

GESTIS-STAUB-EX

Datenbank

Brenn- und Explosionskenngrößen
von Stäuben



HVBG
Hauptverband der
gewerblichen
Berufsgenossenschaften

An dem Report, der dieser Datenbank zu Grunde liegt, 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.

Der 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
Berufsgenossenschaftliches Institut für Arbeitssicherheit – BIA

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

Stand: 2/2001

Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung	4
2	Begriffsbestimmungen/Kenngrößen	5
3	Schutzmaßnahmen und zu beachtende Kenngrößen	7
4	Untersuchungsschema	8
5	Untersuchungsverfahren	9
6	Einfluss verschiedener Parameter auf das Explosionsverhalten	15
7	Grenzen der Anwendbarkeit	19
8	Schrifttum	20

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 stellten die Daten 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, sodass die zweite Ausgabe des Tabellenwerks explosionstechnische Kenngrößen von nahezu 1900 Stäuben beinhaltete. Neu waren zwei zusätzliche Tabellen mit Angaben über Mindestzündenergien und Sauerstoffgrenzkonzentrationen [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 und liegt jetzt auch in Form einer Datenbank vor.

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 Systemsicherheit 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 Kenngrößen zu Grunde liegen, sind in verschiedenen nationalen und internationalen Normen beschrieben [3 bis 6]. Wesentliche Grundlage 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 prüfverfahrenspezifische 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 O_2 -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.

Staubexplosions- klasse	K_{St} -Wert in $\text{bar} \cdot \text{m} \cdot \text{s}^{-1}$
St 1	> 0 bis 200
St 2	> 200 bis 300
St 3	> 300

Staub/Luft-Gemisch

In Luft aufgewirbelter Staub (Staubwolke). Kennzeichnende Groe 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-Regeln 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	Brennbarkeit, Explosionsfähigkeit
Konzentrationsbegrenzung	Explosionsgrenzen
Inertisierung	Sauerstoffgrenzkonzentration
Vermeiden von Zündquellen	Mindestzündenergie, Zündtemperatur, Glimmtemperatur, Selbstentzündungsverhalten, exotherme Zersetzung, elektrostatisches Verhalten, Schlagempfindlichkeit, Schwelppunkt
Explosionsfeste Bauweise	Maximaler Explosionsüberdruck
Explosionsdruckentlastung	K_{St} -Wert und maximaler Explosionsüberdruck
Explosionsunterdrückung	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. Hierfür 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 nicht brennbar und nicht explosionsfähig 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].

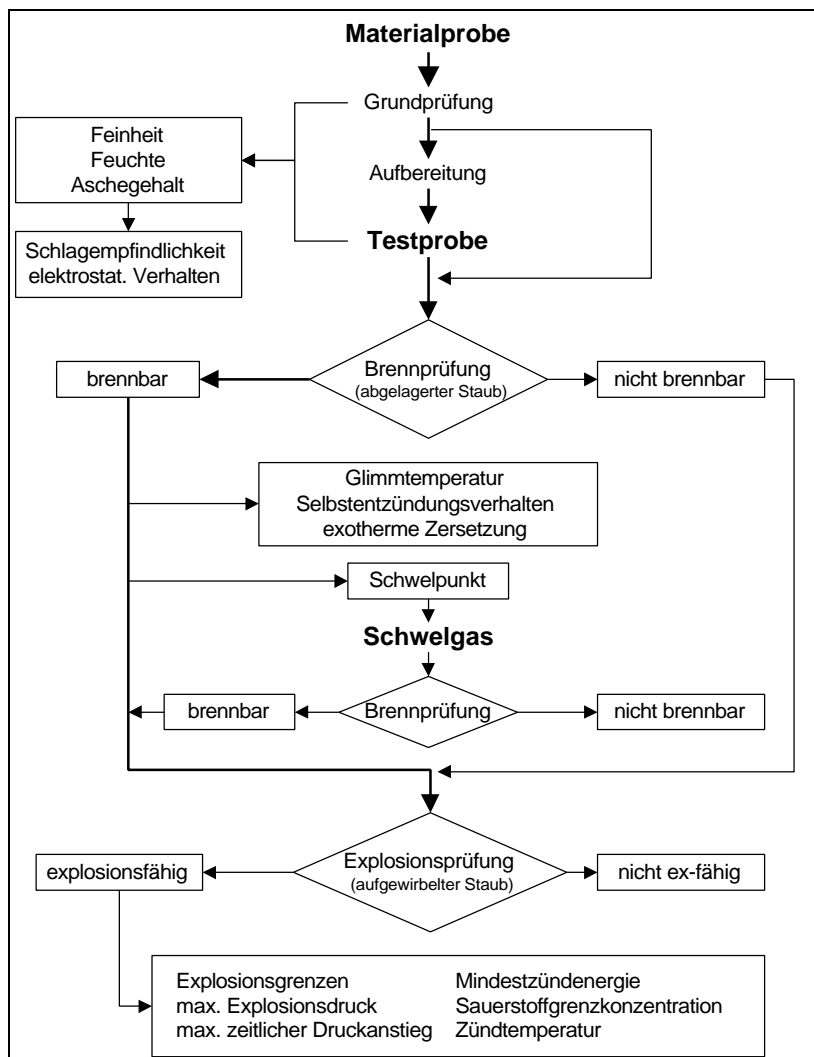


Bild 1: Untersuchungsschema zum Brenn- und Explosionsverhalten von Stäuben

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.

5 Untersuchungsverfahren

Die 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 Explosionsversuchen 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 Daten liegen Untersuchungen im 1-m³-Behälter und/oder in der 20-l-Kugel zu Grunde.

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 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, sodass zum Zeitpunkt der Zündung ein hinreichend homogenes Staub/Luft-Gemisch definierter 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.

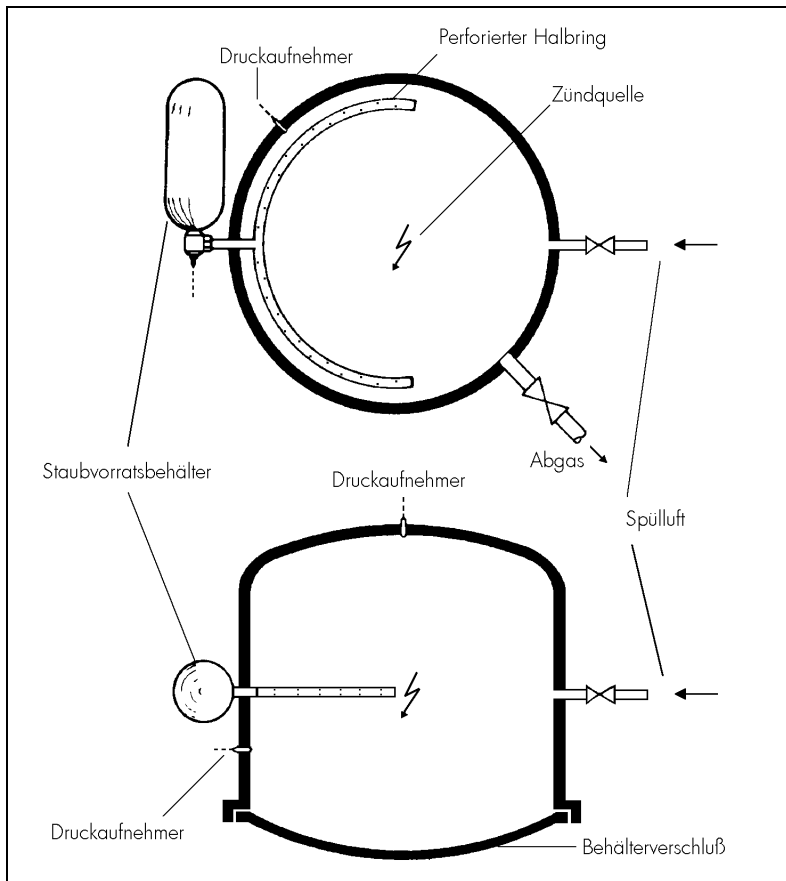


Bild 2: 1-m³-Behälter, schematisch

Allen Untersuchungen wird vereinbarungsgemäß eine Zündverzögerungszeit von 0,6 s zu Grunde 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 Staubkonzentration 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 g·m⁻³ wird in Schritten von 250 g·m⁻³ die Konzentration so lange erhöht bzw. durch jeweiliges Halbieren so lange verringert,

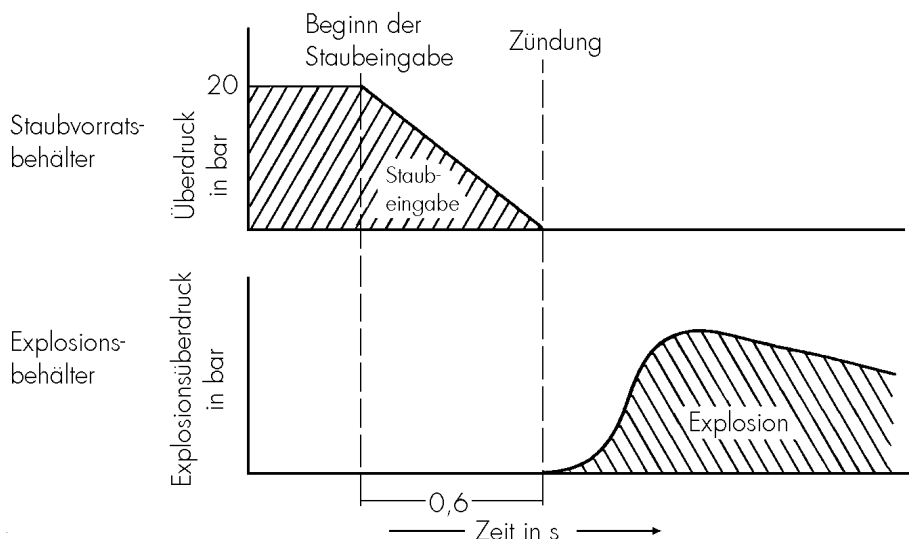


Bild 3: Versuchsablauf zum Bestimmen des Explosionsverhaltens von Stäuben im 1-m³-Behälter (schematisch)

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-m³-Behälter. Die Randbedingungen sind so festgelegt, dass im Rahmen der Messgenauigkeit vergleichbare Werte wie im 1-m³-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 erfolgen. Der maximale Explosionsdruck sowie der maximale zeitliche Druckanstieg werden durch Mittelwertbildung aus den in jeder Versuchsreihe gemessenen Maximalwerten errechnet.

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-m³-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 **nicht staubexplosionsfähig**. 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 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 Druckluftvorrat ($V = 50$ 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:

Die Mindestzündenergie kann 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 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 eingeblasen.

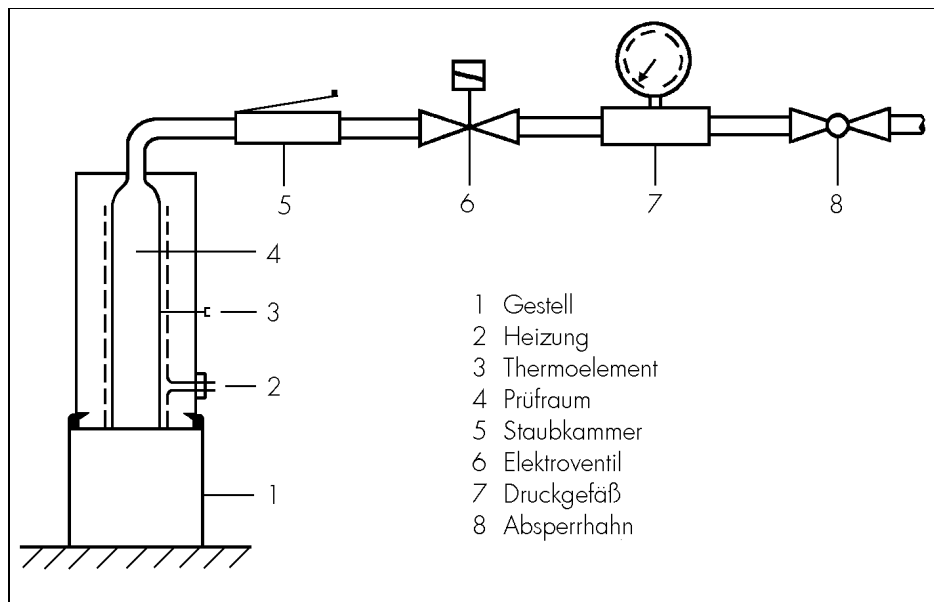


Bild 5: Godbert-Greenwald-Apparatur (schematisch)

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 waagerechte Anordnung des BAM-Ofens können 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 $\pm 2 \text{ }^\circ\text{C}$ 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 Thermoele-

menten - 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 bis 20 mm dicke keramische Platte.

Bei schmelzenden Stoffen wird zusätzlich eine modifizierte Brennprüfung mit einer Probe, der zuvor 20 Gew.-% Kieselgur zugemischt wurden, durchgeführt. Das Ergebnis ist häufig ein deutlicheres Brennverhalten. Die Brennbarkeit wird jeweils durch die Brennzahlen BZ 1 bis BZ 6 entsprechend der Einteilung in Tabelle 2 bewertet.

Brennverhalten	Brennzahl BZ
kein Anbrennen	BZ 1
kurzes Anbrennen und rasches Auslöschten	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

Tabelle 2: Brennverhalten und Brennzahlen

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 für die Mindestzündenergie und 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.

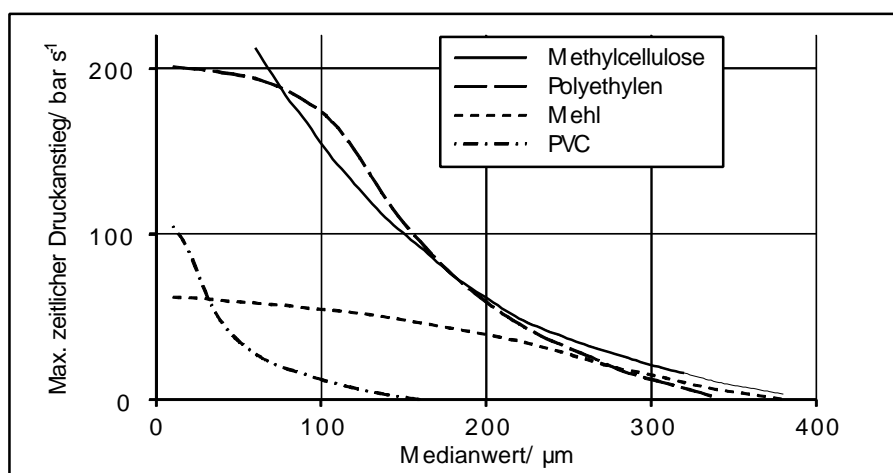
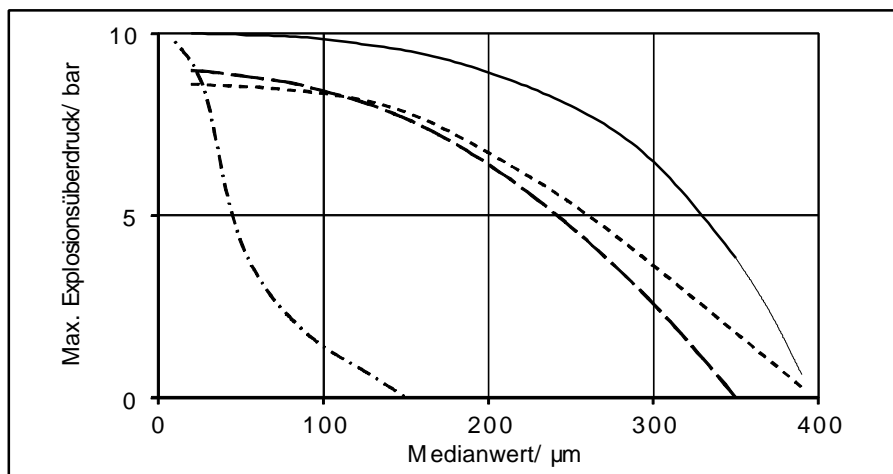


Bild 6: Einfluss des Medianwertes auf das Explosionsverhalten ($V=1\text{ m}^3$, $EZ=10000\text{ J}$)

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).

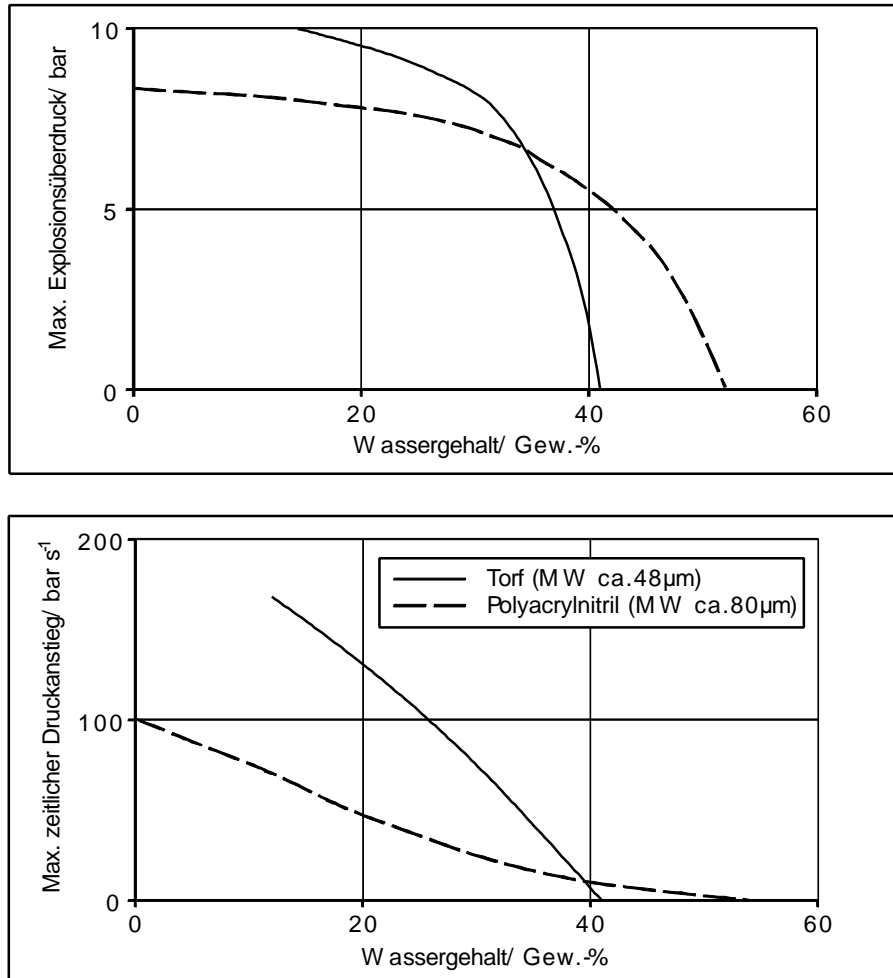


Bild 7: Einfluss des Wassergehaltes auf das Explosionsverhalten ($V=1\text{ m}^3$, $EZ=10000\text{ J}$)

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**.

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.

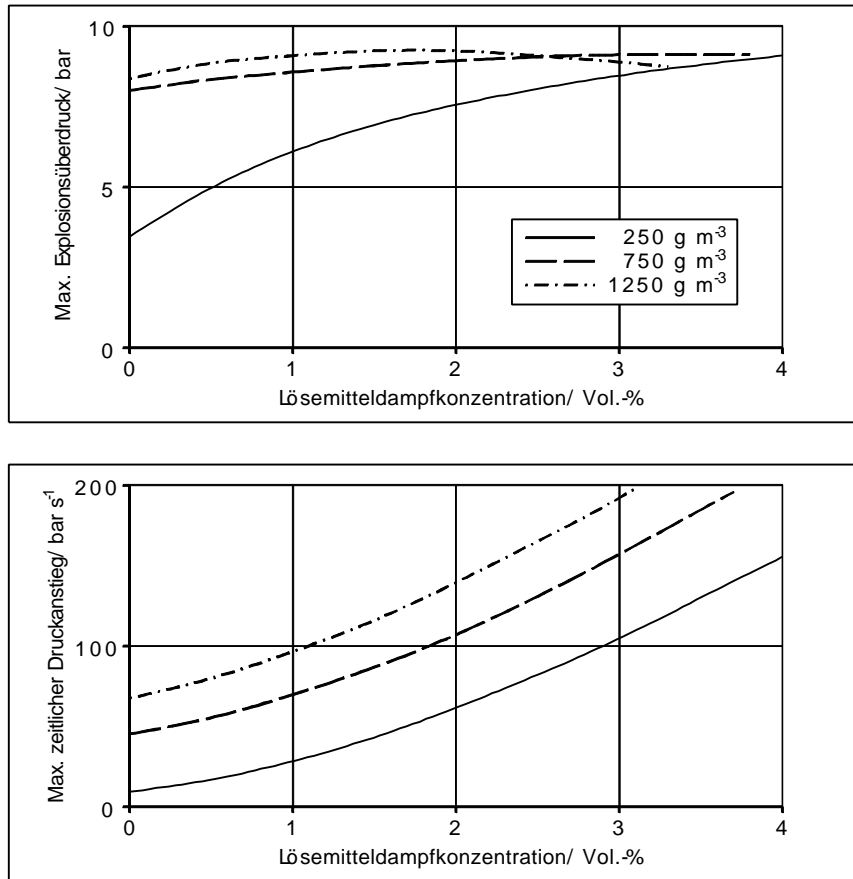


Bild 8: Einfluss der Lösemitteldampfkonzentration auf das Explosionsverhalten einer Pharmasubstanz bei unterschiedlichen Staubkonzentrationen ($V=1\text{m}^3$, $E_z=10000\text{ J}$)

Sauerstoffkonzentration

Das Reduzieren des Sauerstoffanteils einer Verbrennungsatmosphäre, z.B. durch Zugabe von Inertgas, führt zu einem Verringern der Explosionsheftigkeit. Wird die Sauerstoffgrenzkonzentration 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 ebenfalls eine Art des Inertisierens dar. In Tabelle 3 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 in μm	Inertstoff	Medianwert in μm	Anteil am Gesamtgewicht in Gew.-%
Methylcellulose	70	Calciumsulfat (CaSO_4)	<15	70
Organisches Pigment	<10	Ammoniumdihydrogen- phosphat ($\text{NH}_4\text{H}_2\text{PO}_4$)	29	65
Steinkohle, Fett-	20	Calciumcarbonat (CaCO_3)	14	65
Steinkohle, Fett-	20	Natriumhydrogen- carbonat (NaHCO_3)	35	65
Zucker	30	Natriumhydrogen- carbonat (NaHCO_3)	35	50

Tabelle 3: Inertisieren brennbarer Stäube durch Beimischen inerter Feststoffe
($V=1\text{m}^3$, $E_z=10000\text{ J}$)

7 Grenzen der Anwendbarkeit

Der Anwendbarkeit der in dieser Datenbank angegebenen brenn- und explosionstechnischen Kenngrößen sind Grenzen gesetzt. Sie beruhen einerseits auf den großen Unterschieden in der Beschaffenheit von Stäuben (z.B. Zusammensetzung, Korngrößenverteilung, Oberflächenstruktur, Feuchte) und andererseits auf der Abhängigkeit der Zahlenwerte der Kenngrößen von den Untersuchungsverfahren. Dem Anwender muss daher stets bewusst sein, dass die hier angegebenen Kenngrößen beim Auslegen von Schutzmaßnahmen grundsätzlich nur als grober Anhaltspunkt dienen können.

In erster Linie sollen die Daten aufzeigen, für welche Stoffe bereits Untersuchungsergebnisse vorliegen, ob die Stoffe staubexplosionsfähig sind und in welcher Größenordnung Werte erwartet werden können. 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, den tatsächlich zu handhabenden Staub immer dann zu untersuchen, wenn nicht zweifelsfrei Werte von einem untersuchten Staub vorliegen, bei dem alle bedeutsamen Einflussgrößen, wie

Zusammensetzung, Feinheit und Feuchte, mit den im zu beurteilenden Fall vorliegenden Verhältnissen übereinstimmen.

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 insofern auf die „sichere Seite“ zu begeben, als dass die jeweils schärfsten Werte für eine Beurteilung zu Grunde gelegt werden.

Die hier 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 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 so genannten "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 angegebenen Werte können ebenfalls nicht für ein Beurteilen zu Grunde gelegt werden, wenn mit hybriden Gemischen, also dem gleichzeitigen Vorhandensein von brennbarem Staub und brennbaren Gasen, Dämpfen oder Nebeln zu rechnen ist (vgl. in Kap. 6, Brennbare Gase und Dämpfe).

8 Schrifttum

- [1] Forschungsbericht Staubexplosionen, Brenn- und Explosions-Kenngrößen von Stäuben. Schriftenreihe des Hauptverbandes der gewerblichen Berufsgenossenschaften, Bonn 1980
- [2] Brenn- und Explosions-Kenngrößen von Stäuben. Sicherheitstechnische Informations- und Arbeitsblätter 140 260 - 140 279. In: BIA-Handbuch Sicherheit und Gesundheitsschutz am Arbeitsplatz. Hrsg.: Berufsgenossenschaftliches Institut für Arbeitssicherheit – BIA, Sankt Augustin. Erich Schmidt, Bielefeld 1985 – Losebl.-Ausg.
- [3] VDI 2263: Staubbrände und Staubexplosionen, Gefahren - Beurteilung - Schutzmaßnahmen (05.92). VDI 2263 Blatt 1: Untersuchungsmethoden zur Ermittlung von sicherheitstechnischen Kenngrößen von Stäuben (05.92). Beuth, Berlin 1992
- [4] VDI 3673 Blatt 1: Druckentlastung von Staubexplosionen (07.95). Beuth, Berlin 1995
- [5] ISO 6184/1: Explosion protection systems - Part 1: Determination of explosion indices of combustible dusts in air (11.85). Beuth, Berlin 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. Beuth, Berlin
- [7] DIN EN 1127-1: Explosionsfähige Atmosphären – Explosionsschutz. Teil 1: Grundlagen und Methodik (10.97). Beuth, Berlin 1997
- [8] Regeln für Sicherheit und Gesundheitsschutz bei der Arbeit - Explosionsschutz-Regeln - (EX-RL) (06.98). Berufsgenossenschaft der chemischen Industrie, Heidelberg 1998. Auch: BGR 104 (früher ZH 1/10)
- [9] 94/9/EG: Richtlinie zur Angleichung der Rechtsvorschriften der Mitgliedstaaten für Geräte und Schutzsysteme zur bestimmungsgemäßen Verwendung in explosionsgefährdeten Bereichen (früher auch ATEX 100a). Abl. Nr. L 100 (1994) S. 1
- [10] 1999/92/EG: Richtlinie über Mindestvorschriften zur Verbesserung des Gesundheitsschutzes und der Sicherheit der Arbeitnehmer, die durch explosionsfähige Atmosphäre gefährdet werden können (früher auch ATEX 118a). Abl. Nr. L 023 (2000) S. 57
- [11] Sichere Handhabung brennbarer Stäube. VDI-Berichte 304. VDI, Düsseldorf 1978
- [12] Ritter, K.; Berthold, W.: Bedeutung sicherheitstechnischer Kenndaten gegen Gas-, Staub- und Wärme-Explosionen. Chem.-Ing. Techn. (1979) Nr. 51, S. 174-183
- [13] DIN VDE 0165: Errichten elektrischer Anlagen in explosionsgefährdeten Bereichen. Beuth, Berlin 1991. Nachfolgenormen: DIN EN 60079-14/VDE 0165 Teil 1 (08.98) und DIN EN 50281-1-2/VDE 0165 Teil 2 (11.99). Beuth, Berlin
- [14] Palmer, K.N.: Dust explosions and fires. Chapman and Hall, London 1973
- [15] Berthold, W.: Mindestzündenergie-Prüfverfahren. VDI-Berichte Nr. 494. VDI, Düsseldorf 1984, S. 105-118
- [16] Siweck, R.: 20-l-Laborapparatur für die Bestimmung der Explosionskennzahlen brennbarer Stäube. HTL Winterthur, Diplomarbeit 1977
- [17] Lütolf, J.: Kurzmethoden zur Prüfung brennbarer Stäube. VDI-Berichte Nr. 304. VDI, Düsseldorf 1978, S. 39-46
- [18] Leuschke, G.; Oßwald, R.: Bedeutung und Ermittlung von sicherheitstechnischen Kenngrößen brennbarer Stäube. VDI-Berichte Nr. 304. VDI, Düsseldorf 1978, S. 29-38
- [19] Berthold, W. (Hrsg.): Bestimmung der Mindestzündenergie von Staub/Luft-Gemischen. Fortschrittberichte VDI Reihe 3, Nr. 134. VDI, Düsseldorf 1987
- [20] Dorsett, H.G.; Jacobsen, M.; Nagy, J.; Williams, R.P.: 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-Reinhalt. Luft 39 (1979) Nr. 9, S. 326-332

- [22] Wiemann, W.: Einfluss der Temperatur auf Explosionskenngrößen und Sauerstoffgrenzkonzentration. VDI-Berichte Nr. 494. VDI, Düsseldorf 1984, S. 89-98
- [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, Berlin 1980
- [25] VDI 2263-2: Staubbrände und Staubexplosionen, Gefahren - Beurteilung - Schutzmaßnahmen. Blatt 2: Inertisierung (05.92). Beuth, Berlin 1992