstalt für Materialforschung und -prüfung - BAM, Berlin/Physikalisch-Technische Bundesanstalt - PTB, Braunschweig

- Henkel KGaA, TTA-Sicherheitstechnik, Düsseldorf.

Die Untersuchungsverfahren, die den im Tabellenwerk aufgeführten Kenngrößen zugrunde liegen, sind in verschiedenen nationalen und internationalen Normen beschrieben [3 bis 6]. Wesentliche Grundlage für dieses Tabellenwerk ist die VDI-Richtlinie 2263-1 [3]. Die verwendeten Begriffe sind, soweit möglich, bereits den Definitionen der EN 1127-1 [7] angepaßt.

2 Begriffsbestimmungen/Kenngrößen

Explosion

Schnell ablaufende Verbrennungsreaktion mit Anstieg der Temperatur, des Druckes oder beider gleichzeitig.

K_{St} -Wert

Staub- und prüfverfahrensspezifische Kenngröße, die sich aus dem kubischen Gesetz errechnet. Sie ist zahlenmäßig gleich dem Wert für den maximalen zeitlichen Druckanstieg im 1-m³-Behälter bei den in den Richtlinien VDI 3673, Blatt 1 und VDI 2263, Blatt 1 sowie in ISO 6184/1 festgelegten Prüfbedingungen.

Kubisches Gesetz

Volumenabhängigkeit des maximalen zeitlichen Druckanstiegs

$$(dp/dt)_{max} \cdot V^{1/3} = konst = K_{St}.$$

Maximaler Explosions(über)druck p_{max}

Unter vorgeschriebenen Versuchsbedingungen ermittelter maximaler Druck, der in einem geschlossenen Behälter bei der Explosion eines Staubes im Gemisch mit Luft auftritt.

Maximaler zeitlicher Druckanstieg $(dp/dt)_{max}$

Unter vorgeschriebenen Versuchsbedingungen ermittelter höchster Wert für den zeitlichen Druckanstieg, der bei der Explosion eines Staubes in einem geschlossenen Behälter auftritt (siehe auch "Kubisches Gesetz").

Medianwert MW

Wert für die mittlere Korngröße (50 Gew.-% des Staubes sind gröber und 50 Gew.-% sind feiner als der Medianwert).

Mindestzündenergie MZE oder E_{min}

Unter vorgeschriebenen Versuchsbedingungen ermittelte, kleinste, in einem Kondensator gespeicherte elektrische Energie, die bei Entladung ausreicht, das zündwilligste Gemisch eines explosionsfähigen Staub/Luft-Gemisches zu entzünden.

Mindestzündtemperatur einer Staubschicht von 5 mm Dicke (Glimmtemperatur) GT

Unter vorgeschriebenen Versuchsbedingungen ermittelte niedrigste Temperatur einer heißen Oberfläche, bei der eine Staubschicht von 5 mm Dicke entzündet wird.

Mindestzündtemperatur einer Staubwolke (Zündtemperatur) ZT

Unter vorgeschriebenen Versuchsbedingungen ermittelte niedrigste Temperatur einer heißen Oberfläche, bei der sich das zündwilligste Gemisch des Staubes mit Luft entzündet.

Sauerstoffgrenzkonzentration SGK oder O₂-GK

Unter vorgeschriebenen Versuchsbedingungen ermittelte höchste Sauerstoffkonzentration in einem Staub/Luft/Inertgas-Gemisch, in dem eine Explosion nicht auftritt.

Staub

Feinzerteilter Feststoff beliebiger Form, Struktur und Dichte unterhalb einer Korngröße von ca. 500 µm.

Staubexplosionsklassen

Klassen, in die Stäube aufgrund ihrer K_{St}-Werte eingeordnet werden.

Staubexplosionsklasse	K _{St} -Wert in bar · m · s ⁻¹
St 1	> 0 bis 200
St 2	> 200 bis 300
St 3	> 300

Staub/Luft-Gemisch

In Luft aufgewirbelter Staub (Staubwolke). Kennzeichnende Größe ist die Staubkonzentration.

Untere Explosionsgrenze UEG

Untere Grenze des Konzentrationsbereichs, in dem ein Staub im Gemisch mit Luft zur Explosion gebracht werden kann.

3 Schutzmaßnahmen und zu beachtende Kenngrößen

Sowohl nach den Explosionsschutz-Richtlinien und der VDI 2263 [8,3] als auch nach den neuen Europäischen Regelwerken [7,9,10] werden zwei Kategorien von Schutzmaßnahmen unterschieden:

- Vorbeugender Explosionsschutz - (Vermeiden von Explosionen)
- Konstruktiver Explosionsschutz - (Vermeiden gefährlicher Auswirkungen von Explosionen)

Die Maßnahmen des vorbeugenden Explosionsschutzes dienen dem Ziel, durch Vermeiden von Explosionsvoraussetzungen das

Eintreten einer Explosion zu verhindern. Ist dieses Schutzziel nicht oder nur mit sehr großem Aufwand erreichbar, so kann vergleichbare Sicherheit dadurch erreicht werden, daß die Auswirkungen einer nicht vermeidbaren Explosion auf ein unbedenkliches Maß begrenzt werden.

Für ein sachgerechtes Auswählen und Dimensionieren von Schutzmaßnahmen ist die Kenntnis der brenn- und explosionstechnischen Kenngrößen der zu handhabenden Stäube erforderlich (s. Tabelle 1).

Schutzmaßnahmen	Zu beachtende Kenngrößen
Vermeiden brennbarer Stäube Konzentrationsbegrenzung Inertisierung Vermeiden von Zündquellen	Brennbarkeit, Explosionsfähigkeit Explosionsgrenzen Sauerstoffgrenzkonzentration Mindestzündenergie, Zündtemperatur, Glimmtemperatur, Selbstentzündungsverhalten, exotherme Zersetzung, elektrostatisches Verhalten, Schlagempfindlichkeit, Schwelppunkt
Explosionsfeste Bauweise Explosionsdruckentlastung Explosionsunterdrückung	Maximaler Explosionsüberdruck K_{St} -Wert und maximaler Explosionsüberdruck K_{St} -Wert und maximaler Explosionsüberdruck

Tabelle 1: Zuordnung von Schutzmaßnahmen zu Kenngrößen

Hinweise für das Durchführen der Schutzmaßnahmen sind den im Schrifttum aufgeführten Richtlinien und Veröffentlichungen

zu entnehmen. Besonders hervorzuheben sind hier die VDI 2263 [3] und die EN 1127-1 [7].

4 Untersuchungsschema

Für ein sicherheitstechnisches Beurteilen von Anlagen und Verfahren ist die umfassende Kenntnis des Brenn- und Explosionsverhaltens der beteiligten Stoffe erforderlich. Hierzu muß zunächst die chemische Zusammensetzung der Stoffe bekannt sein. Läßt sich die Oxidierbarkeit eines Stoffes ausschließen, kann auf ein Untersuchen dieses Stoffes verzichtet werden. Er ist dann als nichtbrennbar und nichtexplosionsfähig zu bezeichnen.

Ist eine Oxidierbarkeit anzunehmen oder kann sie nicht ausgeschlossen werden, müssen die Kenngrößen experimentell bestimmt werden. Bislang ist es nicht möglich, aus Grunddaten, wie z.B. der Verbrennungswärme, diese Kenngrößen in hinreichendem Umfang zu berechnen. Ein in der Praxis bewährtes Schema zum umfassenden Untersuchen des Brenn- und Explosionsverhaltens ist in Bild 1 wiedergegeben [3,7,8,11,12,14,18,24].

Die Kenngrößen sollten zunächst an Feinstäuben ermittelt werden, um auch die kritischsten in der Praxis zu erwartenden Zustände zu erfassen. Dies gilt in besonderem Maße, wenn es im Prozeß zu einer Änderung des Feinheitsgrades oder zum Anreichern von Feinanteilen kommt (z.B. durch Mahlen, Abrieb, Absaugen oder Ablagern). Abgelagerter Staub wird hierzu im allgemeinen in der Fraktion $< 250 \mu\text{m}$ und aufgewirbelter Staub in der Fraktion $< 63 \mu\text{m}$ untersucht. Gegebenenfalls kann es erforderlich sein, die Testprobe durch entsprechendes Aufbereiten herzustellen.

Je nach Fragestellung kann es darüber hinaus jedoch sinnvoll bzw. notwendig sein, den Staub, auch ohne ihn besonders aufzubereiten, also im „betriebsmäßigen Zustand“ zu untersuchen.

4 Untersuchungsschema

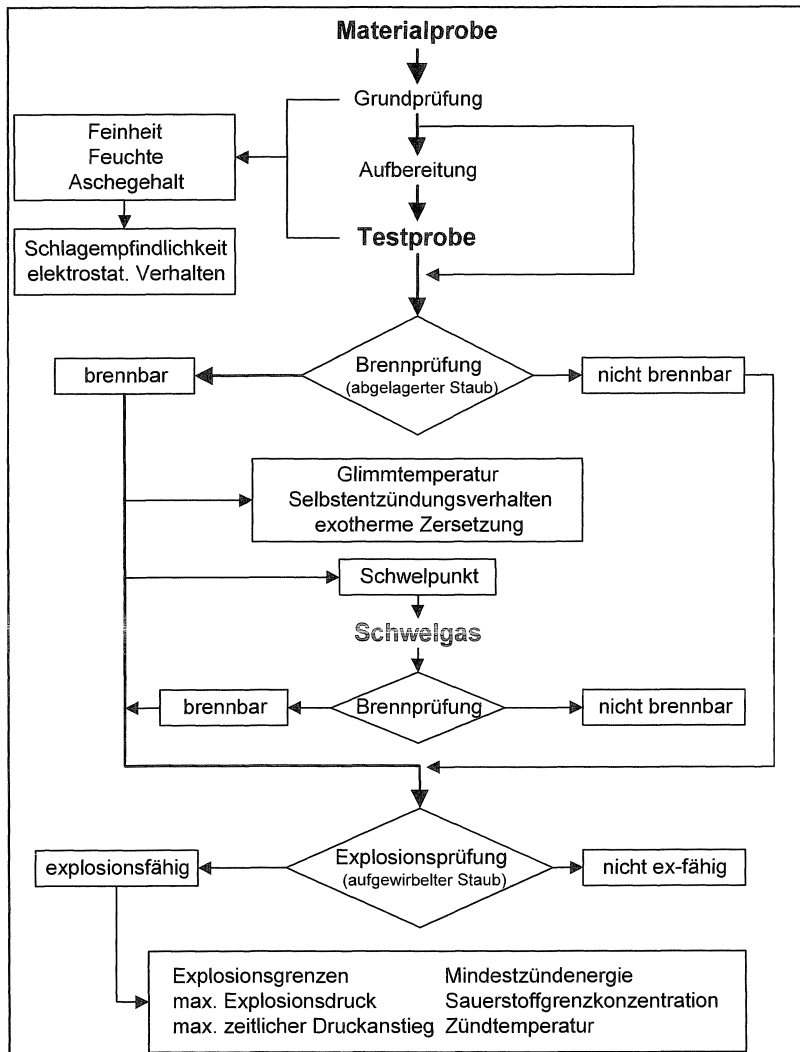


Bild 1: Untersuchungsschema zum Brenn- und Explosionsverhalten von Stäuben

5 Untersuchungsverfahren

Die im Tabellenwerk zusammengestellten Kenngrößen sind entsprechend den nachfolgend kurz beschriebenen Verfahren bestimmt worden.

Korngrößenverteilung, Medianwert

Die Korngrößenverteilung eines Staubes wird grundsätzlich durch eine Siebanalyse ermittelt. Dazu wird der zu untersuchende Staub auf genormten Prüfsieben abgeseibt und der Siebrückhalt gewogen. Wird der Rückhalt in Gewichtsprozent im RRSB-Netz gegen den Korndurchmesser aufgetragen, so erhält man eine Verteilungskurve, aus der der Medianwert des untersuchten Staubes abzulesen ist. Der Medianwert kann zur groben Feinheitscharakterisierung der Staubprobe herangezogen werden. Ist eine Siebanalyse nicht durchführbar, werden zum Bestimmen der Korngrößenverteilung Naß- bzw. Sichtverfahren angewandt.

Feuchte

Die Feuchte des zu untersuchenden Materials wird durch Rückwiegen einer bis zur Gewichtskonstanz schonend getrockneten Probe ermittelt.

Untere Explosionsgrenze

Die untere Explosionsgrenze ergibt sich aus den nachfolgend beschriebenen Explosions-

versuchen zum Bestimmen von p_{\max} und K_{St} . Näherungsweise läßt sie sich auch aus den Untersuchungen in der modifizierten Hartmann-Apparatur abschätzen.

Maximaler Explosionsdruck, maximaler zeitlicher Druckanstieg, K_{St} -Wert

Zuverlässige Werte für diese Explosionskenngrößen von Stäuben werden erhalten, wenn zu ihrer Ermittlung ein der Kugelform angenähertes Gefäß mit einem Volumen ≥ 20 l verwendet wird. Den Tabellenwerten liegen Untersuchungen im 1-m³-Behälter und/oder in der 20-l-Kugel zugrunde.

Im **1-m³-Behälter** (Bild 2) wird der zu untersuchende Staub in einen außerhalb des Explosionsgefäßes befindlichen 5-l-Staubvorratsbehälter gefüllt. Das Einblasen des Staubes in das Explosionsgefäß erfolgt in der Regel über ein an der Gefäßinnenwand entlanggeführtes halbkreisförmiges, perforiertes 3/4"-Rohr. Der Durchmesser der 20 bzw. 13 Bohrungen in der Rohrwandung beträgt 5 mm bzw. 6 mm. Druckluft unter einem Überdruck von 20 bar im Staubvorratsbehälter sorgt nach Öffnen eines sprengkapsel- oder elektropneumatisch betätigten Ventils für ein genügend rasches Ausbringen des Staubes und ein gutes Verwirbeln innerhalb des Explosionsgefäßes, so daß zum Zeitpunkt der Zündung ein hinreichend homogenes Staub/Luft-Gemisch definierter

5 Untersuchungsverfahren

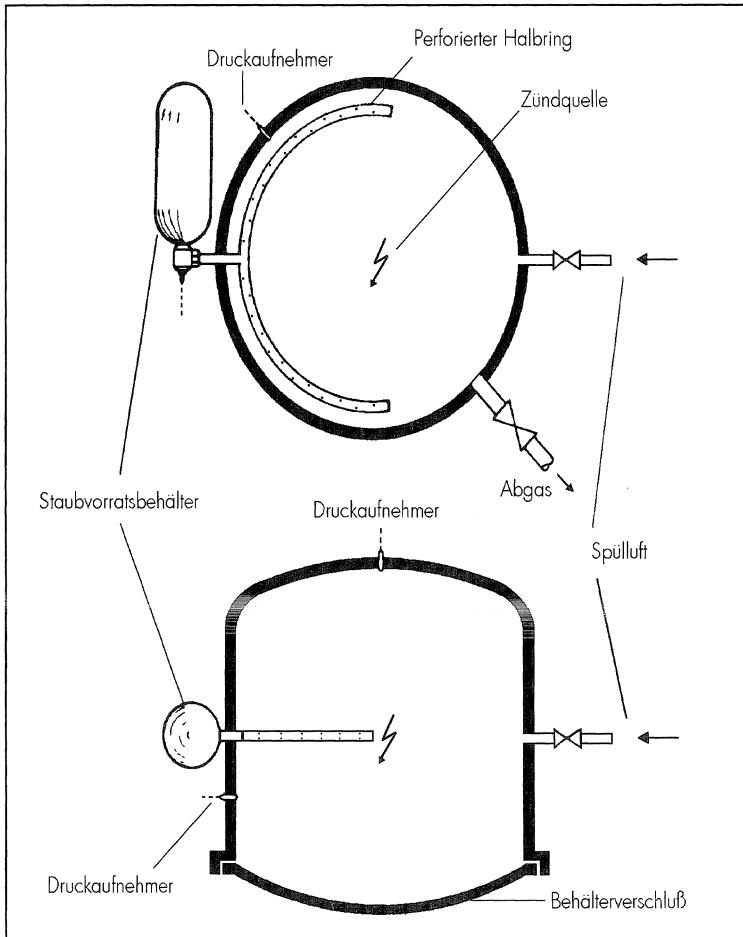


Bild 2: Apparat zum Bestimmen des Explosionsverhaltens von Stäuben (1-m³-Behälter, schematisch)

Konzentration im Explosionsgefäß vorliegt. Die Zündverzögerungszeit, d.h. die Zeit zwischen Einleiten des Staubeinblasens und Auslösen der Zündquelle, ist ein willkürliches Maß für den im Augenblick der Zündung vorhandenen Turbulenzgrad.

Turbulenz ist einerseits notwendig, um den Staub in Schwebelage zu halten, andererseits beeinflusst sie den Explosionsablauf. Mit abnehmender Zündverzögerungszeit nimmt die Turbulenz zu, und die Werte für den

maximalen zeitlichen Druckanstieg und den maximalen Explosionsdruck erhöhen sich. Dabei strebt letzterer einem Höchstwert zu, der etwa dann erreicht wird, wenn der zu untersuchende Staub aus dem Vorratsbehälter gerade vollständig ausgetragen worden ist. Die entsprechende Zündverzögerungszeit beträgt 0,6 s (Bild 3). Ein Verkürzen der Zündverzögerungszeit auf Werte unter 0,6 s hat ein Ansteigen des zeitlichen Druckanstieges zur Folge.

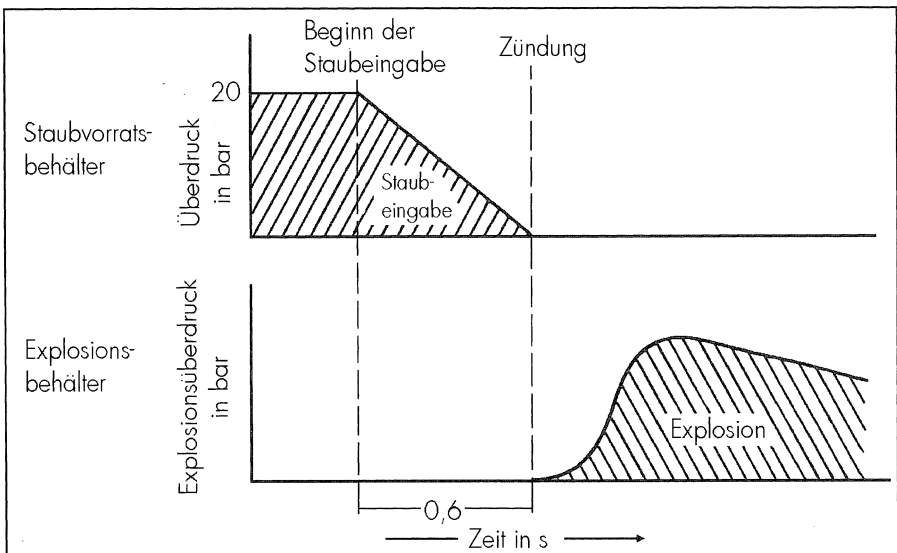


Bild 3: Versuchsablauf zum Bestimmen des Explosionsverhaltens von Stäuben im 1-m³-Behälter (schematisch)

5 Untersuchungsverfahren

Allen Untersuchungen wird vereinbarungsgemäß eine Zündverzögerungszeit von 0,6 s zugrunde gelegt.

Entzündet wird das Staub/Luft-Gemisch im Zentrum des Explosionsgefäßes. Als Zündquelle werden grundsätzlich zwei chemische Zünder mit einer Gesamtenergie von 10 000 J verwendet. Der Explosionsablauf wird über in die Gefäßwand eingesetzte Druckaufnehmer in Abhängigkeit von der Zeit aufgezeichnet.

Im Verlauf einer Versuchsreihe werden die Staubkonzentrationen über einen weiten Bereich verändert und die jeweiligen Werte für den Explosionsdruck und den zeitlichen Druckanstieg der Reaktionen bestimmt. Ausgehend von einer Staubkonzentration von $500 \text{ g}\cdot\text{m}^{-3}$ wird in Schritten von $250 \text{ g}\cdot\text{m}^{-3}$ die Konzentration so lange erhöht bzw. durch jeweiliges Halbieren so lange verringert, bis die Höchstwerte für den Druck und den zeitlichen Druckanstieg eindeutig erfaßt sind. Durch weiteres Verringern der Staubkonzentration nach gleichem Modus wird die Konzentration ermittelt, bei der dreimal hintereinander kein Entzünden des Staub/Luft-Gemisches mehr eintritt. Die entsprechende Staubkonzentration wird definitionsgemäß als untere Explosionsgrenze des untersuchten Staubes bezeichnet.

Bei der **20-l-Kugel** entsprechen sowohl das Untersuchungsverfahren als auch der Aufbau der Apparatur im Prinzip dem 1-m^3 -Behälter. Die Randbedingungen sind so festgelegt, daß im Rahmen der Meßgenauigkeit vergleichbare Werte wie im 1-m^3 -Behälter erhalten werden.

Neben der Behältergröße sind die wichtigsten Unterschiede darin zu sehen, daß das Explosionsgefäß vor dem eigentlichen Versuchsablauf teilweise evakuiert werden muß (damit nach dem Einblasen des Staubes im Explosionsgefäß Atmosphärendruck vorliegt) und daß die Zündverzögerungszeit nur 0,06 s beträgt. Ein weiterer Unterschied besteht darin, daß die Untersuchungen über den weiten Konzentrationsbereich in drei Versuchsreihen vorgenommen und der maximale Explosionsdruck sowie der maximale zeitliche Druckanstieg durch Mittelwertbildung aus den in jeder Versuchsreihe gemessenen Maximalwerten errechnet werden. Mit Hilfe des kubischen Gesetzes

$$(dp/dt)_{\max} \cdot V^{1/3} = \text{konst} = K_{St}$$

wird der maximale zeitliche Druckanstieg auf den volumenunabhängigen K_{St} -Wert umgerechnet. Als Zündquelle werden, wie im 1-m^3 -Behälter, jeweils zwei chemische

Zünder mit einer Gesamtenergie von 10 000 J eingesetzt [3,4,5,16].

Staubexplosionsfähigkeit/Staubexplosionsklasse

Staubexplosionsfähigkeit ist dann gegeben, wenn sich in einem Staub/Luft-Gemisch nach dem Entzünden eine Flamme ausbreitet, die im geschlossenen Behälter mit einer Drucksteigerung verbunden ist. Die Staubexplosionsfähigkeit wird vorzugsweise in den geschlossenen Apparaturen nach den beschriebenen Verfahren ermittelt. Während im 1-m³-Behälter die gleiche Zündquelle eingesetzt wird wie zum Bestimmen der Kenngrößen p_{\max} und K_{St} ($E_Z = 10$ kJ), beträgt die Zündenergie für das Bestimmen der Staubexplosionsfähigkeit in der 20-l-Apparatur nur 1 kJ bis 2 kJ [3].

Kommt es bei dem beschriebenen Verfahren zu keinem Druckaufbau ($\Delta p < 0,5$ bar über dem verfahrensbedingten Ausgangsdruck), so gilt der Staub in der untersuchten Form (Zusammensetzung, Korngröße, Feuchte) als **nichtstaubexplosionsfähig**. Tritt bei dem beschriebenen Verfahren ein Druckwert von $\geq 0,5$ bar über dem verfahrensbedingten Ausgangsdruck auf, so gilt der Staub als im Gemisch mit Luft explosionsfähig (**staubexplosionsfähig**).

Die **modifizierte Hartmann-Apparatur** läßt in gewissem Umfang eine Aussage zur Explosionsfähigkeit und zur Staubexplosionsklasse zu. Die modifizierte Hartmann-Apparatur (Bild 4) besteht aus einem vertikal angeordneten Glasrohr mit einem Volumen von ca. 1,2 l. Das Rohr ist am oberen Ende mit einem Klappdeckel verschlossen. Der zu prüfende Staub wird auf den Boden der Apparatur aufgebracht und mittels eines über einen Zerstäuberpilz gelenkten, definierten Luftstoßes aus einem vorgeschalteten Druckluftreservoir ($V = 50$ ml, $p = 8$ bar) verteilt. Die eingebrachte Staubmenge wird in jeder der drei Versuchsreihen über einen weiten Bereich verändert. Als Zündquelle dient eine Dauerfunkenstrecke, die im Falle des Nichtentzündens für drei weitere Versuchsreihen durch eine stärkere Zündquelle (Glühwendel) ersetzt wird [17].

Je nach Reaktion des Staub/Luft-Gemisches wird der Deckel unterschiedlich weit aufgeklappt und der Öffnungswinkel über induktive Geber in drei Stufen digital angezeigt.

Die Bewertung der maximal auftretenden Reaktionen wird nach folgendem Schema vorgenommen:

Anzeige „0“ (ohne visuell wahrnehmbare selbständige Flammenausbreitung) bedeutet

5 Untersuchungsverfahren

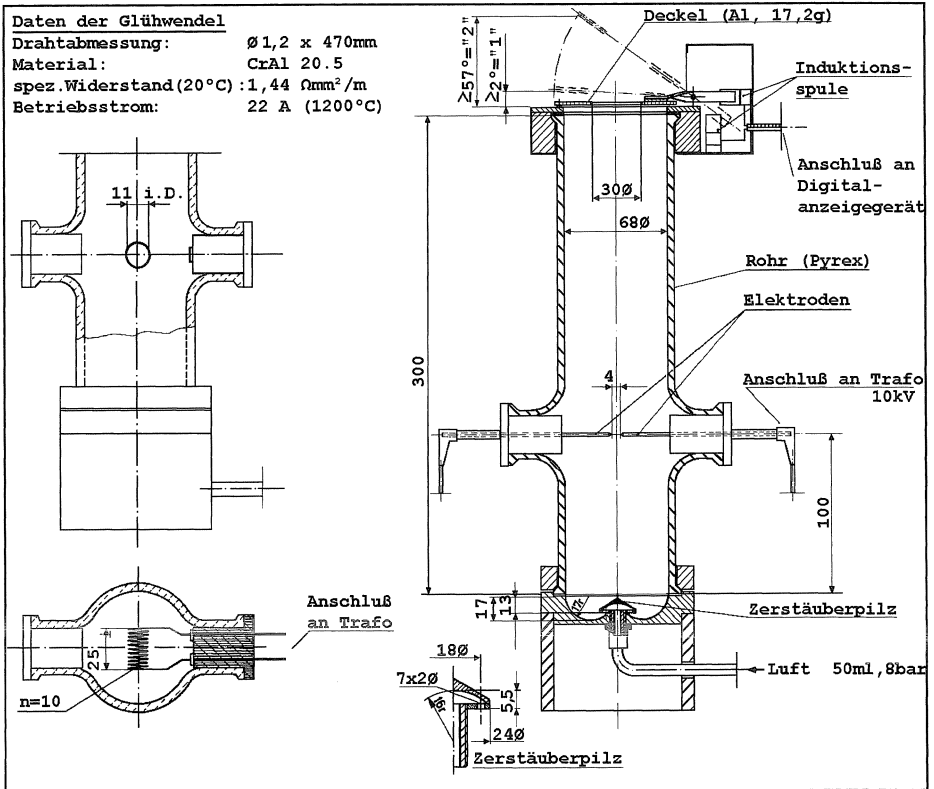


Bild 4: Modifizierte Hartmann-Apparatur (schematisch; links: Anwendung mit Glühwendel, rechts: Anwendung mit Induktionsfunken)

lediglich, daß unter diesen Versuchsbedingungen kein Entzünden erfolgt. Ein Einstufen des Staubes als nichtstaubexplosionsfähig ist hiermit jedoch nicht gerechtfertigt.

Weitergehende Untersuchungen in geschlossenen Apparaturen sind erforderlich.

- Anzeige „1“ sagt aus, daß der Staub im Gemisch mit Luft explosionsfähig ist und gestattet ein Einstufen in die **Staubexplosionsklasse St 1**. Eine visuell wahrnehmbare selbständige Flammenausbreitung - auch ohne Auslenken des Klappdeckels - ist hier der Anzeige „1“ gleichgestellt.
- Anzeige „2“ sagt ebenfalls aus, daß Staubexplosionsfähigkeit vorliegt, läßt aber ein Einstufen in eine Staubexplosionsklasse nicht zu. Weitergehende Untersuchungen in geschlossenen Apparaturen sind erforderlich.

Sauerstoffgrenzkonzentration

Die Sauerstoffgrenzkonzentration wird in den Apparaturen und mit den Verfahren bestimmt, die auch hinsichtlich der Staubexplosionsfähigkeit eingesetzt werden. Ausgehend von der optimalen Staubkonzentration in Luft wird die Sauerstoffkonzentration in Schritten von 1 Vol-% so lange durch Zugabe von Inertgas verringert, bis das jeweilige Gemisch nicht mehr entzündet werden kann. Der Verschiebung der optimalen Staubkonzentration zu niedrigeren Werten bei abnehmender Sauerstoffkonzentration ist dabei Rechnung zu tragen.

Die Werte für die genannten Sauerstoffgrenzkonzentrationen beruhen auf Stickstoff als Inertgas. Für andere Inertgase ergeben sich in der Regel höhere Werte für die Sauerstoffgrenzkonzentration [3].

Mindestzündenergie

Als Mindestzündenergie eines brennbaren Staubes im Gemisch mit Luft gilt der niedrigste Wert der kapazitiv gespeicherten elektrischen Energie, der bei der durch eine Induktivität im Entladekreis zeitlich gedehnten Entladung über eine Funkenstrecke gerade ausreicht, das zündwilligste Gemisch aus Staub und Luft bei Atmosphärendruck und Raumtemperatur zu entzünden.

Die Mindestzündenergie kann unter Einsatz einer entsprechenden Kondensatorentladungseinrichtung sowohl in der modifizierten Hartmann-Apparatur als auch in der 20-l-Kugel oder im 1-m³-Behälter bestimmt werden [15, 19].

Die Ergebnisse werden in der Regel als Wertepaar in logarithmischer Abstufung angegeben. Dabei bezeichnet der kleinere Wert die Energie, bei der nach dem festgelegten Verfahren keine Reaktionen mehr beobachtet wurden. Der höhere Wert nennt

5 Untersuchungsverfahren

die niedrigste eingesetzte Energie, bei der es noch zu einem Entzünden gekommen ist.

Abweichend vom Standard-Verfahren kann die Mindestzündenergie auch ohne Induktivität im Entladekreis und bei sehr hohen Energiewerten auch unter Einsatz chemischer Zünder bestimmt werden.

Mindestzündtemperatur einer Staubwolke (Zündtemperatur)

Zum Bestimmen der Zündtemperatur nach **Godbert-Greenwald** (Bild 5) wird eine kleine Staubmenge (0,1 g bis 3,5 g) mittels eines veränderbaren Luftstoßes ($V = 50 \text{ cm}^3$ bis 300 cm^3 , $p = 1,1 \text{ bar}$ bis $1,6 \text{ bar}$) von oben in ein elektrisch beheiztes, senkrecht angeordnetes Rohr von 36 mm Durchmesser und 400 mm Länge eingblasen.

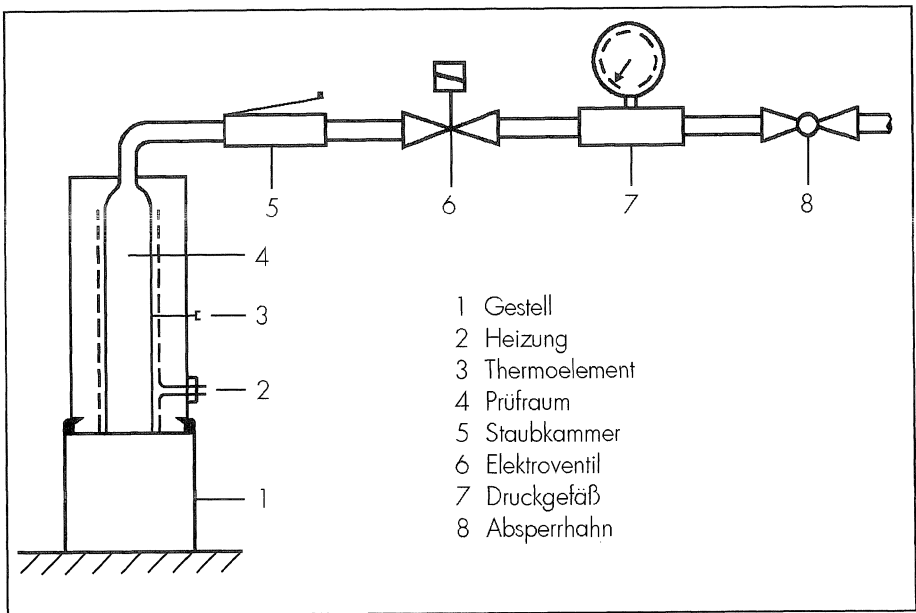


Bild 5: Godbert-Greenwald-Apparatur (schematisch)

Im sogenannten **BAM-Ofen** wird der zu untersuchende Staub gegen eine senkrechte Prallfläche, die heißeste Stelle im Innern des waagrecht angeordneten Ofens, geblasen. Auch hier wird die Konzentration des Staub/Luft-Gemisches durch die Eingabe verschiedener Staubmengen verändert und die niedrigste Temperatur ermittelt, bei der ein Entzünden eintritt.

Es handelt sich bei diesen Versuchen also um das Ermitteln des Entzündungsverhaltens einer Staubwolke beim kurzzeitigen Kontakt mit einer heißen Oberfläche im geschlossenen Temperaturfeld. Als Zündtemperatur wird die niedrigste Temperatur bezeichnet, bei der das in den beschriebenen Apparaturen geprüfte Staub/Luft-Gemisch mit geschlossener Flamme verbrennt.

Durch die waagrechte Anordnung des BAM-Ofens kann sich Staub ablagern und Schwelgase bilden. Dies kann zu niedrigeren Werten als bei der Godbert-Greenwald-Apparatur führen [3, 13, 18, 20].

Mindestzündtemperatur einer Staubschicht von 5 mm Dicke (Glimmtemperatur)

Das Bestimmen der Glimmtemperatur erfolgt auf einer elektrisch beheizten Platte von 185 mm Durchmesser, deren Temperatur thermostatisch auf $\pm 2^\circ\text{C}$ genau geregelt

wird. Die Probe wird dabei kreisförmig (100 mm Durchmesser) in 5 mm dicker Schicht in der Mitte der vorgeheizten Platte ausgebreitet und das Reaktionsverhalten - teilweise unter Zuhilfenahme eines empfindlichen Thermoelementes - beobachtet. Sich andeutendes Glimmen wird gegebenenfalls durch vorsichtiges Anblasen deutlicher sichtbar gemacht. Als Glimmtemperatur wird die niedrigste Plattentemperatur bezeichnet, bei der innerhalb von zwei Stunden nach dem Aufbringen Teile der Probe glimmen [3, 6, 13, 18].

Brennprüfung

Beim Untersuchen der Brennbarkeit eines Staubes wird geprüft, ob und in welchem Maß sich im abgelagerten Staub ein durch äußeres Entzünden eingeleiteter Brand ausbreiten kann. Mit einem glühenden Platindraht, dessen Temperatur ca. 1000°C beträgt, wird versucht, die zu einem ca. 2 cm breiten und 4 cm langen Produktsteg aufgeschüttete Staubprobe an einem Ende zu entzünden. Dazu wird der Draht nur kurz in die Staubprobe eingetaucht, damit diese nicht besonders erwärmt wird. Als Unterlage dient eine 5 mm bis 20 mm dicke keramische Platte.

Bei schmelzenden Stoffen wird zusätzlich eine modifizierte Brennprüfung mit einer

5 Untersuchungsverfahren

Probe, der zuvor 20 Gew.-% Kieselgur zugemischt wurde, durchgeführt. Das Ergebnis ist häufig ein deutlicheres Brennverhalten.

Die Brennbarkeit wird jeweils durch die Brennzahlen BZ 1 bis BZ 6 entsprechend folgender Einteilung bewertet:

kein Anbrennen	BZ 1
kurzes Anbrennen und rasches Auslösch	BZ 2
örtliches Brennen oder Glimmen ohne Ausbreiten	BZ 3
Ausbreiten eines Glimmbrandes	BZ 4
Ausbreiten eines offenen Brandes	BZ 5
verpuffungsartiges Abbrennen	BZ 6

6 Einfluß verschiedener Parameter auf das Explosionsverhalten

Wie bereits erwähnt, können verschiedene Parameter das Explosionsverhalten von Stäuben beeinflussen. Hierzu zählen vor allem die Feinheit und der Wassergehalt des Feststoffes, das Vorhandensein von Lösemitteldämpfen, von Brenn- oder Schwelgasen und der Sauerstoffgehalt im explosionsfähigen Gemisch.

Feinheit

Das Explosionsverhalten von Stäuben ist in starkem Maß abhängig von der Feinheit. Mit den Explosionskenngrößen sollte daher gleichzeitig die dazugehörige Korngrößenverteilung oder zumindest in erster Näherung hierfür der Medianwert angegeben werden.

In Bild 6 ist für unterschiedliche Stäube die Abhängigkeit des maximalen Explosionsüberdrucks und des maximalen zeitlichen Druckanstiegs vom Medianwert aufgetragen. Es zeigt sich, daß mit abnehmender Korngröße die Neigung der Stäube zu Explosionen zunimmt. Feinere Stäube sind leichter entzündbar und reagieren heftiger als gröbere.

Ein Erhöhen des Grobkornanteils in der Staubprobe, z.B. durch Beimischen von für sich allein nicht explosionsfähigem Granulat zu explosionsfähigem Feinstaub, führt nur zu einer Dämpfung des Explosionsablaufes und

damit zu verringerten Werten von p_{\max} und K_{St} bzw. zu höheren Werten z.B. für die Mindestzündenergie oder die Sauerstoffgrenzkonzentration. Solange der Feinstaubanteil im Gemisch mit Luft oberhalb seiner unteren Explosionsgrenze liegt, ist im allgemeinen eine Staubexplosion möglich. In diesem Zusammenhang ist zu beachten, daß in der Praxis aus den verschiedensten Gründen aus grobem Material durch Abrieb Feinstaub entstehen kann.

Wassergehalt

Grundsätzlich nehmen mit steigendem Wassergehalt die Zündempfindlichkeit und die Reaktionsfreudigkeit der Stäube ab. Dieser Einfluß spielt bis zu einem Wassergehalt von etwa 10 Gew.-% nahezu keine Rolle. Lediglich die Aufwirbelbarkeit der Stoffe kann gemindert werden. Deutlich reduzieren sich p_{\max} und K_{St} erst oberhalb von 20 Gew.-% bis 30 Gew.-% Wassergehalt (Bild 7).

Brennbare Gase und Dämpfe

Das Explosionsverhalten von Stäuben kann durch Zusätze brennbarer Gase, Schwelgase oder Lösemitteldämpfe beeinflusst und gesteigert werden. Vorgenannte Brennstoffkombinationen nennt man **hybride Gemische**.

6 Einfluß verschiedener Parameter auf das Explosionsverhalten

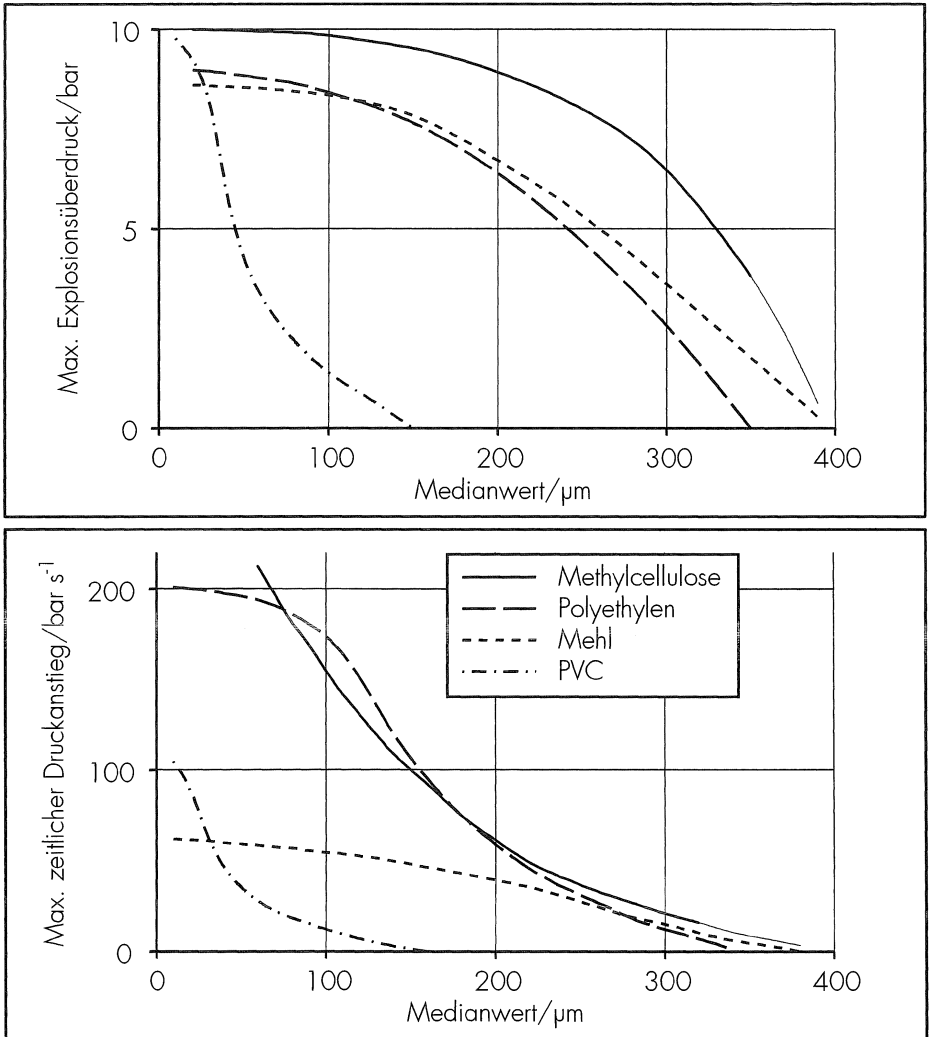


Bild 6: Einfluß des Medianwertes auf das Explosionsverhalten ($V=1\text{ m}^3$, $E_Z=10000\text{ J}$)

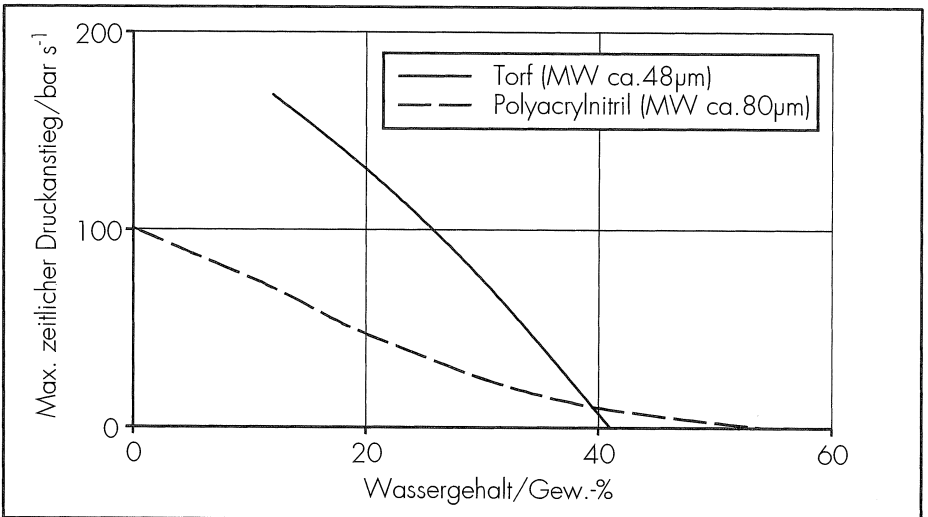
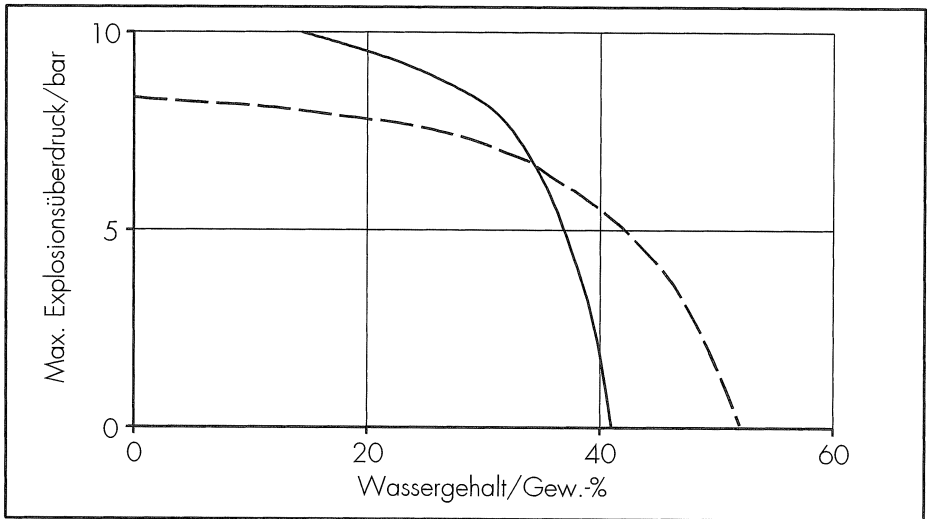


Bild 7: Einfluß des Wassergehaltes auf das Explosionsverhalten ($V=1\text{m}^3$, $E_Z=10000\text{ J}$)

6 Einfluß verschiedener Parameter auf das Explosionsverhalten

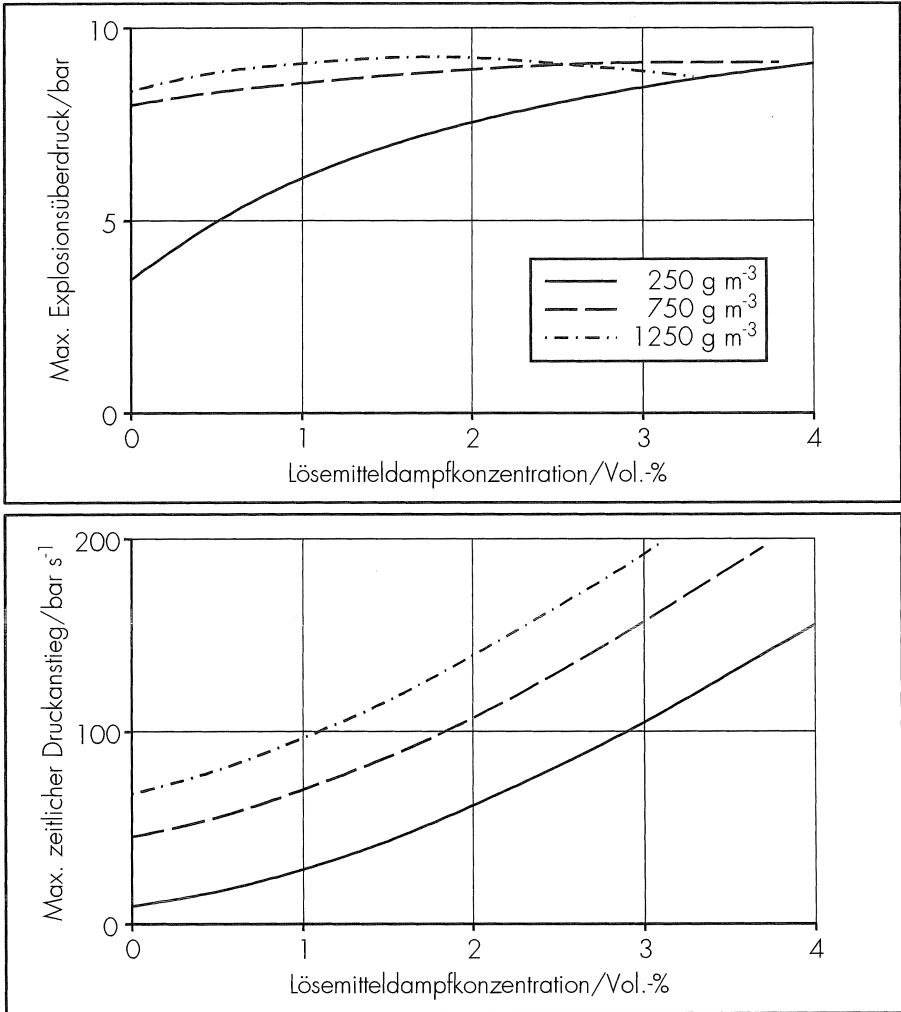


Bild 8: Einfluß der Lösemitteldampfkonzentration auf das Explosionsverhalten einer Pharmasubstanz bei unterschiedlichen Staubkonzentrationen ($V=1\text{ m}^3$, $E_{Z}=10000\text{ J}$)

Bei hybriden Gemischen wird insbesondere der maximale zeitliche Druckanstieg höher (Bild 8) und die Mindestzündenergie niedriger als bei reinen Staub/Luft-Gemischen. Hybride Gemische können schon dann explosionsfähig sein, wenn die Konzentrationen der Gase, Dämpfe oder Stäube für sich allein unterhalb ihrer unteren Explosionsgrenzen liegen.

Sauerstoffkonzentration

Das Reduzieren des Sauerstoffanteils einer Verbrennungsumgebung, z.B. durch Zugabe von Inertgas, führt zu einem Verringern der Explosionsheftigkeit. Wird die Sauer-

stoffgrenzkonzentration unterschritten, ist es schließlich nicht mehr möglich, eine Explosion einzuleiten [21 bis 25].

Anteile unbrennbarer Feststoffe

Das Zumischen unbrennbarer (inert) Feststoffe zu einem Staub/Luft-Gemisch verringert ebenfalls die Explosionsheftigkeit und stellt eine Art des Inertisierens dar. In Tabelle 2 sind anhand einiger Beispiele die Anteile an Inertstoffen am Gesamtgemisch angegeben, bei denen es unter den üblichen Versuchsbedingungen nicht mehr möglich ist, eine Explosion einzuleiten.

Brennstoff	Medianwert	Inertstoff	Medianwert	Anteil am Gesamtgewicht
	µm		µm	Gew.-%
Methylcellulose	70	Calciumsulfat (CaSO ₄)	<15	70
Organisches Pigment	<10	Ammoniumdihydrogenphosphat (NH ₄ H ₂ PO ₄)	29	65
Steinkohle, Fett	20	Calciumcarbonat (CaCO ₃)	14	65
Steinkohle, Fett	20	Natriumhydrogencarbonat (NaHCO ₃)	35	65
Zucker	30	Natriumhydrogencarbonat (NaHCO ₃)	35	50

Tabelle 2: Inertisierung von brennbaren Stäuben durch Beimischen von Inertstoffen (V=1 m³, E_Z=10000 J)

7 Grenzen der Anwendbarkeit

Der Anwendbarkeit der in diesem Tabellenwerk angegebenen brenn- und explosionsstechnischen Kenngrößen sind Grenzen gesetzt. Sie beruhen einerseits auf den großen Unterschieden in der Beschaffenheit der Stäube (z.B. Zusammensetzung, Korngrößenverteilung, Oberflächenstruktur, Feuchte) und andererseits auf der Abhängigkeit des Zahlenwertes der Kenngrößen von den Untersuchungsverfahren. Dem Anwender muß daher stets bewußt sein, daß die Tabellenwerte beim Auslegen von Schutzmaßnahmen grundsätzlich nur als Anhalt dienen können.

In erster Linie soll das Tabellenwerk aufzeigen, für welche Stoffe bereits Untersuchungsergebnisse vorliegen, ob die Stoffe staubexplosionsfähig sind und in welcher Größenordnung die wichtigsten Daten zu erwarten sind. Dabei wird sehr häufig das mit brennbaren Stäuben verbundene Problem deutlich, daß sich nämlich für scheinbar gleiche Stäube sehr unterschiedliche Werte ergeben können. Dies hebt die Notwendigkeit hervor, immer dann, wenn nicht zweifelsfrei alle bedeutsamen Einflußgrößen, wie Zusammensetzung, Feinheit und Feuchte, mit denen im zu beurteilenden Fall vorliegenden Verhältnissen übereinstimmen, den tatsächlich zu handhabenden Staub zu untersuchen.

Dies gilt auch im Hinblick darauf, daß bei dem Umfang des Datenmaterials trotz sorgfältigster Zusammenstellung Fehler nicht ganz ausgeschlossen werden können.

In einigen Fällen kann es aber durchaus gerechtfertigt sein, sich anhand einer Vielzahl von Daten eines Stoffes in sofern auf die „sichere Seite“ zu begeben, als daß die jeweils schärferen Werte für eine Beurteilung zugrunde gelegt werden.

Die im Tabellenwerk aufgeführten Kenngrößen sind sowohl untereinander als auch mit anderen, nach den gleichen Verfahren ermittelten Kenngrößen vergleichbar. Nicht vergleichbar sind sie hingegen mit solchen Werten, die nach anderen Verfahren bestimmt wurden.

Im einzelnen ist zu beachten, daß sich mit abnehmender Korngröße und abnehmender Feuchte höhere Werte für den maximalen Explosionsdruck und den maximalen zeitlichen Druckanstieg bzw. den K_{St} -Wert sowie niedrigere Werte für die untere Explosionsgrenze, die Zündtemperatur und die Mindestzündenergie ergeben können; die Zahlenwerte der Explosionskenngrößen verändern sich in diesen Fällen also zur „gefährlicheren“ Seite (vgl. Kap. 6, Einfluß verschiedener Parameter auf das Explosionsverhalten).

Die Kenngrößen der Tabellen gelten für folgende Zustandsbedingungen:

Druck von 0,9 bar bis 1,1 bar

Sauerstoff ca. 21 Vol.-%

Temperatur von 0 °C bis 30 °C.

Liegen in der Praxis andere als diese sogenannten "atmosphärischen Bedingungen" vor, sind besondere Überlegungen anzustellen und ggf. die Kenngrößen unter den im

Betrieb vorliegenden Randbedingungen zu bestimmen. Bei erhöhtem Druck, erhöhtem Sauerstoffgehalt und erhöhter Temperatur ist mit einem kritischeren Brenn- und Explosionsverhalten zu rechnen!

Die Tabellenwerte können ebenfalls nicht für ein Beurteilen zugrunde gelegt werden, wenn mit hybriden Gemischen, also dem gleichzeitigen Vorhandensein von brennbarem Staub und brennbaren Gasen, Dämpfen oder Nebeln zu rechnen ist (vgl. Kap. 6, Brennbare Gase und Dämpfe).

8 Schrifttum

- [1] Forschungsbericht Staubexplosionen, Brenn- und Explosions-Kenngrößen von Stäuben. Schriftenreihe des Hauptverbandes der gewerblichen Berufsgenossenschaften e.V., Bonn (1980).
- [2] Brenn- und Explosions-Kenngrößen von Stäuben. Sicherheitstechnische Informations- und Arbeitsblätter 140 260 - 140 279. BIA-Handbuch, Erich Schmidt Verlag, Bielefeld (1987).
- [3] VDI 2263: Staubbrände und Staubexplosionen, Gefahren - Beurteilung - Schutzmaßnahmen. Beuth Verlag GmbH, Berlin (Mai 1992) und VDI 2263 Blatt 1 Untersuchungsmethoden zur Ermittlung von sicherheitstechnischen Kenngrößen von Stäuben. Beuth Verlag GmbH, Berlin (Mai 1990).
- [4] VDI 3673, Blatt 1: Druckentlastung von Staubexplosionen. Beuth-Verlag, Berlin (Juli 1995).
- [5] ISO 6184/1: Explosion protection systems - Part 1: Determination of explosion indices of combustible dusts in air (1985).
- [6] DIN IEC 31 H (CO) 3, gleichzeitig VDE 0170/0171 Teil 102: Methoden zur Bestimmung der minimalen Entzündungstemperatur von Stäuben. Teil 1: Staubschicht auf einer heißen Oberfläche.
- [7] DIN EN 1127-1: Explosionsfähige Atmosphären - Explosionsschutz Teil 1 Grundlagen und Methodik (Oktober 1997).
- [8] Richtlinien für die Vermeidung der Gefahren durch explosionsfähige Atmosphäre mit Beispielsammlung - Explosionsschutz-Richtlinien - (EX-RL). Berufsgenossenschaft der chemischen Industrie, Heidelberg. ZH 1/10.
- [9] 94/9/EG: Richtlinie zur Angleichung der Rechtsvorschriften der Mitgliedstaaten für Geräte und Schutzsysteme zur bestimmungsgemäßen Verwendung in explosionsgefährdeten Bereichen (ATEX 100a).
- [10] Vorschlag für eine Richtlinie über Mindestvorschriften zur Verbesserung des Gesundheitsschutzes und der Sicherheit der Arbeitnehmer, die durch explosionsfähige Atmosphäre gefährdet werden können (ATEX 118a; 1997).
- [11] VDI-Berichte 304: Sichere Handhabung brennbarer Stäube. VDI-Verlag, Düsseldorf (1978).
- [12] Ritter, K. und W. Berthold: Bedeutung sicherheitstechnischer Kenndaten gegen Gas-, Staub- und Wärme-Explosionen. Chem.-Ing. Techn. 51 (1979), S. 174 bis 183.

- [13] DIN VDE 0165: Errichten elektrischer Anlagen in explosionsgefährdeten Bereichen. Beuth-Verlag, Berlin (1991).
- [14] Palmer, K.N.: Dust explosions and fires. Chapman and Hall, London (1973).
- [15] Berthold, W.: Mindestzündenergie-Prüfverfahren. VDI-Berichte Nr. 494 (1984), S. 105 bis 118.
- [16] Siweck, R.: 20-Laborapparatur für die Bestimmung der Explosionskennzahlen brennbarer Stäube. HTL Winterthur, Diplomarbeit (1977).
- [17] Lütolf, J.: Kurzmethode zur Prüfung brennbarer Stäube. VDI-Berichte Nr. 304, S. 39 bis 46. VDI-Verlag, Düsseldorf (1978).
- [18] Leuschke, G. und R. Oßwald: Bedeutung und Ermittlung von sicherheitstechnischen Kenngrößen brennbarer Stäube. VDI-Berichte Nr. 304, S. 29 bis 38. VDI-Verlag, Düsseldorf (1978).
- [19] Berthold, W. (Hrsg.): Bestimmung der Mindestzündenergie von Staub/Luft-Gemischen. Fortschrittberichte VDI Reihe 3, Nr. 134. VDI-Verlag, Düsseldorf (1987).
- [20] Dorsett, H.G., M. Jacobsen, J. Nagy und R.P. Williams: Laboratory equipment and test procedures for evaluating explosibility of dusts. Bureau of mines report of investigation 5624 (1960).
- [21] Leuschke, G.: Über die Klassifizierung brennbarer Stäube. Staub-Reinhalung der Luft 39 (1979), Heft 9, S. 326 bis 332.
- [22] Wiemann, W.: Einfluß der Temperatur auf Explosionskenngrößen und Sauerstoffgrenzkonzentration. VDI-Berichte Nr. 494, S. 89 bis 98. VDI-Verlag Düsseldorf (1984).
- [23] Hanel, H.: Über die Brand- und Explosionsgefahren in der Braunkohlenindustrie - Erkenntnisse und Probleme. Freiburger Forschungshefte A 382 (1966).
- [24] Bartknecht, W.: Explosionen - Ablauf und Schutzmaßnahmen. Springer Verlag, Berlin (1980).
- [25] VDI 2263-2: Staubbrände und Staubexplosionen, Gefahren - Beurteilung - Schutzmaßnahmen. Blatt 2 Inertisierung. Beuth Verlag GmbH, Berlin (Mai 1992).

9 Erläuterungen zum Tabellenwerk

Stoffbezeichnung

Innerhalb der Produktgruppen sind die einzelnen Stoffe im wesentlichen alphabetisch geordnet.

Stoff-Nr.

Die Stoff-Nr. soll das eindeutige Identifizieren der untersuchten Stäube ermöglichen.

Korngrößenverteilung/Medianwert/Feuchte

Die Feinheitsskenngrößen und die Angaben zur Materialfeuchte beziehen sich auf den Anlieferungszustand bzw. auf den Prüfzustand der jeweiligen Staubprobe. Anlieferungszustand und Prüfzustand können identisch sein. In jedem Fall gelten die aufgeführten Brenn- und Explosionskenngrößen immer nur für den Staub in dem Zustand, der in der selben Zeile beschrieben ist.

Erfolgt für den Anlieferungszustand keine konkrete Angabe zur Feuchte, so muß von der Sättigungfeuchte des Stoffes ausgegangen werden. Bei aufbereiteten Prüfproben dagegen handelt es sich um getrockneten Staub mit einer Restfeuchte von im allgemeinen ≤ 2 Gew.-%, in einigen Fällen von ≤ 4 Gew.-%.

Untere Explosionsgrenze

Sofern keine Werte aus dem 1-m³-Behälter oder der 20-l-Kugel vorliegen (erkennbar daran, daß keine Angaben zu p_{\max} und K_{St} erfolgen), gibt der genannte Wert zur Orientierung die entsprechende Konzentration aus Versuchen mit der modifizierten Hartmann-Apparatur an. In einigen Fällen wurden die Werte errechnet.

Maximaler Explosionsüberdruck/ K_{St} -Wert

Für das Auslegen von Behälterfestigkeiten ist es in der Praxis üblich, mit Überdrücken zu arbeiten. Insbesondere aus diesem Grund wird im Tabellenwerk der maximale Explosionsüberdruck p_{\max} ausgewiesen.

Die Angabe „k.E.“ („kein Entzünden“) sagt aus, daß der jeweilige Staub in dem untersuchten Zustand nicht explosionsfähig ist. Ein Verallgemeinern dieser Aussage insbesondere auf feineren oder trockeneren Staub ist nicht zulässig.

Explosionsfähigkeit

Die Angabe „ja“ zur Staubexplosionsfähigkeit bezieht sich auf Untersuchungen, die nicht in dem für das Bestimmen der Kenngrößen erforderlichen Umfang durchgeführt werden konnten, die aber eindeutig gezeigt

haben, daß das Material staubexplosionsfähig ist.

Die Angabe „nein“ (nichtstaubexplosionsfähig) erfolgt nur dann, wenn auch das Ergebnis von Versuchen mit feinem Staub in einer geschlossenen Apparatur „kein Entzünden“ ergeben hat und das Ergebnis der Brennprüfung „BZ 1“ lautet.

Die Staubexplosionsklassen sind grundsätzlich von den jeweiligen K_{St} -Werten abgeleitet. Ergebnisse von Versuchen in der modifizierten Hartmann-Apparatur, die nach dem beschriebenen Verfahren zu einem Einstufen in die Staubexplosionsklasse St 1 geführt haben, gelten als hinreichend sicher und werden entsprechend ohne Einschränkung aufgeführt. Andere Ergebnisse aus der modifizierten Hartmann-Apparatur werden dagegen in Klammern gesetzt, z.B. (St 2), und haben über die Tatsache hinaus, daß es sich um ein staubexplosionsfähiges Material handelt, nur grob orientierenden Charakter.

Sauerstoffgrenzkonzentration

Die Angabe erfolgt in der Regel als Einzelwert und nennt die höchste Sauerstoffkonzentration, bei der es unter den beschriebenen Versuchsbedingungen (Schrittweiten von jeweils 1 Vol.-%) zu keiner Explosion mehr gekommen ist. Bei abweichenden Schrittweiten in der Sauerstoffkonzentration wird

zusätzlich die niedrigste Sauerstoffkonzentration angegeben, bei der das Gemisch noch entzündet werden konnte.

Mindestzündenergie

Grundsätzlich erfolgt die Angabe als Wertepaar in logarithmischer Abstufung. Dabei bezeichnet der kleinere Wert die Energie, bei der nach dem festgelegten Verfahren keine Reaktionen mehr beobachtet wurden. Der höhere Wert nennt die niedrigste eingesetzte Energie, bei der es noch zu einem Entzünden gekommen ist. Erfolgt nur die Angabe eines Einzelwertes, so bedeutet das Vorzeichen „<“, daß sich der Staub mit einem Funken der angegebenen Energie noch entzünden ließ. War dagegen mit der angegebenen Energie kein Entzünden möglich, so wird dies durch das Vorzeichen „>“ ausgedrückt.

Werte für die Mindestzündenergie, die ohne Induktivität im Entladekreis bestimmt wurden, sind mit dem Zusatz „o.l.“ versehen.

Mindestzündenergiewerte $\geq 10^5$ mJ sind von Untersuchungen in geschlossenen Versuchsapparaturen nach dem für das Bestimmen von p_{max} und K_{St} beschriebenen Verfahren unter Einsatz entsprechender **chemischer Zünder** abgeleitet.

Zündtemperatur

Die für die Godbert-Greenwald-Apparatur (G-G) in Klammern angegebenen Werte beziehen sich auf eine ältere Versuchsanordnung mit etwas längerem Rohr. Sie sind niedriger als die mit dem 400-mm-Rohr ermittelten Werte. In beiden Spalten bedeutet die Abkürzung „k.E.b. ...“: kein Entzünden bis ...°C.

Glimmtemperatur

Die Glimmtemperatur gilt definitionsgemäß für eine 5 mm dicke Schicht. Bei dickeren Schichten kann ein Entzünden bei zum Teil

beträchtlich niedrigeren Temperaturen erfolgen. Die Abkürzung „k.G.b. ...“ bedeutet: kein Glimmen bis ...°C. Die Angabe „schmilzt“ bedeutet, daß die Substanz vor Erreichen einer Glimmtemperatur schmilzt oder derart sintert, daß der Staubcharakter verlorengeht.

Brennbarkeit

Die in Klammern angegebenen Werte beziehen sich auf die modifizierte Brennprüfung, die bei schmelzenden Substanzen nach dem Zumischen von 20 Gew.-% Kieselgur erfolgt.

Tabellenwerk

Gruppen-Nr.	Produktgruppe	Seite
1	ORGANISCHE PRODUKTE	
1.1	NATURPRODUKTE	
1.1.1	Holz, Holzprodukte, Faserstoffe	36
1.1.2	Nahrungs-, Genuß-, Futtermittel	54
1.1.3	Kohle, Kohleprodukte	146
1.1.4	Sonstige Naturprodukte	164
1.2	TECHNISCH CHEMISCHE PRODUKTE	
1.2.1	Kunststoffe, Harze, Gummi	172
1.2.2	Pharmazeutika, Kosmetika, Schädlingsbekämpfungsmittel	248
1.2.3	Zwischenprodukte, Hilfsstoffe	274
1.2.4	Sonstige technisch chemische Produkte	346
2	ANORGANISCHE PRODUKTE	
2.1	Metalle, Legierungen	356
2.2	Sonstige anorganische Produkte	392
3	SONSTIGE	400

Die Stoffe sind in den Gruppen im wesentlichen alphabetisch geordnet.
Beachten Sie bitte die Grenzen der Anwendbarkeit der Daten.