

4 Eigenschaften brennbarer Stäube (Kenngrößen)

Willi Hensel, Kenneth L. Cashdollar

Handbuch des Explosionsschutzes

herausgegeben von Henrikus Steen

 **WILEY-VCH** 2000

Weinheim · NewYork · Chichester · Brisbane · Singapore · Toronto

4 Eigenschaften brennbarer Stäube (Kenngrößen)

Willi Hensel, Kenneth L. Cashdollar

4.1 Einleitung

Die für den Explosionsschutz maßgebenden Eigenschaften brennbarer Stäube werden durch sicherheitstechnische Kenngrößen (STK) beschrieben. Diese Kenngrößen sind Grenzwerte wichtiger Stoffeigenschaften, jenseits derer bestimmte Gefahren (Brände, Explosionen, Entstehung gefährlicher anderer Stoffe) beim Umgang mit den aktuellen Stoffen oder Stoffgemischen auftreten können. Sie werden nach festgelegten Testverfahren in speziellen Meanordnungen im Labor untersucht. Das Ziel ist dabei, vergleichbare quantitative oder qualitative Entscheidungsmerkmale für Situationen zu erlangen, die in der betrieblichen Praxis auftreten können – ein Ziel, das nicht immer einfach und hinreichend zufriedenstellend zu erreichen ist.

Die STK sind in den seltensten Fällen reine Stoffeigenschaften. Sie haben immer Bezug zu bestimmten praktischen Anwendungsfällen und dienen im weitesten Sinne dazu, Betriebsbedingungen festzulegen, die eine gefahrlose Handhabung der gefahrenden Stoffe ermöglichen. Mit Hilfe der STK kann man die interessierenden Stoffe nach bestimmten Eigenschaften klassifizieren oder hinsichtlich des von ihnen – in aktueller Situation – ausgehenden Risikos untereinander vergleichen. Grundsätzliches zur Bedeutung der STK ist in Abschn. 3.1.1 bis 3.1.3 abgehandelt.

Man unterscheidet bei den Stuben zwischen

- Kenngrößen von abgelagerten Stuben,
- Kenngrößen von Schwelgasen aus thermisch belasteten Staubschüttungen und
- Kenngrößen von aufgewirbelten Staub-Luft-Gemischen.

Die Bestimmung der Kenngrößen ist bei Stuben meist deutlich schwieriger als bei Gasen oder Dämpfen, weil Stäube als Feststoffteilchen gegenüber den Gasen zusätzliche Eigenschaften besitzen, die ihre Beurteilung erschweren.

Erwähnt seien hier:

- die wechselnde Korngröße bzw. Korngrößenverteilung bei gleicher Staubsorte,
- die Alterungsfahigkeit der Stäube,
- unterschiedlicher Feuchtegehalt,

- stark differierende Dichten verschiedener Stäube,
- die Schwierigkeit, räumlich und zeitlich konstante Staubkonzentrationen in Staubwolken zu erzeugen und aufrechtzuerhalten.

Beeinflußt von diesen Besonderheiten kann das Reaktionsvermögen – auch von dem Namen nach gleichen Staubproben – sehr unterschiedlich sein. Besondere Probleme treten bei der *Bestimmung der Kenngrößen von Staubwolken* auf.

Weil die Staubteilchen der zweiphasigen Staub-Luft-Gemische aufgrund der Einwirkung der Schwerkraft nur sehr kurze Zeit in der Schwebelage gehalten werden können, ist die Konzentration der Staub-Luft-Gemische (im Gegensatz zu Gas-Luft-Mischungen) örtlichen und zeitlichen Änderungen unterworfen. Um Staubwolken zu erzeugen, ist es nötig, den Staubteilchen eine Eigenbewegung aufzuzwingen, die kurzzeitig dem Schwerkrafteinfluß entgegenwirkt. Deshalb arbeiten praktisch alle eingeführten Verfahren zu Bestimmung der STK von Staubwolken so, daß der Staub durch einen heftigen Druckluftstoß aufgewirbelt wird.

Abgesehen von der nur wenig befriedigenden Reproduzierbarkeit eines solchen Vorgehens handelt man sich damit einen zeitlich veränderlichen Turbulenzzustand der Staubwolken ein, der aber sehr stark den Ablauf von Zünd- und Verbrennungsvorgängen beeinflußt. Man erzielt (im Gegensatz zu ruhenden Gasen) nach der Zündung niemals eine geschlossene Flammenfront, die mathematisch hinlänglich beschreibbar wäre. Diese Unwägbarkeiten führen dazu, daß die STK mindestens der aufgewirbelten Stäube von sehr viel geringerer Reproduzierbarkeit sind als diejenigen, von ruhenden Gas-Luft-Gemischen. Sie sind auch in stärkerem Maße vom Bestimmungsgerät abhängig als im Falle von Gasen.

Bei der *Bestimmung der Kenngrößen abgelagerter Stäube* treten diese Probleme nicht auf. Dabei darf aber nicht übersehen werden, daß zwischen Staubablagerungen und -aufwirbelungen in der industriellen Praxis stets Übergänge möglich sind.

Die beim Brand einer Staubschüttung und bei der Explosion einer Staubwolke ablaufenden Feststoff-Gas-Reaktionen hängen hinsichtlich der Reaktionsgeschwindigkeit von der Größe der für den Luftsauerstoff zugänglichen Feststoffoberfläche ab. Deshalb laufen die Verbrennungsreaktionen der Stäube (sehr große Oberfläche vieler einzelner Teilchen!) um Größenordnungen schneller ab als diejenigen kompakter Körper, in aufgewirbelten Stäuben z. B. explosionsartig. Je kleiner die Korngröße einer Staubprobe ist, desto heftiger fallen die Reaktionen aus, d. h., desto gefährlicher ist der Staub. Als ein wesentlicher Effekt der abgelagerten Stäube ist zu berücksichtigen, daß Staubschüttungen – durch die im Zwischenkornvolumen eingeschlossene Luft – hervorragend wärmedämmend wirken.

Die Bestimmung der STK brennbarer Stäube erfolgt an repräsentativen und eindeutig definierten Proben nach einer auf die jeweiligen Prüfmethode zugeschnittenen Vorbehandlung, um vergleichbare Ergebnisse zu erzielen. Diese Vorbehandlung beruht im allgemeinen auf schonender Trocknung und auf der Herstellung definierter Korngrößenfraktionen durch Aufmahlen und/oder Sieben ($< 63 \mu\text{m}$ für aufgewirbelte, $< 250 \mu\text{m}$ für abgelagerte Stäube). Sofern nicht anders angegeben, erfolgen die Prüfungen unter atmosphärischen Startbedingungen hinsichtlich des Luftdrucks, der Temperatur und der Luftfeuchtigkeit.

4.2 Abgelagerte Stäube (Brandkenngrößen)

Die Untersuchung der abgelagerten brennbaren Stäube hat das Ziel, festzustellen, ob Zündquellen wie Funken, Flammen oder glühende Körper die Stäube in Brand setzen können. Außerdem sind Aussagen zu machen über die thermischen, geometrischen und zeitlichen Bedingungen, die zu einem durch Wärmeeintrag induzierten Staubbrand führen könnten. Ferner wird festgestellt, ob die Stäube sich exotherm zersetzen können, ob sie schlagempfindlich sind und ob bei erhöhten Temperaturen brennbare Schwelgase entstehen können.

4.2.1 Brennverhalten

Als Vorprobe, ob sich eine Staubschüttung entzünden läßt und in welchem Maße sich ein eingeleiteter Brand ausbreitet, wurde eine Brennzahl BZ eingeführt. Nach der VDI-Richtlinie 2263, Blatt 1 [1] werden ca. 5 cm³ Staubprobe als 2 cm breite und 4 cm lange Schüttung mit dreieckigem Querschnitt auf eine Keramikplatte aufgebracht (Abb. 4-1). Man versucht, die Probe mit einem glühenden Pt-Draht oder mit einer Gasflamme an einem Ende zu zünden, und beobachtet das Abbrandverhalten. Manchmal führt man die Prüfung auch bei erhöhter Temperatur im erwärmten Glasrohr durch. Die Bewertung des Brennverhaltens erfolgt nach Tabelle 4-1. Dabei werden die von 1 bis 6 unterteilten

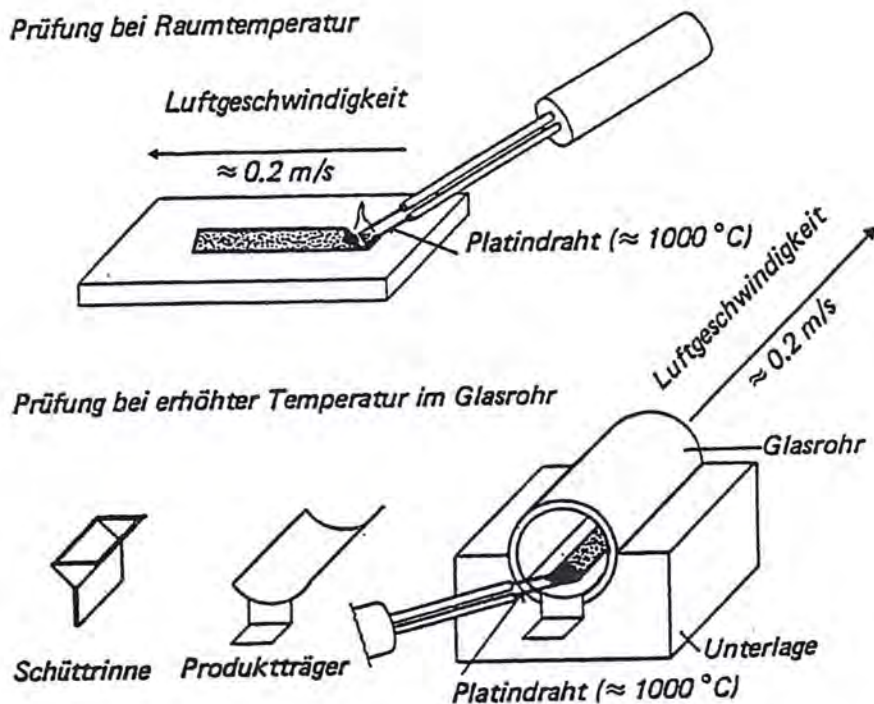


Abb. 4-1. Prüfeinrichtung zur Bestimmung der Brennzahl (nach [1]).

Brennzahlen durch das Brennverhalten von Vergleichssubstanzen charakterisiert. Die Prufemperatur (in °C) wird als Index an die Brennzahl BZ angehängt.

Tabelle 4-1. Festlegung der Brennzahl (BZ) durch Vergleichssubstanzen (nach [1]).

Beobachtetes Brennverhalten		BZ	Beispiele
Keine Ausbreitung eines Brands	Kein Anbrennen	1	Kochsalz
	Kurzes Entzünden und rasches Erlöschen	2	Weinsäure
	Ortliches Brennen oder Glimmen mit höchstens geringer Ausbreitung	3	d + Lactose
Ausbreitung eines Brandes	Durchglühen ohne Funkenwurf (Glimmbrand) oder langsame flammenlose Zersetzung	4	H-Säure, Tabak
	Abbrennen unter Flammerscheinung oder Funkensprühen	5	Schwefel
	Verpuffungsartiges Abbrennen oder rasche flammenlose Zersetzung	6	Schwarzpulver

4.2.2 Mindestzündtemperatur einer Staubschicht auf einer heißen Oberfläche (Glimmtemperatur)

Die Glimmtemperatur ist die STK zur Beschreibung der Zündgefahren, die von flachen Staubschichten auf heißen Oberflächen (z. B. Motoren, Rohren etc.) ausgehen können. Sie ist nach den Explosionsschutz-Richtlinien der Berufsgenossenschaft der chemischen Industrie (EX-RL) [2] bzw. nach der VDE-Richtlinie 0165 [3] "... die niedrigste Temperatur einer erhitzten, freiliegenden Oberfläche, bei der auf dieser in 5 mm dicker Schicht abgelagerter Staub zur Entzündung gelangt. Bei größeren Schichtdicken kann Glimmen unterhalb dieser Glimmtemperatur einsetzen".

Die Bestimmung der Glimmtemperatur erfolgt auf der in Abb. 4-2 gezeigten Heizplatte nach VDE 0170/0171, Teil 1503 [4]. Mit Hilfe eines geteilten Rings wird eine 5 mm hohe Staubschicht (Durchmesser = 100 mm) auf der Prufplatte ausgeformt. Die Temperatur der Platte wird geregelt und während des Versuchs konstant gehalten. Es wird festgestellt, ob es bei einer gewählten Plattentemperatur innerhalb von 2 Stunden zu einer Flammen- oder Glimmerscheinung kommt. Die Zündung wird visuell oder mittels eines sehr dünnen, horizontal durch die Staubschicht gespannten Thermoelements festgestellt. Als Glimmtemperatur wird die niedrigste (auf ganzzahlige Vielfache von 10 K nach unten abgerundete) Temperatur angegeben, bei der gerade noch Zündung eintritt.

Mit Hilfe der Glimmtemperatur sollen für den sicheren Betrieb höchstzulässige Oberflächentemperaturen von Betriebsmitteln festgelegt werden, indem 75 K als Sicherheitsspanne von diesem Wert abgezogen werden.

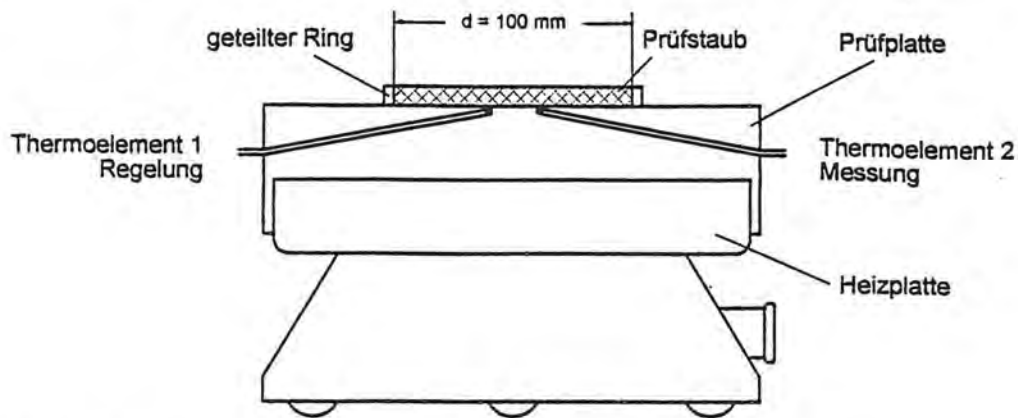


Abb. 4-2. Prüfeinrichtung zur Bestimmung der Glimmtemperatur (nach [1]).

Da diese Sicherheitsspanne durch dickere Staubauflagen sehr schnell aufgezehrt wird, wurde in der BAM ein Rechenverfahren entwickelt, um aus den gemessenen Wärmeleitfähigkeiten der Staubschüttungen, aus den scheinbaren Aktivierungsenergien der Verbrennungsvorgänge (Selbstentzündungsversuche) und aus jeweils einer Glimmtemperatur die Schichtdickenabhängigkeit der Glimmtemperaturen zu berechnen [5]. Dadurch können sichere Oberflächentemperaturen für beliebige Staubschichtdicken angegeben werden, die auf einer Oberfläche von konstanter Temperatur lagern.

Die dieser Randbedingung (*konstante Heizflächentemperatur* durch Temperaturregelung!) entsprechende Kenngröße (Glimmtemperatur) entspricht jedoch fast nie den in der

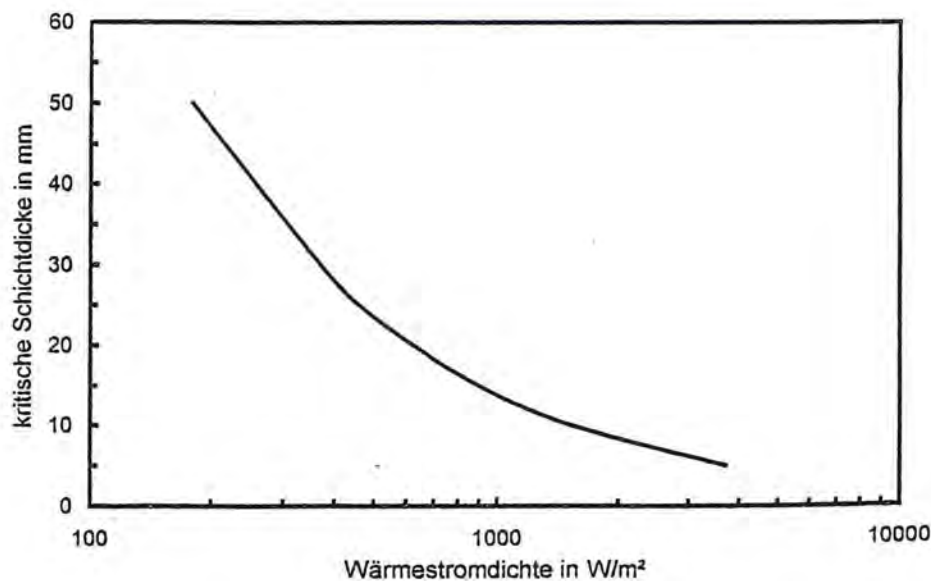


Abb. 4-3. Abhängigkeit der kritischen Schichtdicke von der Wärmestromdichte auf einer Heizplatte konstanter Wärmeleistung (Derner-Normalkohle) (nach [7]).

Praxis vorliegenden Bedingungen. Fast immer wird, den Betriebsbedingungen entsprechend, von der heißen Fläche (Motorgehäuse, Oberfläche einer Heizdampfleitung usw.) ein *konstanter Wärmestrom* abgegeben und auf den darauf liegenden Staub übertragen. Die Staubschicht wirkt einerseits wärmedämmend (was eine Temperaturerhöhung der Heizfläche nach sich zieht), andererseits erhitzt sich die Staubschicht nicht nur durch den von außen angebotenen Wärmestrom, sondern auch durch chemische Reaktion mit Luftsauerstoff an den einzelnen Staubpartikeln von innen. Solche Fälle lassen sich eindeutig und sicher nur durch numerische Rechenprogramme beschreiben, die die zeitliche Entwicklung des Temperaturfelds in der Schüttung unter Berücksichtigung der richtigen Randbedingungen liefern (FEM-Verfahren [6, 7]). Für diesen praktisch bedeutenderen Fall existieren aber keine experimentellen Kenngroenverfahren.

In Abb. 4-3 und 4-4 sind (nach [7] berechnete) kritische Staubschichtdicken bzw. Brandinduktionszeiten als Funktion der Wärmestromdichte der heißen Oberfläche für Steinkohlenstaub (Derner-Normalkohle) dargestellt. Als Eingabedaten benötigt das Programm den Brennwert H_0 , die Wärmeleitfähigkeit λ , die Schüttdichte ρ und die spezifische Wärmekapazität c_p des Staubs sowie Aktivierungsenergie E und Frequenzfaktor k_0 der Verbrennungsreaktion.

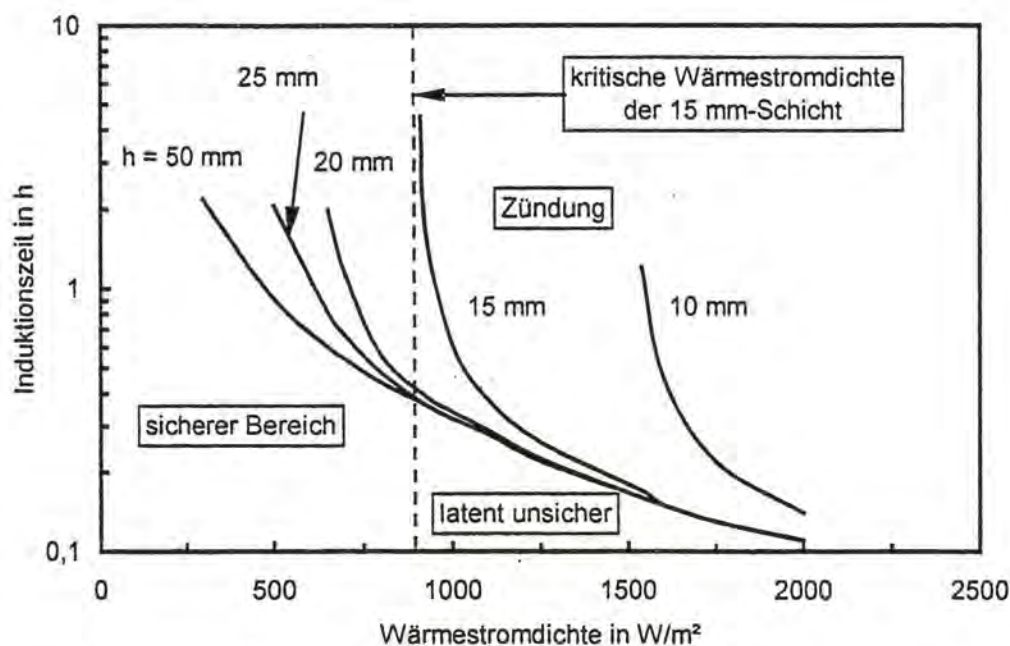


Abb. 4-4. Abhängigkeit der Induktionszeit von der Wärmestromdichte bei der Zündung von Staubschichten unterschiedlicher Dicke (Derner-Normalkohle) (nach [7]).

4.2.3 Selbstentzundungsverhalten von Staubschüttungen

Eine ausfuhrlische Beschreibung der Grundlagen und Untersuchungsmöglichkeiten von Selbstentzundungsvorgangen wurde bereits in Kap. 2.7 vorgenommen. Hier soll nur auf

das in der Praxis angewandte Verfahren zur Bestimmung von Selbstentzundungstemperaturen (*SET*) durch Warmlagerung eingegangen werden.

Brennbare Stäube neigen bereits bei relativ niedrigen Umgebungstemperaturen zur Selbstentzündung, weil an den Partikeloberflächen durch langsame Reaktion mit Luftsaauerstoff schon bei Raumtemperatur Wärme produziert wird. Das führt zu einer – zunächst sehr langsamen – Temperaturerhöhung in der Schüttung. Vom Volumen-Oberflächen-Verhältnis der Schüttung (d. h. von ihrer Form und Ausdehnung), von der Wärmeleitfähigkeit des Staubs und von der Umgebungstemperatur hängt es nun ab, ob die Rate der Wärmeverluste über die Schüttungsoberfläche diejenige der Wärmeproduktion übersteigt oder nicht. Im ersten Fall stellt sich auf etwas höherem Niveau ein Temperaturgleichgewicht ein. Im anderen Fall gibt es für jedes Volumen-Oberflächen-Verhältnis eines bestimmten Staubs eine andere kritische Umgebungstemperatur, oberhalb der die Temperatur im Staub durch innere Wärmeproduktion bis zur Selbstentzündung ansteigt.

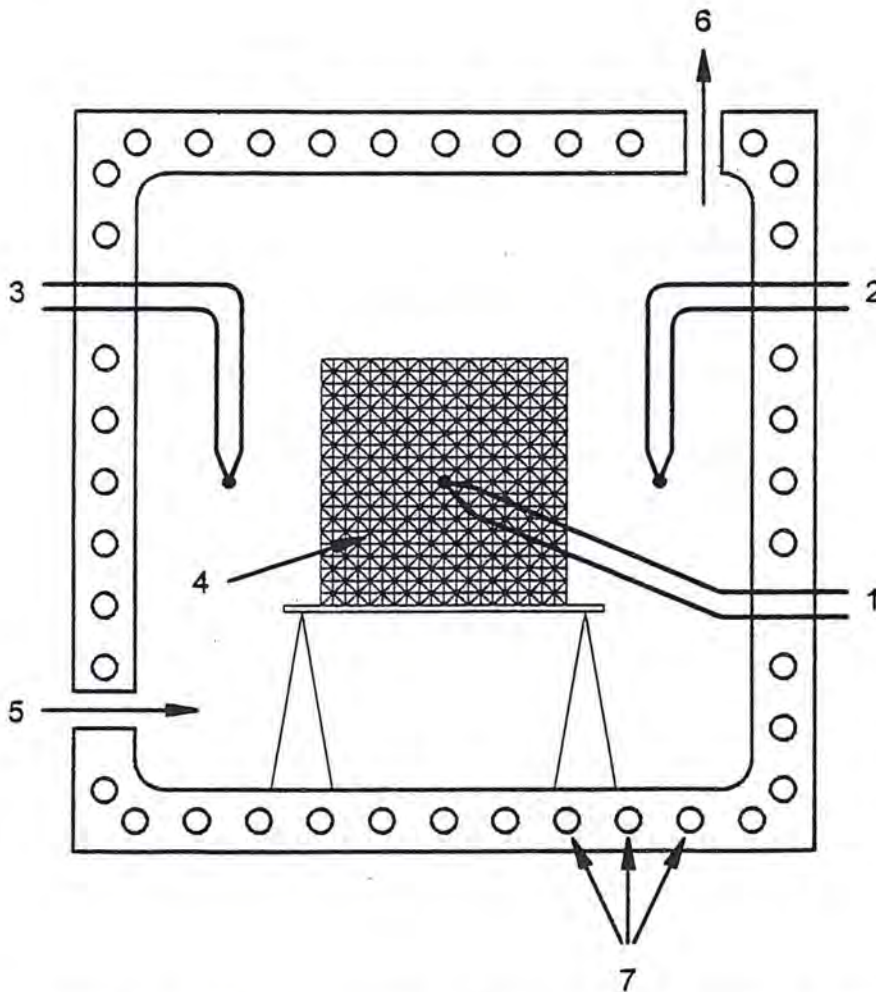


Abb. 4-5. Labor-Trockenschrank mit Staubprobe für isoperibole Warmlagerung (schematisch) (nach [5]). 1 = Thermoelement zur Messung der Staubtemperatur; 2,3 = Thermoelement zur Messung der Umgebungstemperatur (*SET*); 4 = Drahtnetzzyylinder mit Staubprobe; 5 = Lufteinlaß (natürliche Konvektion); 6 = Luftausla (natürliche Konvektion); 7 = Heizstäbe.

Das bedeutet, es gibt nicht eine *SET* eines Staubs, sondern einen *funktionalen Zusammenhang zwischen Größe und Geometrie der Staubschüttung einerseits und der Temperatur der Selbstentzündung andererseits*.

Die *SET* verschieden großer Staubschüttungen werden durch Warmlagerungsversuche in Labortrockenschranken bestimmt, wie in Abb. 4-5 dargestellt. Unterschiedlich große Drahtnetzbehalter definierter Volumens und definierter geometrischer Oberfläche werden mit Staub gefüllt und bei konstanter Umgebungstemperatur gelagert (isoperibole Bedingungen). Dabei wird festgestellt, ob die Schüttung sich nach hinreichend langer Zeit entzündet oder nicht.

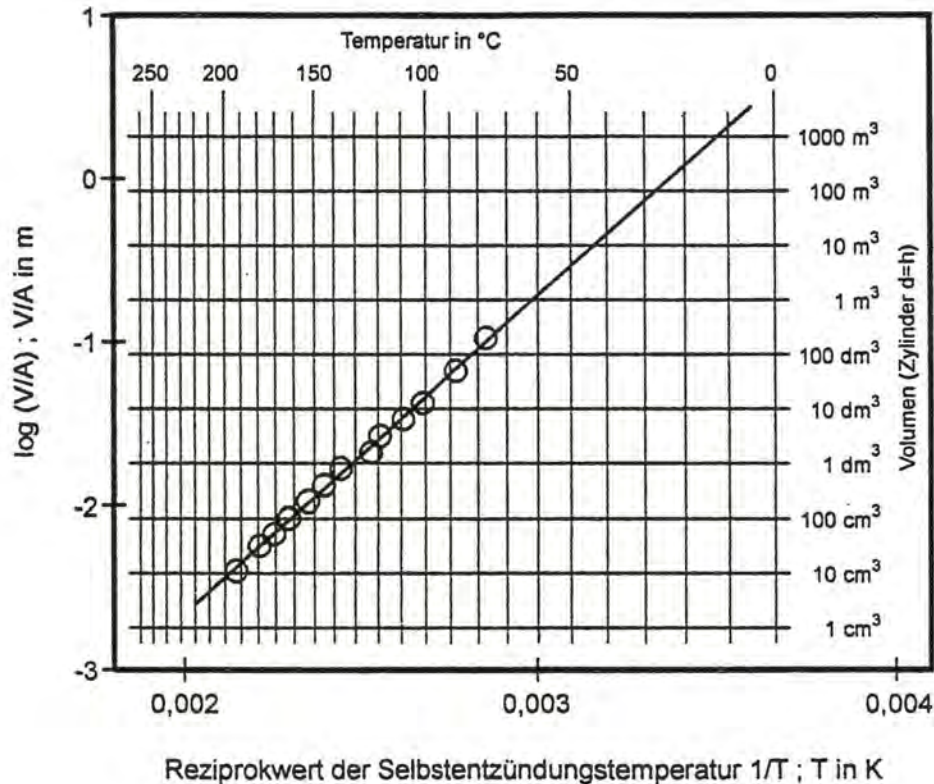


Abb. 4-6. Abhängigkeit der Selbstentzundungstemperaturen vom Volumen-Oberflächen-Verhaltis der Schüttungen (Derner-Normalkohle).

Mit jeweils neuer Staubsfullung wird die Lagerung bei anderen Temperaturen wiederholt. Die Zündung wird durch das im Zentrum des Staubs befindliche Thermoelement angezeigt. Als *SET* gilt der *Mittelwert zwischen der höchsten Umgebungstemperatur, die noch nicht zur Zündung führt, und der niedrigsten Umgebungstemperatur, die gerade schon zündet*. Als Probenbehälter werden oft oben offene Drahtnetzzyylinder mit einem Durchmesser-Längen-Verhaltis von $d/h = 1$ verwendet.

Die *SET*-Meßwerte können als reziproke absolute Temperaturen $1/T$ gegen den Logarithmus des Volumen-Oberflächen-Verhaltisses $\log(V/A)$ der Staubschüttung entspre-

chend Abb. 4-6 abgetragen werden. Die Ausgleichsgerade durch die Meßpunkte ist extrapolierbar. Diese halbempirische Darstellungsweise ist zur Ermittlung der Selbstentzundungstemperaturen bei der Untersuchung recht großer Schüttungen näherungsweise brauchbar. Die Abbildung zeigt, daß mit steigendem Staubvolumen die *SET* sinkt.

Zu beachten ist aber auch, daß mit steigendem Staubvolumen die "Induktionszeit" für die Auslösung eines Brands (bei der jeweiligen *SET*!) ansteigt. Die Volumenabhängigkeit der Induktionszeit läßt sich als Gerade in einem $\log(V/A)$ - vs. $\log t$ -Diagramm angeben (Abb. 4-7). Der eingetragene $\log(V/A)$ -Wert von 0,511 entspricht z. B. einer Kohlenhalde von 49.329 m^3 Volumen und 15.200 m^2 Oberfläche. Bei einer konstanten Umgebungstemperatur (= *SET*) von $+5^\circ\text{C}$ würde sich diese Halde nach etwa 10 Jahren (!) von selbst entzünden. Die Induktionszeit ist im Laborexperiment der Zeitraum zwischen dem Einstellen der Probe in den vorgeheizten Trockenschrank und dem Zeitpunkt des Brandeintritts. Das Warmlagerungsverfahren ist in VDI-2263 beschrieben. Eine Europannorm ist bei CEN/TC 305 in Vorbereitung.

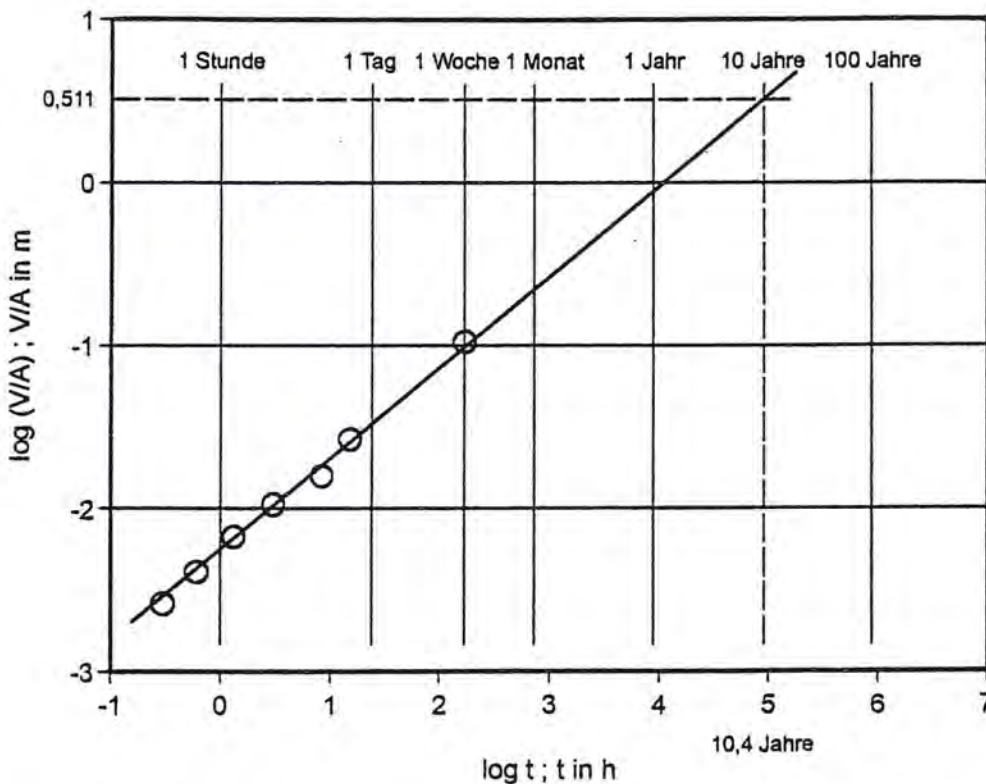


Abb. 4-7. Experimentell bestimmte Induktionszeiten von Selbstentzundungsvorgangen in Sternkohle (knapp oberhalb der jeweiligen *SET*).

Eine exaktere Behandlung des Selbstentzundungsproblems folgt der Theorie der "Warmeexplosion" (s. Abschnitt. 2.7.2). Auch in diesem Fall läßt sich durch Anwendung von FEM-Rechnungen eine exakte Berechnung der *SET* großer Schuttvolumina bei beliebiger Temperatur erreichen (s. Abschnitt. 2.7.3).

4.2.4 Deflagrationsfähigkeit

Unter Deflagration wird – im Zusammenhang mit Kenngrößen abgelagerter, brennbarer Stäube – die fortschreitende Zersetzung einer Staubschüttung nach lokal ausgelöster Zündung verstanden. Im Gegensatz zu einem Brand kann sie durch Sauerstoffausschluß nicht unterbunden werden.

Die Prüfung erfolgt in einem senkrecht stehenden geschlossenen Glasrohr (Durchmesser ca. 50 mm, Länge 100 bis 200 mm), in dem in verschiedenen Höhen mehrere Thermo-elemente angebracht sind (Abb. 4-8). Das Glasrohr wird bei Raumtemperatur mit der Probe bis kurz unter den oberen Rand gefüllt. Als Zündquellen können alternativ verwendet werden: Glühwendel, Glühkerze, Mikrobrenner oder Zündmischung (Silizium/Bleioxid im Gewichtsverhältnis 3:2). Die charakteristischen Temperaturverläufe des Tests werden gegebenenfalls auf einem Mehrkanalschreiber registriert. Eine Ausbreitung der Zersetzung wird visuell und/oder mit Hilfe von Thermo-elementen verfolgt. Wandert die Zersetzungsfront in einem Versuch, so gilt die Substanz als deflagrationsfähig.

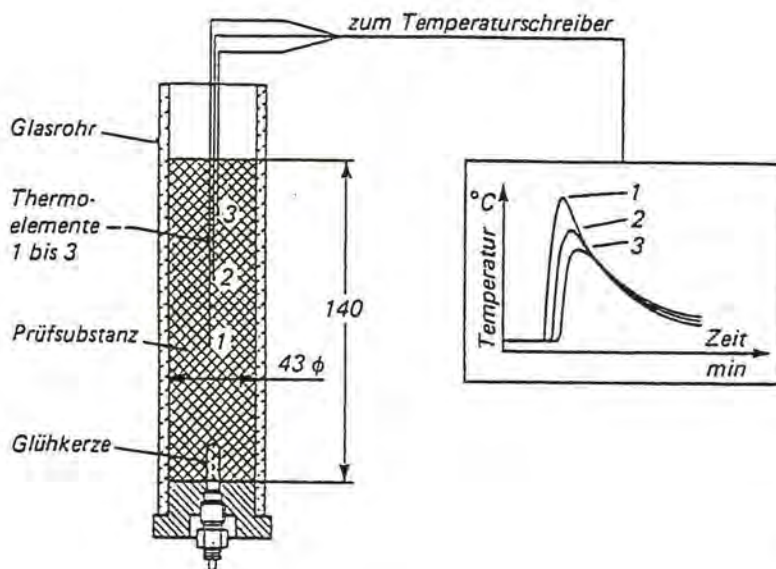


Abb. 4-8. Prüfapparatur zur Bestimmung der Deflagrationsfähigkeit (nach [1]).

4.2.5 Schlagempfindlichkeit

Bei der Prüfung auf Schlagempfindlichkeit wird festgestellt, ob in einer Staubprobe durch einen Schlag von definierter Energie eine Zersetzungsreaktion oder Explosion ausgelöst werden kann. Die Prüfung erfolgt mit einem Fallhammer (Abb. 4-9) nach Koenen, Ide und Swart [8]. 40 mm³ der Staubprobe werden zwischen zwei übereinanderstehenden Stahlzylindern (Durchmesser = 10 mm, Hohlzylinder als Führungsring) eingeschlossen und einer Schlagbeanspruchung von 49 J (Fallmasse = 5 kg, Fallhöhe = 1 m) ausgesetzt. Der Versuch wird so oft durchgeführt, bis während maximal sechs Fallversuchen mindestens einmal eine Reaktion (Knall, Rauch, Feuer, Funken) beobachtet wird.

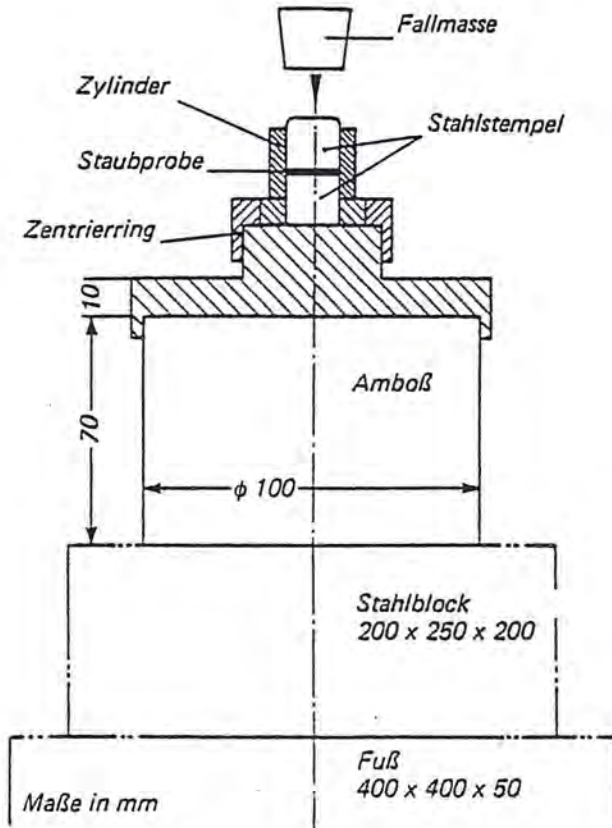


Abb. 4-9. Schema der Fallhammerapparatur von Koenen, Ide und Swart zur Bestimmung der Schlagempfindlichkeit von Stäuben (nach [1]).

Bei der Variation dieses Verfahrens nach Lütolf werden Proben von ca. 100 mg, in 0,01 mm dicker Alufolie verpackt, einer Schlagbeanspruchung von 39 J (Fallmasse = 5 kg, Fallhöhe = 0,8 m) ausgesetzt. Der Versuch wird auch hier wiederholt, bis eine Reaktion (Knall, Rauch, Feuer, Funken) beobachtet wird. In diesem Fall werden höchstens zehn Versuche durchgeführt. Wird bei diesem Vorgehen eine Reaktion beobachtet, so muß die Prüfung ohne die möglicherweise sensibilisierend wirkende Alufolie wiederholt werden. Tritt bei der Prüfung keine Reaktion auf, so ist die Probe als "nicht schlagempfindlich" zu bewerten. Im anderen Fall sind weitergehende Untersuchungen (z. B. Prüfungen auf Schlagempfindlichkeit nach dem Sprengstoffgesetz) erforderlich [9].

4.2.6 Kenngrößen von Schwelgasen aus thermisch belasteten Staubschüttungen

Bei den bisher abgehandelten Kenngrößen und Eigenschaften der abgelagerten Stäube handelte es sich immer um solche, die für die Auslösung oder die Bedingungen eines Brands in einer Staubschüttung verantwortlich waren. Allerdings können – über die Bildung brennbarer Schwelgase – von einer Staubschüttung auch Explosionen ausgehen, ohne daß der Staub dazu primär aufgewirbelt sein mußte. Beim Erhitzen von Staubschüttungen oder -schichten kann der Staub sich pyrolytisch zersetzen. Dabei entstehen

Schwelgase, Monomere von Kunststoffen oder Lösemitteldämpfe (die hier auch als Schwelgase betrachtet werden). Gefährlich sind nur die brennbaren Schwelgase. Die Explosionskenngrößen von Schwelgasen können nach Verfahren in Anlehnung an die Untersuchungen von Staub-Luft- oder Gas-Luft-Gemischen bestimmt werden.

Brennbarkeit von Schwelgasen

Eine Staubprobe wird im Reagenzglas – in einem elektrisch beheizten Kupferblock mit Bohrung und Thermometer – kontinuierlich bis auf eine genügend hohe Temperatur aufgeheizt. Dabei wird geprüft, ob die entstehenden Gase oder Dämpfe mit einem glühenden Platindraht oder einer Flamme entzündet werden können oder nicht. Angegeben wird, ob sich *brennbare Schwelgase* entwickeln.

Schwelpunkt

Verwendet wird eine Prüfapparatur in Anlehnung an die Flammpunktbestimmungsapparaturen mit geschlossenen Tiegel [10]. Die Prüfung erfolgt analog einer Flammpunktbestimmung. Als Schwelpunkt wird die niedrigste Wandtemperatur angegeben, bei der die entstehenden Schwelgas-Luft-Gemische entzündet werden konnten.

Maximale Explosionsdruck und maximaler zeitlicher Druckanstieg von Schwelgasexplosionen

Ähnlich wie die später in Abschn. 4.3 beschriebenen Kenngrößen maximaler Explosionsdruck p_{\max} und maximaler zeitlicher Druckanstieg $(dp/dt)_{\max}$ von Staubwolken (s. dort) werden die ihnen analogen Kenngrößen p_{\max} und $(dp/dt)_{\max}$ der brennbaren Schwelgase in einer 20-L-Kugel untersucht. Die dazu verwendete 20-L-Kugel zeigt Abb. 4-10. Sie ist eine Konstruktion der BAM.

Die Kugel besteht aus zwei dicht aneinandergeflanschten Halbkugeln A und B). Halbkugel B ist durch einen Bodenflansch (C) verschlossen, der den Schweleinsatz (D) trägt. Halbkugel A ist durch einen Deckelflansch (E) verschlossen, der eine Gewindeöffnung (F) zur Aufnahme des Drahtexplosionszünders und verschiedene andere Instrumentierungsöffnungen (für Druckaufnehmer, Thermoelement etc.) enthält.

Der Schweleinsatz besteht aus einer hohlzylinderförmigen Heizmanschette, die das 100 cm³ fassende Becherglas für die Staubprobe aufnimmt. In diesem Becherglas werden unterschiedliche Mengen Staub (30 bis 90 cm³) unterschiedlich lange (200 bis 600 Sekunden) erhitzt, um Schwelgas-Luft-Gemische mit verschiedenen Schwelgaskonzentrationen zu erzeugen. Während einer Versuchsreihe werden die so erzeugten Schwelgas-Luft-Gemische im Zentrum der Kugel mit einem Drahtexplosionszünder entzündet. Mit Druckaufnehmern werden jeweils p_{ex} und $(dp/dt)_{\text{ex}}$ gemessen und deren Maximalwerte ausgewählt, die dem optimalen Schwelgas-Luft-Gemisch entsprechen.

An aus Lycopodium freigesetzten Schwelgasen wurden bei 20°C folgende Maximalwerte der Kenngrößen bestimmt: $p_{\max} = 7,9$ bar (absolut), $K_G = 132$ bar · m/s. Die Standardabweichung von p_{\max} beträgt etwa $\pm 0,1$ bar, diejenige von K_G etwa $\pm 1,5$ bar · m/s. (K_G ist der auf ein Volumen von 1 m³ normierte $(dp/dt)_{\max}$ -Wert: $K_G = (dp/dt)_{\max} V^{1/3}$ in bar · m/s. Zur Definition von K_G s. Kap. 3.3.5.2.)

Aus Abb. 4-10 ist zu entnehmen, daß an den äußeren zylindrischen Teilen des Gefäßes Heizmanschetten (G) angebracht sind, die es gestatten, auch bei erhöhten Anfangstemperaturen des Schwelgas-Luft-Gemischs (bis zu etwas mehr als 200°C) Versuche durchzu-

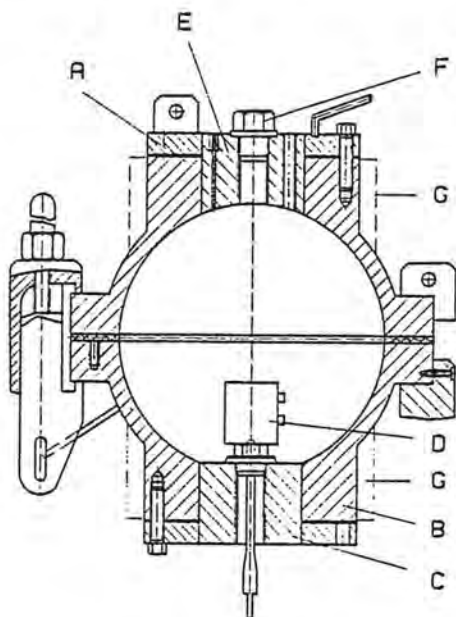


Abb. 4-10. 20-L-Explosionsgefäß der BAM zur Erzeugung von Schwelgasen und zur Untersuchung ihrer Explosionskenngrößen p_{\max} und $(dp/dt)_{\max}$ (Erläuterungen im Text).

führen. Dazu wird das Gefäß bis zur Temperaturkonstanz vorgeheizt. Zum Druckausgleich und zum Befüllen mit Staub wird kurzfristig der Deckelflansch geöffnet. Die Probe wird eingefüllt und anschließend verschwelt. Die Folge ist, daß entsprechend der Temperaturexpansion der Luft nach dem Druckausgleich weniger Mole O_2 bei höheren Temperaturen zur Reaktion zur Verfügung stehen als bei $20^\circ C$.

Zu erwarten ist, daß – entsprechend dem zwangsläufig geringeren Reaktionsumsatz – p_{\max} bei steigenden Temperaturen sinkt. Diese – dem idealen Gasgesetz folgende – Abhängigkeit wurde auch experimentell gefunden.

Tabelle 4-2. Untersuchungsergebnisse an Schwelgasen, die aus Lycopodiumstaub freigesetzt wurden. Fettgedruckt sind p_{\max} und KG der Versuchsreihe bei der jeweiligen Temperatur. t = Schwelzeit des jeweiligen Versuchs.

Staub menge	Gemischtemperaturen											
	20°C				100°C				200°C			
[ml]	p_{ex} [bar]	t [s]	$(dp/dt)V^{1/3}$ [bar m / s]	t [s]	p_{ex} [bar]	t [s]	$(dp/dt)V^{1/3}$ [bar m / s]	t [s]	p_{ex} [bar]	t [s]	$(dp/dt)V^{1/3}$ [bar m / s]	t [s]
30	7,7	520	32	600	6,9	420	38	390	5,5	300	34	280
45	7,7	500	62	380	7,1	360	50	360	5,7	240	48	240
60	7,9	390	132	360	7,2	290	56	290	5,7	220	48	220
75	7,8	390	88	360	7,2	310	55	300	5,9	240	51	240
90									5,8	220	44	220

Die Auswirkung auf $(dp/dt)_{\max}$ (bzw. K_G) ist nicht ohne weiteres vorherzusagen, da der Einfluß der Temperatur auf die Reaktionskinetik (in Verbindung mit dem geringeren O_2 -Gehalt) schwer abzuschätzen ist. In Tabelle 4-2 sind die Ergebnisse von Lycopodium-

Schmelgasexplosionen bei verschiedenen Temperaturen zusammengestellt. Danach sinkt p_{\max} mit steigender Starttemperatur von 7,9 bar bei 20°C über 7,2 bar bei 100°C auf 5,9 bar bei 200°C ab; K_G sinkt noch stärker von 132 bar · m/s bei 20°C über 56 bar · m/s bei 100°C auf 51 bar · m/s bei 200°C Gemischtemperatur.

4.3 Aufgewirbelte Staub-Luft-Gemische (Explosionskenngrößen)

In Industriezweigen, die brennbare Stäube verwenden, herstellen oder transportieren, ist eine genaue Kenntnis der damit zusammenhängenden Explosionsgefahren wünschenswert. Verschiedene Bücher [11–16] sind seit etwa 1980 zum Rahmenthema der Explosionsgefahren bei Stäuben und Pulvern veröffentlicht worden. Unter einer Explosion versteht man die schnelle Oxidation brennbaren Materials, die zu einem raschen Temperatur- und Druckanstieg führt. Voraussetzung für eine Staubexplosion ist: Ein brennbarer Staub, mit Luft zu einer Staubwolke aufgewirbelt, dessen Konzentration oberhalb der unteren Explosionsgrenze liegt und die Anwesenheit einer genügend energiereichen Zündquelle.

Das Ausmaß der Auswirkungen einer Explosion hängt von der Energiefreisetzungsrate der chemischen Reaktion im Vergleich zu den Wärmeverlusten und zur Festigkeit des umschließenden Materials ab. Die Energiefreisetzungsrate (d. h. die Heftigkeit der Explosion) eines gezündeten Staub-Luft-Gemischs ist nicht nur von den chemischen und physikalischen Daten des Staubs (Verbrennungswärme, Aktivierungsenergie der Verbrennungsreaktion, Korngrößenverteilung, Pyrolysefahigkeit) bestimmt, sondern auch ganz wesentlich vom Wärme- und Stofftransport in der explodierenden Staubwolke.

Damit haben die *Strömungsbedingungen* (Turbulenzzustand vor und während der Verbrennung) innerhalb des Staub-Luft-Gemischs entscheidende Bedeutung. Der Einfluß der Strömungsbedingungen auf den Ablauf von Staubexplosionen ist in zunehmendem Maße Gegenstand der aktuellen Forschung. In den derzeit eingeführten Kenngroenbestimmungsverfahren bei Staubexplosionen spielen solche Überlegungen aber leider bestenfalls eine untergeordnete Rolle.

Kornform und Korngröße sind ebenfalls wesentliche Punkte bei der Beurteilung der Explosionsfähigkeit von Stäuben. Allgemein gilt :

Kornformen, die eine größere Oberfläche haben als andere, werden heftiger reagieren und gefährlicher sein. Feinkörnige Stäube sind reaktiver als grobkörnige.

Der Flammenfortpflanzungsmechanismus vieler Stäube beruht auf der Verbrennung von Pyrolysegasen, die zunächst in der Nähe des Zundorts (durch die Energie des Zünders) aus den Staubpartikeln freigesetzt werden. Andere Stäube (z. B. Metalle) unterhalten eine Explosionsflamme auch durch direkte Oxidation der Moleküle in den Feststoffoberflächen.

Literaturwerte von Explosionskenngrößen können zwar *Hinweise* auf die Gefahr liefern, die von einem speziellen Staub ausgehen kann. Es ist aber vorzuziehen, diese

Kenngrößen jeweils experimentell zu untersuchen, weil die veröffentlichten Daten nur für die jeweils vorliegende Korngrößenverteilung gelten, die vom aktuellen Fall in der Regel abweicht.

4.3.1 Maximaler Explosionsdruck und maximaler zeitlicher Druckanstieg von Staubexplosionen

Die Druckentwicklung bei der Explosion eines Staub-Luft-Gemischs wird zur Zeit nach allgemeiner Übereinkunft durch die beiden Kenngrößen maximaler Explosionsdruck p_{\max} und maximaler zeitlicher Druckanstieg $(dp/dt)_{\max}$ charakterisiert. Beide Kenngrößen werden nebeneinander – unter festgelegten Versuchsbedingungen – in geschlossenen Behältern aus der gleichen Versuchsreihe experimentell ermittelt.

Der maximale Explosionsdruck p_{\max} eines chemisch definierten Staubs läßt sich aber auch aus den thermodynamischen Daten der Reaktionspartner und der Verbrennungsprodukte der Verbrennungsreaktion unter gewissen vereinfachenden Annahmen berechnen [17, 18]. Es zeigt sich bei Vergleichen, daß die Rechnung im allgemeinen etwas höhere Drücke liefert als die experimentelle Bestimmung des p_{\max} -Werts, weil mindestens eine der Annahmen der Rechnung (adiabater Reaktionsverlauf) nur angenähert gilt.

Die experimentelle Bestimmung von p_{\max} erfolgt aus Versuchsreihen mit systematisch variierten Staubkonzentrationen in geschlossenen Behältern, indem der durch Luftstoß aufgewirbelte Staub pyrotechnisch gezündet und der Explosionsdruck mit piezoelektrischen Druckaufnehmern registriert wird. Die Ergebnisse der p_{\max} -Bestimmungen hängen nur wenig vom gewählten Untersuchungsverfahren ab und sind zufriedenstellend reproduzierbar.

Der aus der gleichen Versuchsreihe in einem Volumen von 1 m³ bestimmte oder auf ein Volumen von 1 m³ normierte maximale zeitliche Druckanstieg $(dp/dt)_{\max}$ der Explosion eines Staub-Luft-Gemischs optimaler Staubkonzentration wird K_{St} -Wert genannt. Der K_{St} -Wert hängt stark vom gewählten Untersuchungsverfahren ab, weil neben der Kinetik der chemischen Reaktion der Strömungszustand des Staub-Luft-Gemischs die Heftigkeit der Explosion beeinflußt.

Bei der Entwicklung eines brauchbaren Untersuchungsverfahrens zur Bestimmung von $(dp/dt)_{\max}$ bzw. K_{St} mußten alle bereits in der Einleitung erwähnten Schwierigkeiten, die mit der Erzeugung von Staub-Luft-Gemischen verbunden sind, berücksichtigt werden, nämlich vor allem die mangelhafte Kenntnis der Gleichverteilung des Staubs im Prüfvolumen und die fehlende Kenntnis des Strömungszustands der erzeugten Staubwolke.

Als Standardverfahren gilt zur Zeit die in der VDI-Richtlinie 3673 beschriebene Prozedur im 1-m³-Explosionsgefäß [19, 20]. Die Staubwolke befindet sich dabei unter einem Pressluftdruck von 20 bar in dem 5 L fassenden Staubvorratsbehälter (Abb. 4-11), der durch ein Sprengkapselventil verschlossen ist. Nach dem Öffnen des Ventils treibt die Pressluft den Staub durch den perforierten Halbring in den 1 m³ großen Explosionsraum. Die Durchmesser der Perforationen betragen 4 bis 6 mm bei einer gesamten Austrittsfläche von 300 mm². Nach einer Verzögerungszeit von 0,6 s wird gezündet. Das ist der Zeitpunkt, zu dem die Mehrzahl der Stäube gerade quantitativ in den Explosionsraum ausgeblasen sein sollen. Der Zündverzögerungszeit von 0,6 s entspricht ein bestimmter –

aber nicht näher definierbarer – Turbulenzzustand des Staub-Luft-Gemischs, der als reproduzierbar angenommen wird. Gezündet wird durch zwei pyrotechnische Zünder von insgesamt 10 kJ Energieinhalt im Zentrum des Behälters.

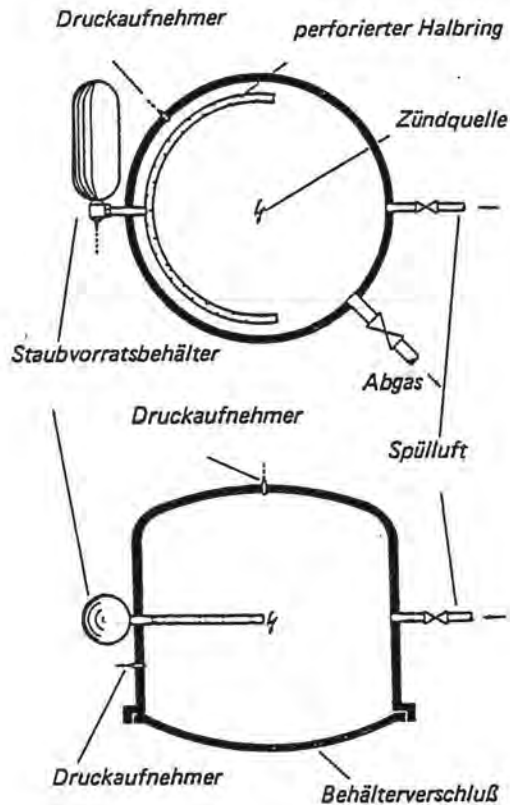


Abb. 4-11. 1-m³-Behälter zur Bestimmung von Staubexplosionskenngrößen (nach [1]).

In Abb. 4-12 sind die Abläufe der Entleerung des Staubvorratsbehälters (oben) und der Explosionsdruckentwicklung im Explosionsraum (unten) über einer gemeinsamen Zeitachse abgetragen. Das Maximum der Druck-Zeit-Kurve eines einzelnen Explosionsversuchs im Explosionsbehälter ist der Explosionsdruck p_{ex} dieses Versuchs. Als höchsten Druckanstieg $(dp/dt)_{\text{ex}}$ eines jeden Versuchs gibt man die Steigung der Tangente im Umkehrpunkt des ansteigenden Astes dieser Druck-Zeit-Kurve an; $(dp/dt)_{\text{ex}} = \Delta p / \Delta t$. Versuche mit geringerer Zündverzögerungszeit (bei sonst gleichen Bedingungen) hätten eine Erhöhung von $(dp/dt)_{\text{ex}}$ zur Folge (wegen größerer Turbulenz, trotz geringerer Staubmenge). Aus Versuchen mit größerer Zündverzögerungszeit erhielt man kleinere $(dp/dt)_{\text{ex}}$ -Werte (wegen zeitlich abklingender Turbulenz)!

Zur Bestimmung von p_{max} und $(dp/dt)_{\text{max}}$ sind Versuche über einen weiten Staubkonzentrationsbereich nötig. Die maximalen Werte beider Größen entnimmt man nach Beendigung der Versuchsreihen Diagrammen entsprechend den in Abb. 4-13 gezeigten. Diese p_{max} - und $(dp/dt)_{\text{max}}$ -Werte liegen im allgemeinen beim zwei- bis dreifachen Wert der Staubkonzentrationen der stöchiometrischen Staub-Luft-Gemische. Der im 1-m³-Behälter gemessene $(dp/dt)_{\text{max}}$ -Wert ist identisch mit dem K_{St} -Wert. In Behältern anderer

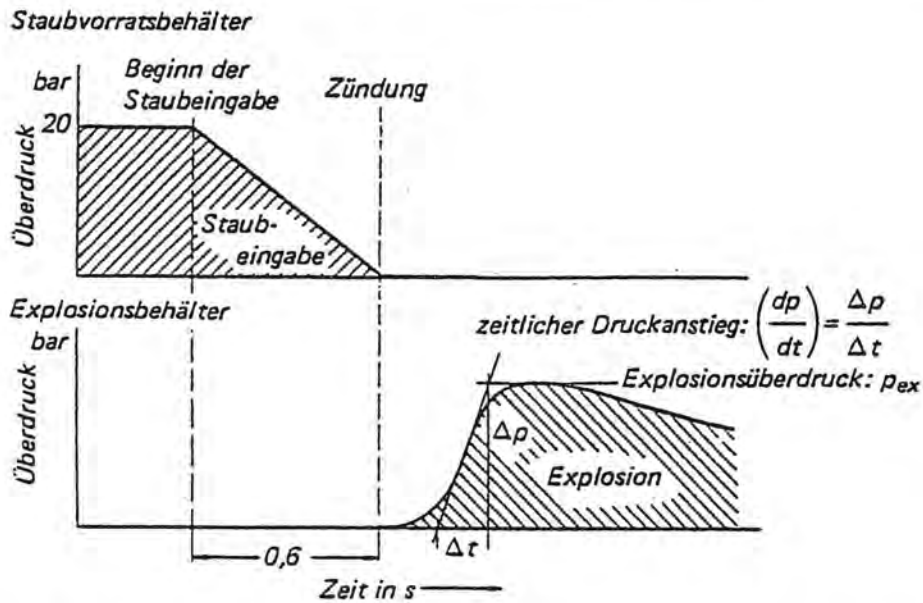


Abb. 4-12. Zeitliche Druckverläufe und Zündzeitpunkt bei Staubexplosionsprüfungen mit dem 1-m³-Behälter (nach [1]).

Größe gemessene $(dp/dt)_{\max}$ -Werte sollten unter der Annahme einiger wesentlicher Vereinfachungen nach dem "kubischen Gesetz" mit dem K_{St} -Wert zusammenhängen [11]:

$$\left(\frac{dp}{dt}\right)_{\max} \cdot V^{\frac{1}{3}} \approx \text{konst} = K_{St}; \quad K_{St} \text{ in } \text{bar} \cdot \text{m} \cdot \text{s}^{-1} \quad (4-1)$$

Die Angabe des Drucks (p) erfolgt dabei in bar, die des Volumens (V) in m³. Aus dem K_{St} -Wert werden mit Hilfe der VDI-Richtlinie 3673 – unter bestimmten Randbedingungen – Druckentlastungsflächen für staubexplosionsgefährdete Behälter ermittelt.

Da das Arbeiten mit dem 1-m³-Behälter viel Zeit beansprucht, große Probemengen erfordert (für einen Meßpunkt bei der Konzentration 1500 g/m³ benötigt man z. B. 1,5 kg Substanz) und deshalb nicht mehr als "Labormessmethode" gelten kann, suchte man nach leichter handhabbaren Meßverfahren mit geringerer Probemenge für den Einsatz im Labor. Versuche in unterschiedlich großen Behältern zeigten, daß miteinander vergleichbare Werte am ehesten aus Apparaturen mit einem Mindestvolumen von 16 L zu erhalten sind. Deshalb wurde für Laboruntersuchungen ein Explosionsgefäß von 20 L Rauminhalt entwickelt [21, 22] (Abb. 4-14).

Versuchsreihen an vielen Stäuben waren nötig, um die Zündverzögerungszeit dieser kleineren Apparatur so anzupassen, daß in der Mehrzahl der Fälle dem 1-m³-Behälter entsprechende Ergebnisse gefunden wurden. Trotzdem stimmen die Versuchsergebnisse nicht in allen Fällen zwischen beiden Apparaturen überein. Das ist auch kaum anders zu erwarten, denn besonders leichte bzw. besonders schwere Stäube werden sich nach der

auf 60 ms festgelegten Zündverzögerungszeit in der 20-L-Kugel räumlich anders verteilen als nach der 10fach längeren Zündverzögerungszeit im 1-m³-Behälter. Am besten stimmen in beiden Behältern Versuche mit Stäuben von mittlerer Dichte überein, für die die Anpassung der beiden Methoden auch erfolgte.

Die Vorteile der leichteren Handhabbarkeit der 20-L-Kugel überwiegen die erwähnten

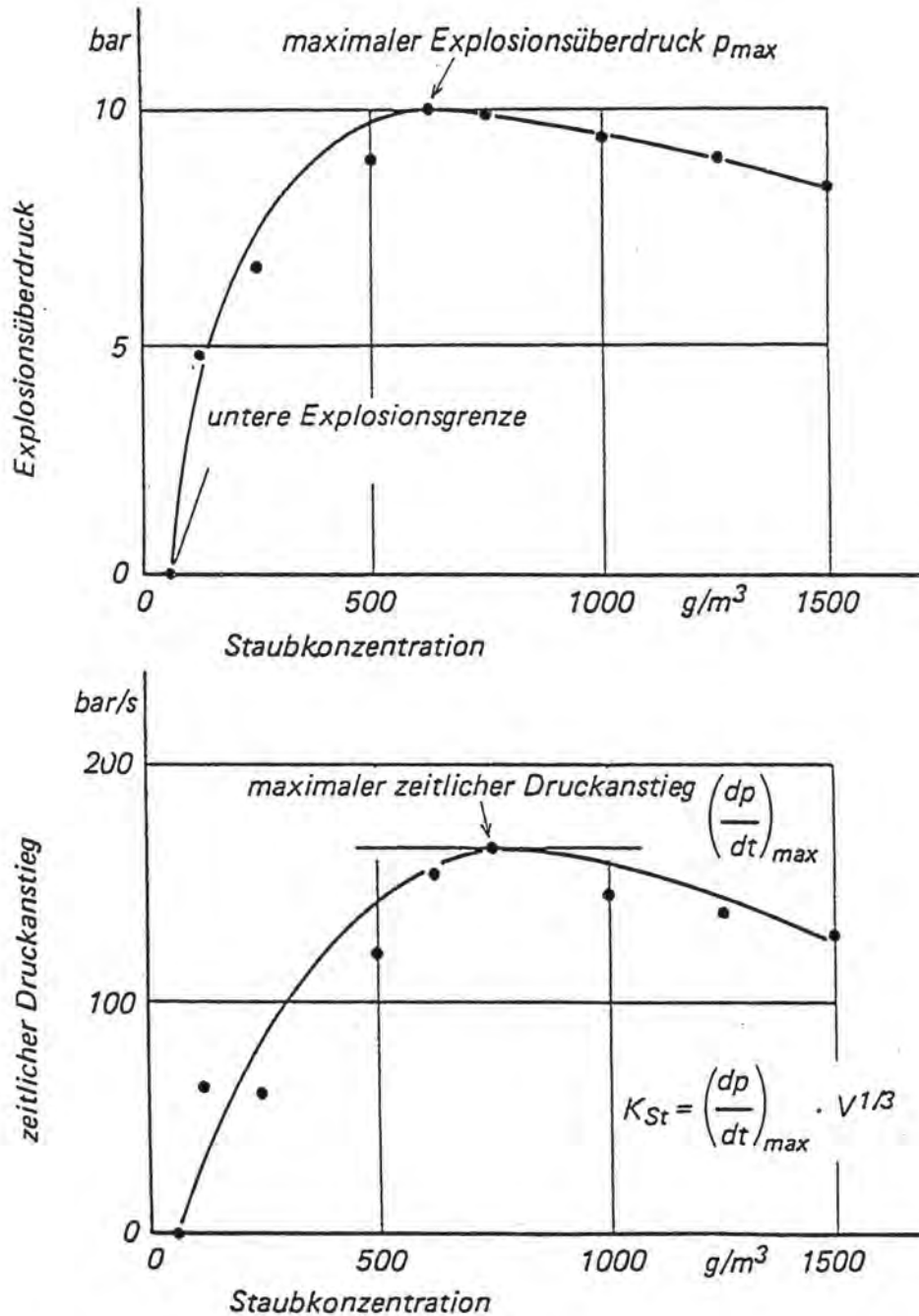


Abb. 4.13. Explosionsüberdruck und zeitlicher Druckanstieg als Funktion der Staubkonzentration bei Versuchsreihen in geschlossenen Behältern (nach [1]).

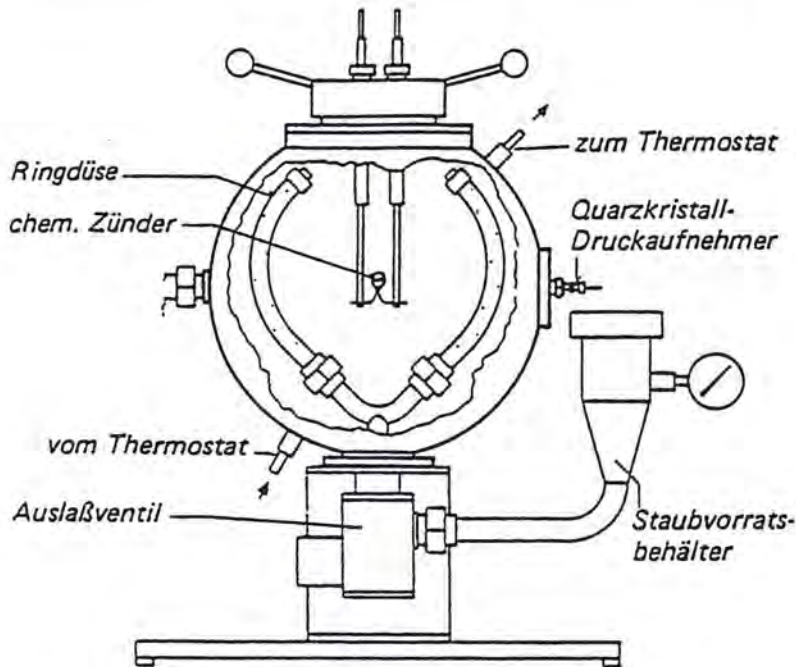


Abb. 4-14. 20-L-Laborapparatur zur Bestimmung von Staubexplosionskenngrößen (nach [1]).

Probleme jedoch so sehr, daß dieses Gerät starke Verbreitung gefunden hat und beide Apparaturen nebeneinander verwendet werden. Es wird dabei die Vergleichbarkeit der Ergebnisse unterstellt. In Zweifelsfällen sind die Ergebnisse des 1-m³-Behälters heranzuziehen.

Die Stäube werden nach der Größe der gemessenen K_{St} -Werte in Staubexplosionsklassen (St 1, St 2 oder St 3) eingeteilt:

- St 1 = $0 < K_{St} < 200$ bar m / s
- St 2 = $200 < K_{St} < 300$ bar m / s
- St 3 = $K_{St} > 300$ bar m / s

Gewissermaßen als Nebenprodukt fällt bei den Untersuchungen der Explosionskenngrößen über einen breiten Konzentrationsbereich als Ergebnis die Aussage an, ob der fragliche Staub in Form eines Staub-Luft-Gemischs überhaupt explosionsfähig ist. Verwendet man die 20-L-Kugel nur zur Feststellung der „Explosionsfähigkeit“, dann wird dazu ein Zünder von nur 1 bis 2 kJ Energieinhalt verwendet. Das Kriterium zur Entscheidung ist dabei die Höhe des Druckaufbaus, der sich im Explosionsgefäß einstellt. Mißt man bei irgendeiner Staubkonzentration nach der Auslösung des Zünders im Explosionsgefäß einen Druck, der um mehr als 0,5 bar über dem Explosionsdruck des Zünders allein – also ohne Staub – liegt („prüfverfahrensbedingter Anfangsdruck“), dann ist der fragliche Staub „staubexplosionsfähig“. Stellt sich nur ein geringerer Druck ein, dann gilt dieser Staub als „nicht staubexplosionsfähig“. Also:

Druckaufbau $\Delta p \geq 0,5$ bar über dem prufverfahrensbedingten Anfangsdruck: „staubexplosionsfähig“,

Druckaufbau $\Delta p \leq 0,5$ bar über dem prufverfahrensbedingten Anfangsdruck: „nicht staubexplosionsfähig“.

„Staubexplosionsfahigkeit“ kann auch in der „modifizierten Hartmann-Apparatur“ [1] festgestellt werden. Diese Prüfeinrichtung besteht aus einem senkrecht stehenden, unten geschlossenen Glasrohr von ca. 1,2 L Volumen (Abb. 4-15). Das obere Ende ist mit einem lose aufliegenden Klappdeckel versehen. Die Staubprobe wird auf dem Boden des Gefäßes angehäuft und mittels eines Luftstoes (50 cm^3 bei 8 bar) aufgewirbelt. Als Zündquelle werden ein elektrischer Induktionsdauerfunken oder eine Glühwendel verwendet. Unter Variation der Staubkonzentration über einen weiten Konzentrationsbereich werden mit den genannten Zündquellen Zundversuche durchgeführt. Wird eine Flammenausbreitung festgestellt, so ist der Stoff als „staubexplosionsfähig“ einzustufen. Wird dagegen keine Flammenausbreitung beobachtet, so gilt diese Substanz nur als „unter den Zündbedingungen der modifizierten Hartmann-Apparatur nicht entzündbar“. Der Grund für diese einschränkende Aussage liegt in der nicht für alle Stäube hinreichenden Energie des elektrischen Funkens.

Beispiele für Druck-Zeit-Kurven typischer Staubexplosionsvorgange (bei Staubkonzentrationen von 600 g/m^3 in einer 20-L-Kugel) zeigt Abb. 4-16. Die Kurven stammen von Aluminium-, Polyethylen-, Kohlen- und Eisenstauben [23].

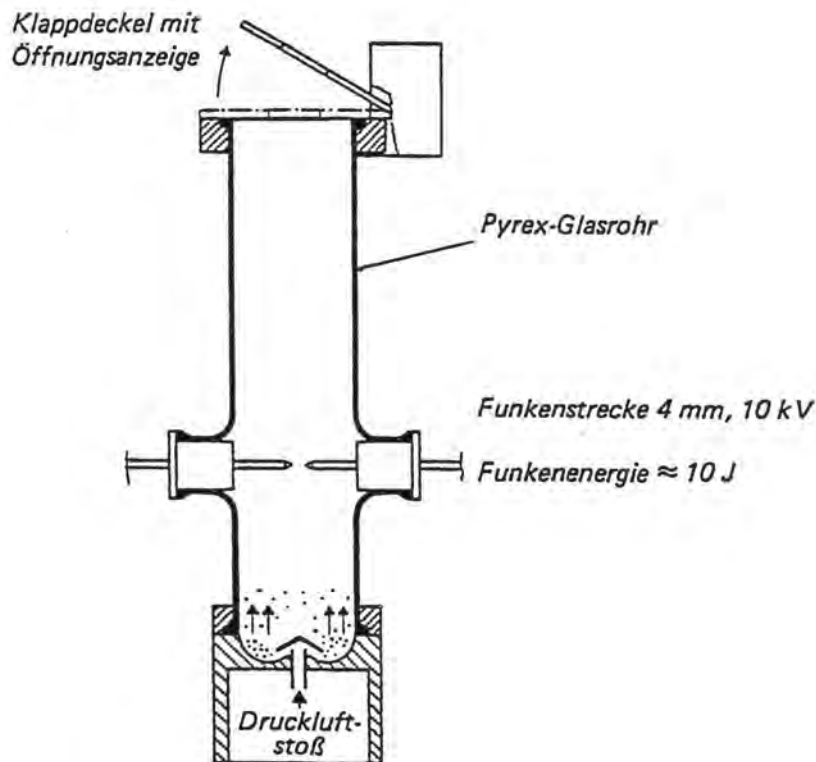


Abb. 4-15. Modifiziertes Hartmann-Rohr zur Prüfung der Explosionsfähigkeit von Stäuben (nach [1]).

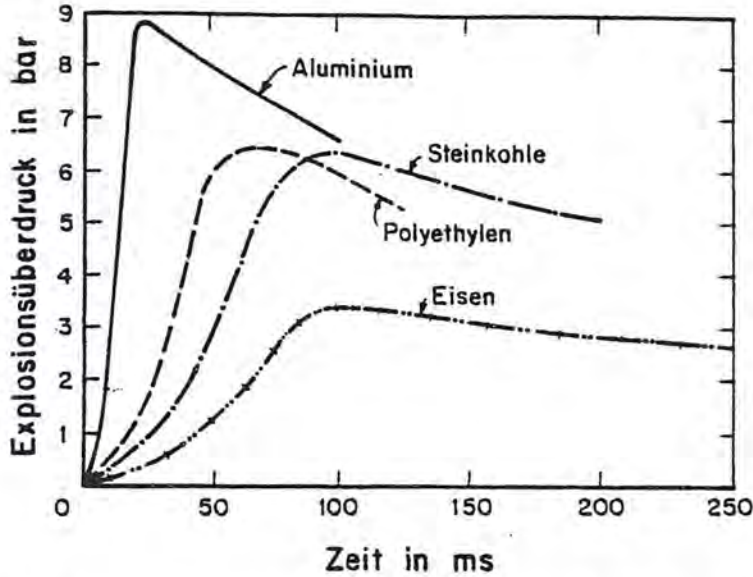


Abb. 4-16. Druck-Zeit-Kurven von Aluminium-, Polyethylen-, Steinkohlen- und Eisenstaubexplosionen (Staubkonzentration = 600 g/m^3) (nach [23]).

Der Aluminiumstaub hat den höchsten Explosionsdruck und die höchste Druckanstiegsgeschwindigkeit dieser Stäube. Der Grund liegt teils in der Tatsache, daß Aluminium bei sehr viel höheren Temperaturen verbrennt als die anderen Stäube, teils darin, daß die Korngröße des Aluminiums kleiner war als die der anderen Stäube. Polyethylen und Kohle haben fast gleich große Explosionsdrücke, aber Polyethylen hat die höhere Druckanstiegsgeschwindigkeit – vielleicht durch die schnellere Abgabe flüchtiger Bestandteile (Monomere) bedingt. Polyethylen läßt sich zu 100% verdampfen, während Kohle nur 36% flüchtige Bestandteile enthält. Der Eisenstaub hat den geringsten Explosionsdruck und die geringste Druckanstiegsgeschwindigkeit. Er ist von den untersuchten vier Stäuben der am wenigsten reaktive.

4.3.1.1 Einfluß unterschiedlicher Startbedingungen

Teilchengröße

Die bisher gezeigten Diagramme von Druck und Druckanstiegsgeschwindigkeit bei Staubexplosionen wurden an Stäuben gemessen, die ein breites Kornspektrum hatten. Um den Einfluß der Korngrößen auf p_{\max} und $(dp/dt)_{\max}$ zu erfassen, wurden auch Stäube mit engem Kornspektrum untersucht (Siebfractionen zwischen einer oberen und einer unteren Korngrößengrenze, die dicht beieinander lagen). In Abb. 4-17 sind Abtragungen von K_{St} (oben) und p_{\max} (unten) als Funktion des Medianwerts der Korngrößenverteilung für eng ausgesiebte Fraktionen von Steinkohlenstaub (durchgezogene Kurve und ●) sowie für ein breites Kornspektrum (x) dargestellt [33].

Mit Medianwert bezeichnet man bei Korngrößenverteilungen diejenige Korngröße, unterhalb und oberhalb welcher jeweils 50% des Massenanteils des Staubs vorliegen.

Man sieht, daß sowohl die höchsten Drücke als auch die größten K_{St} -Werte an den feinkörnigsten Staubfraktionen gemessen werden. Mit steigender Korngröße fallen die

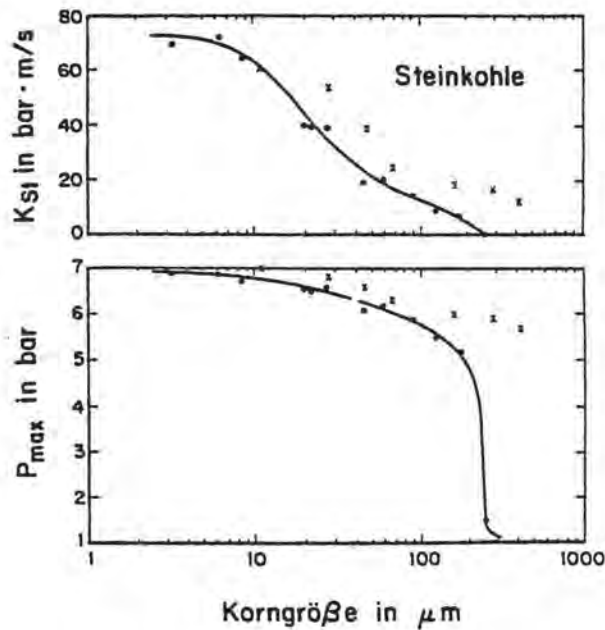


Abb. 4-17. Einfluß der Korngröße auf p_{\max} und K_{St} bei Steinkohle (nach [33]): ● enge Korngrößenverteilung, × breite Korngrößenverteilung.

p_{\max} -Werte zunächst langsam, die K_{St} -Werte dagegen schneller ab. Bei Medianwerten größer als etwa 250 μm lassen sich Fraktionen dieses Kohlenstaubs nicht mehr entzünden, wenn sie in einer engen Korngrößenverteilung vorliegen. Diese Ergebnisse sind typisch für kohlenstoffhaltige Brennstoffstäube.

Eine breite Kornverteilung ist eine Summe vieler unterschiedlich großer Körner. Testresultate solcher Stäube zeigen, daß es die feineren Anteile sind, die am meisten zur Gefährlichkeit solcher Gemenge beitragen. Die Drücke und Druckanstiegsgeschwindigkeiten der breiten Kornverteilungen liegen bei gleichem Medianwert etwas höher als die der engen Verteilungen – selbst im Bereich von 20 bis 100 μm. Dies beruht auf dem größeren Anteil von Feinstaub in den breiteren Kornverteilungen. Die wesentliche Aussage von Abb. 4-17 ist, daß die Korngröße einen starken Einfluß auf die Zahlenwerte der Explosionskenngrößen hat. Ähnliche Korngrößeneinflüsse wurden auch an Metallstäuben (Aluminium- und Eisenstaub) beobachtet [23].

Starttemperatur des Staub-Luft-Gemischs

Erwärmt man Staub und Verbrennungsluft im Explosionsgefäß definiert vor dem Explosionsvorgang und sorgt man dafür, daß die Explosion weiterhin bei 1 bar Anfangsdruck abläuft, dann findet man, daß p_{\max} der absoluten Anfangstemperatur des Gemischs umgekehrt proportional ist. Beim US-Bureau of Mines wurde auf diese Weise ein Steinkohlenstaub untersucht. Bei 60°C (333 K) fand man einen p_{\max} -Wert von 6,6 bar (absolut). Bei einer Temperatur von 180°C (453 K) betrug dieser Wert nur 4,8 bar (absolut). Diese umgekehrte Proportionalität von Explosionsdruck und Starttemperatur der Staubwolke (bei gleichbleibendem atmosphärischem Anfangsdruck!) ist auch zu erwarten, weil entsprechend dem idealen Gasgesetz

$$p \cdot V = n \cdot R \cdot T$$

(4-2)

bei konstantem $p \cdot V$ -Produkt ein Zuwachs der Temperatur (T) eine Verringerung der Anzahl der O_2 -Mole (n) im Gemisch zur Folge hat, die den Reaktionsumsatz (und damit p_{\max}) herabsetzt. Die experimentellen Daten zeigen innerhalb der Meßgenauigkeit eine hervorragende Übereinstimmung mit dem idealen Gasgesetz:

$$\frac{p_{\max,1}}{p_{\max,2}} = \frac{6,6}{4,8} = 1,375 \quad ; \quad \frac{T_2}{T_1} = \frac{453}{333} = 1,360$$

Der Befund des umgekehrt proportionalen Verhaltens von Explosionsdruck und Gemischtemperatur wurde auch von Wiemann [24] mitgeteilt (Abb. 4-18).

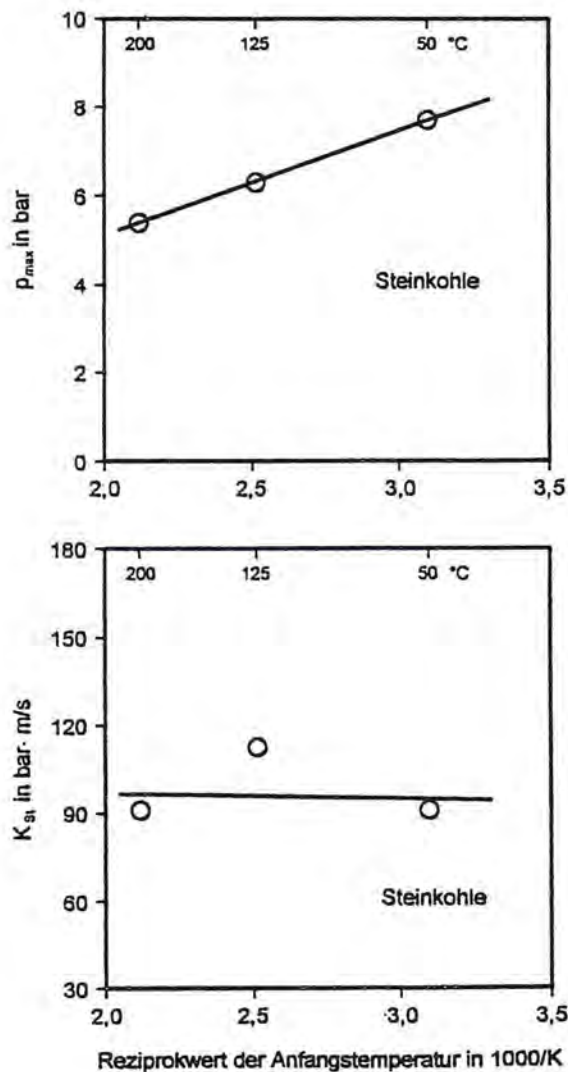


Abb. 4-18. Einfluß der Starttemperatur auf p_{\max} und K_{st} bei Steinkohle (nach [24]).

Im oberen Teil der Abb. 4-18 findet man eine linear ansteigende Abhängigkeit des p_{\max} -Werts von $1/T$. Diese Messungen wurden im 1-m³-Behälter an einer Steinkohle durchgeführt, die der des US-Bureau of Mines sehr ähnlich war. Der untere Teil der

Abbildung zeigt, daß bei Steinkohle der K_{St} -Wert möglicherweise nicht (oder nur wenig) von der Anfangstemperatur des Staub-Luft-Gemischs beeinflusst wird. Dieser Befund ist sicherlich nicht ohne weiteres auf andere Stäube übertragbar, da die Druckanstiegsgeschwindigkeit (im Gegensatz zum thermodynamisch begründeten p_{max} -Wert) im wesentlichen reaktionskinetisch (d h. auch vom Material) bestimmt wird.

Dem reaktionskinetisch verlangsamernd wirkenden Effekt der Sauerstoffverminderung wirken nämlich andere Effekte entgegen: So steigt die Reaktionsgeschwindigkeit prinzipiell mit der Temperatur an, und auch der O_2 -Transport an die Feststoffoberflächen oder zu den Pyrolysegasen wird durch Erhöhung der Diffusionsgeschwindigkeit des Sauerstoffs mit der Temperatur beschleunigt.

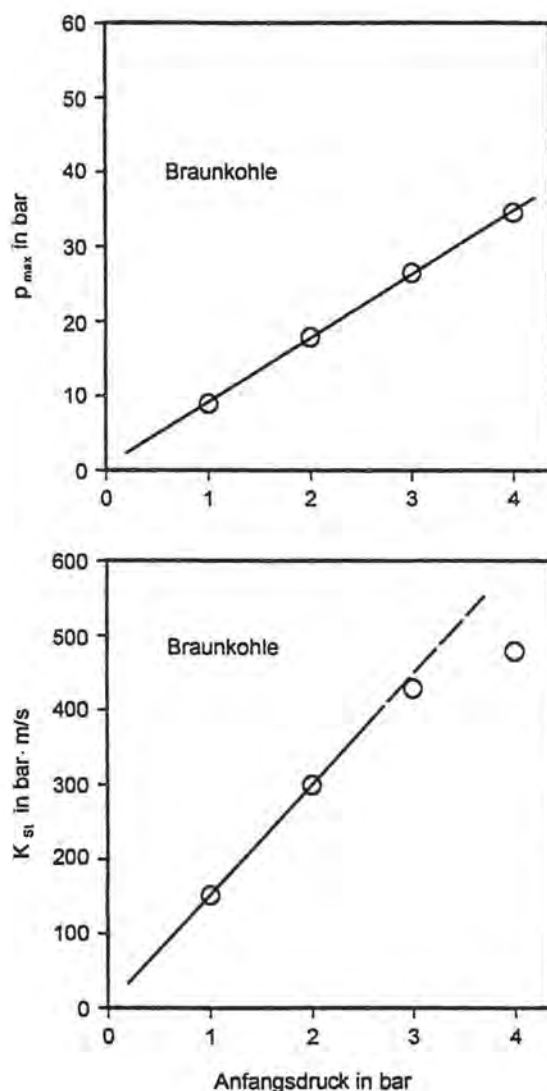


Abb. 4-19. Einfluß des Anfangsdrucks auf p_{max} und K_{St} bei Braunkohle (nach [24]).

Anfangsdruck des Staub-Luft-Gemischs

Wie Abb. 4-19 zu entnehmen ist, erhöhen sich p_{max} und K_{St} – dem idealen Gasgesetz folgend – direkt proportional zum Vordruck des Gemischs. Allerdings scheint bei höhe-

ren Vordrücken nach Abb. 4-19 (unten) beim K_{St} -Wert der hier untersuchten Braunkohle eine Abweichung vom linearen Verlauf zu niedrigeren Werten hin zu bestehen. Diese Abweichung könnte methodisch bedingt sein, da bei größerem O_2 -Angebot auch mehr Staub zur Messung des K_{St} -Werts eingeblasen werden muß. Das Einblasen größerer Staubmengen erniedrigt aber auch den Turbulenzzustand des Staub-Luft-Gemischs – und damit den K_{St} -Wert selbst.

4.3.1.2 Probleme mit der Übertragbarkeit auf praktische, betriebliche Verhältnisse

Wie bereits in Abschn. 4.3.1 erwähnt, haben die Versuchsbedingungen auf den p_{max} -Wert einen relativ geringen Einfluß. Die Größe von $(dp/dt)_{max}$ hängt dagegen stark vom Untersuchungsverfahren ab. Bei der Optimierung der Kenngrößenbestimmungsverfahren im 1-m³-Behälter war eine wesentliche Einflußgröße der Zeitraum zwischen dem Beginn der Staubeinblasung und der Auslösung der Explosion durch den chemischen Zünder, die sogenannte Zündverzögerungszeit t_v .

Zum einen mußte darauf geachtet werden, daß die verwendete Staubmenge während dieses Zeitraums quantitativ in das Explosionsgefäß eingeblasen wird, zum anderen vermindert sich die durch den Einblasstrahl erzeugte Turbulenz im Behälter mit zunehmender Zeit, bis im Extremfall der Staub ruhend am Gefäßboden liegt. In Abb. 4-20 ist auf-

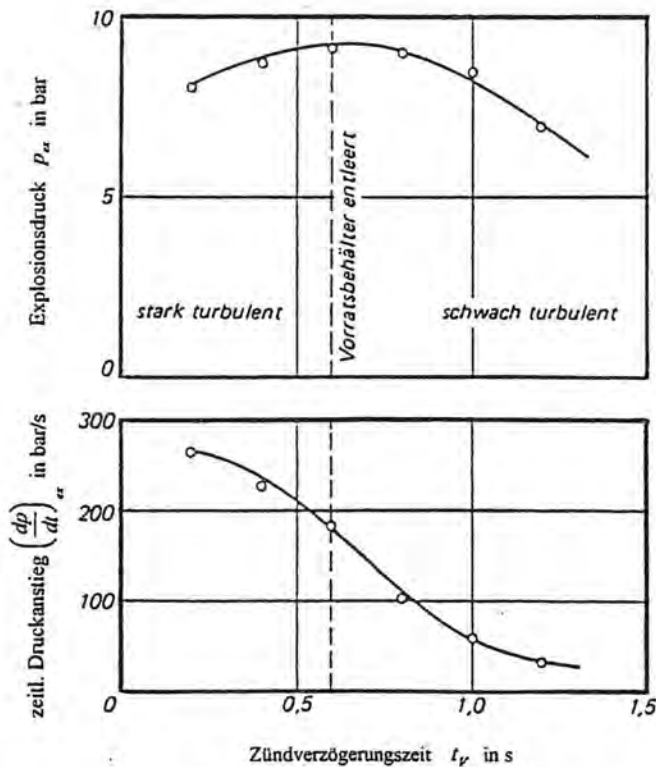


Abb. 4-20. Zum Einfluß von Turbulenz und Staubkonzentration auf p_{max} und $(dp/dt)_{max}$ im geschlossenen 1-m³-Behälter (nach [19]).

gezeigt, wie sich p_{ex} und $(dp/dt)_{\text{ex}}$ ändern, wenn unterschiedliche Zundverzogerungszeiten während der Versuche gewählt werden.

Der p_{ex} -Wert durchläuft bei etwa 0,6 Sekunden Zündverzögerungszeit ein schwach ausgeprägtes Maximum. Der Anstieg vor $t_{\text{v}} = 0,6$ s beruht darauf, daß bei kleinem t_{v} noch merkliche Staubmengen im Staubvorratsbehalter verbleiben. Nach 0,6 s befindet sich die gesamte Staubmenge im Explosionsraum. Der folgende schwache Abfall der Kurve wird dadurch erklärbar, daß mit zunehmender Zeit auch wachsende Mengen an Staub ausgesedimentiert sind und am Explosionsvorgang in der Staubwolke nicht mehr (optimal) teilnehmen.

Bei $(dp/dt)_{\text{ex}}$ liegen die Verhältnisse anders. Hier spielt die Turbulenz der Staubwolke die entscheidende Rolle. Zu Beginn des Einblasvorgangs ist die Staubwolke am stärksten durchwirbelt. Mit zunehmender Zeit beruhigt sie sich; die Turbulenz ebbt ab. Das bedeutet, daß (dp/dt) schon bei Zündung nach sehr kleinen Zeiten ($t_{\text{v}} = 0,2$ s ; Staub bei weitem noch nicht vollständig eingebblasen!) die höchsten Werte erreicht und mit zunehmender Zündverzögerungszeit kontinuierlich abnimmt. Bei $t_{\text{v}} = 0,6$ s ist der Staub vollständig im Explosionsbehalter. Die Verdreifachung der Zündverzögerungszeit gegenüber dem 0,2-s-Wert führt trotzdem zu einem Absinken von (dp/dt) auf etwa 2/3, obwohl nun mehr Staub verbrennen kann. Mit zunehmender Beruhigungszeit nähert sich (dp/dt) asymptotisch dem Wert Null.

Bei Explosionsereignissen in der betrieblichen Praxis ist weder der momentane Turbulenzzustand noch der Zeitpunkt der Zündung bekannt!

Die Festlegung von $t_{\text{v}} = 0,6$ s auch für die Bestimmung des (dp/dt) -Werts ist willkürlich und hat ihren Sinn nur darin, p_{max} und K_{St} aus dem gleichen Versuch zu erhalten und K_{St} -Werte unterschiedlicher Stäube bei einigermaßen vergleichbaren Turbulenzzustanden zu messen. Da Staubpartikel unterschiedlicher Dichte (z. B. Eisen im Vergleich zu Polyethylen) aber unterschiedlich stark die Ausbildung der Turbulenzen beeinflussen, gelingt auch dies nur sehr grob. K_{St} - bzw. $(dp/dt)_{\text{max}}$ -Werte, die nach dem eingeführten Untersuchungsverfahren gemessen werden, sind nicht dazu geeignet, Aussagen über die Explosionsheftigkeit unter praktisch möglichen Betriebsbedingungen zu machen. Sie haben ihre Berechtigung am ehesten noch zum Vergleich der relativen Gefährlichkeit verschiedener Stäube untereinander.

4.3.1.3 Laminare Verbrennungsgeschwindigkeit

Wegen der eben geschilderten Probleme mit dem K_{St} -Wert sucht man derzeit intensiv nach Alternativen zur Größe $(dp/dt)_{\text{max}}$ bzw. K_{St} , um die erwähnten Einflüsse auf den Explosionsablauf durch geeignetere Kenngrößen wiederzugeben. Unter strömungstechnischen Gesichtspunkten könnte die laminare Verbrennungsgeschwindigkeit S_{L} (gemessen in Brennerflammen oder einseitig offenen Rohrapparaturen) ein Parameter sein, aus dem sich Informationen über den zeitlichen Ablauf der Explosionen eines Staub-Luft-Gemischs gewinnen lassen. Bei dieser Größe ist der Einfluß des turbulenten Stoff-, Energie- und Impulsaustauschs auf die Verbrennung eliminiert, so daß der Einfluß der Stoffeigenschaften des Staubs auf die Verbrennung deutlicher in den Vordergrund tritt.

Für ruhende, vorgemischte Brenngas-Luft-Gemische folgt S_{L} aus den Bilanzgleichungen des Stoff- und Energietransports in der Reaktionszone. S_{L} ist in diesem Fall ein grundlegender Parameter, der nur von den Stoffeigenschaften und den Konzentrationen

des Gemischs abhängt [25].

Bei Staubwolken sind die Verhältnisse (wegen des komplexeren heterogenen Verbrennungsvorganges) nicht so einfach. Selbst bei laminarer Strömung der Verbrennungsluft hängt die Reaktionsrate außer von der Staubkonzentration und den Stoffeigenschaften auch von der Strömungsgeschwindigkeit der Luft und der bewegten Staubpartikeln ab.

Experimentell kann man die Flammenausbreitung in laminar strömenden Staub-Luft-Gemischen (und auch in turbulenter Strömung) in einer in Abb. 4-21 skizzierten Versuchsanordnung messen.

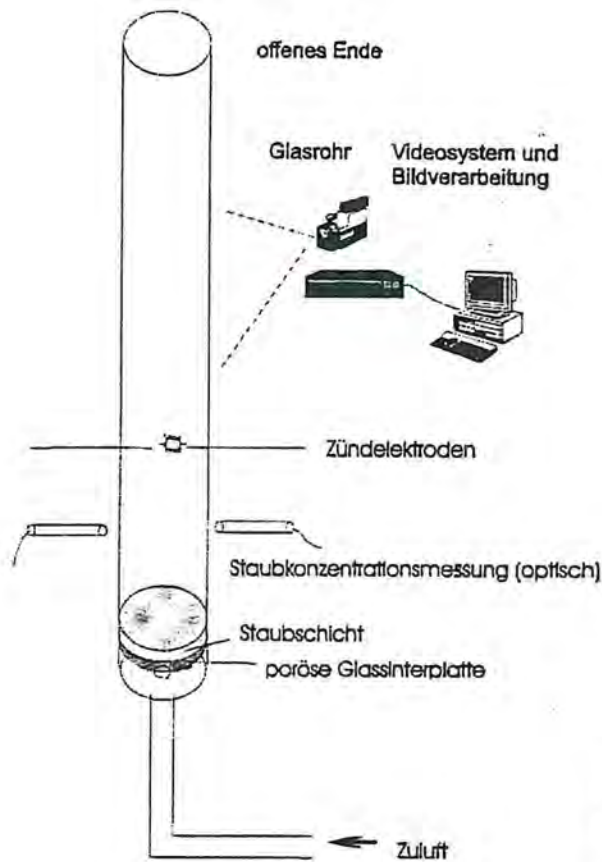


Abb. 4-21. Schema einer Rohrapparatur zur Messung der Flammenausbreitung in laminar strömenden Staubwolken (nach [26]).

Ein senkrechttes Glasrohr von etwa 2 m Länge enthält am unteren Ende eine poröse Glassinterplatte, auf der eine gewünschte Menge Staub als Schicht liegt. Die poröse Platte wird von unten von einem vorgewählten Luftstrom angeströmt. Dadurch wird eine mit gleichmäßigem, laminarem Strömungsprofil langsam aufsteigende Staubwolke erzeugt. Die Partikelverteilung ist sehr homogen und wird hinsichtlich ihrer Konzentration optisch (durch Lichtschwächung) vermessen. Die Konzentrationsmeßsonden befinden sich (oberhalb der Einlaufänge des voll ausgebildeten laminaren Profils) außerhalb des Glasrohrs. Einige Zentimeter höher befindet sich im Rohr die Hochspannungsfunken-Zündquelle. Die Staubkonzentration wird zum Zeitpunkt der Zündung gemessen. Staub-

verteilung und Flammenausbreitung werden mit einer Videokamera aufgezeichnet. Die Flammengeschwindigkeit S_{fl} wird aus den Videoaufnahmen mit einem PC-geführten Bildverarbeitungssystem ausgerechnet.

Die laminare Verbrennungsgeschwindigkeit (S_L) berechnet man nach einer Methode von Andrews und Bradley [25] aus der Flammengeschwindigkeit (S_{fl}), der Strömungsgeschwindigkeit (u) der Luft, der Querschnittsfläche (A') des Rohrs und der Oberfläche der Flammenfront (A_{fl}):

$$S_L = \frac{A'}{A_{fl}} \cdot (S_{fl} - u) \quad (4-3)$$

In Abb. 4-22 ist die Auswertung erläutert. Die obige Gleichung gilt für alle Zustände, in denen $S_{fl} > S_L$ und $S_{fl} > u$ ist. Dies ist dann der Fall, wenn sich heiße Verbrennungsgase gebildet haben, die nach oben steigen.

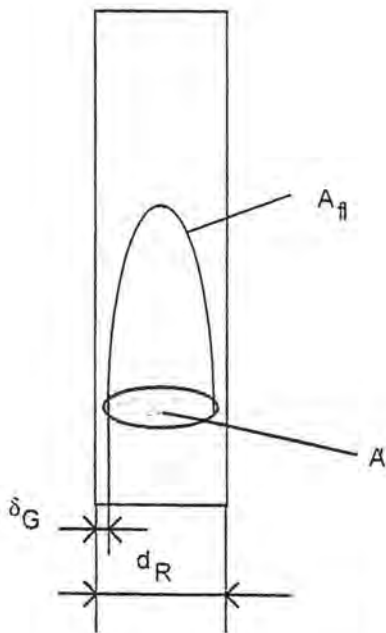


Abb. 4-22. Zur Berechnung der laminaren Flammengeschwindigkeit in Gl. 4-3 (nach [25]). d_R = Rohrdurchmesser; δ_G = Grenzschichtdicke.

In Abb. 4-23 wird die laminare Flammenausbreitung in einem oben offenen Rohr von 100 mm Durchmesser durch Videobilder zu verschiedenen Zeitpunkten nach der Zündung gezeigt.

Daß das in Abb. 4-21 gezeigte Rohr oben offen ist, hat den Vorteil, daß sich die laminare Verbrennungsgeschwindigkeit im konstanten Aufstrom in Abhängigkeit von der Geschwindigkeit der Strömung untersuchen läßt [26]. Bei den meisten Rohrapparaturen zur Untersuchung der laminaren Verbrennungsgeschwindigkeit ist das untere Ende offen [27, 28].

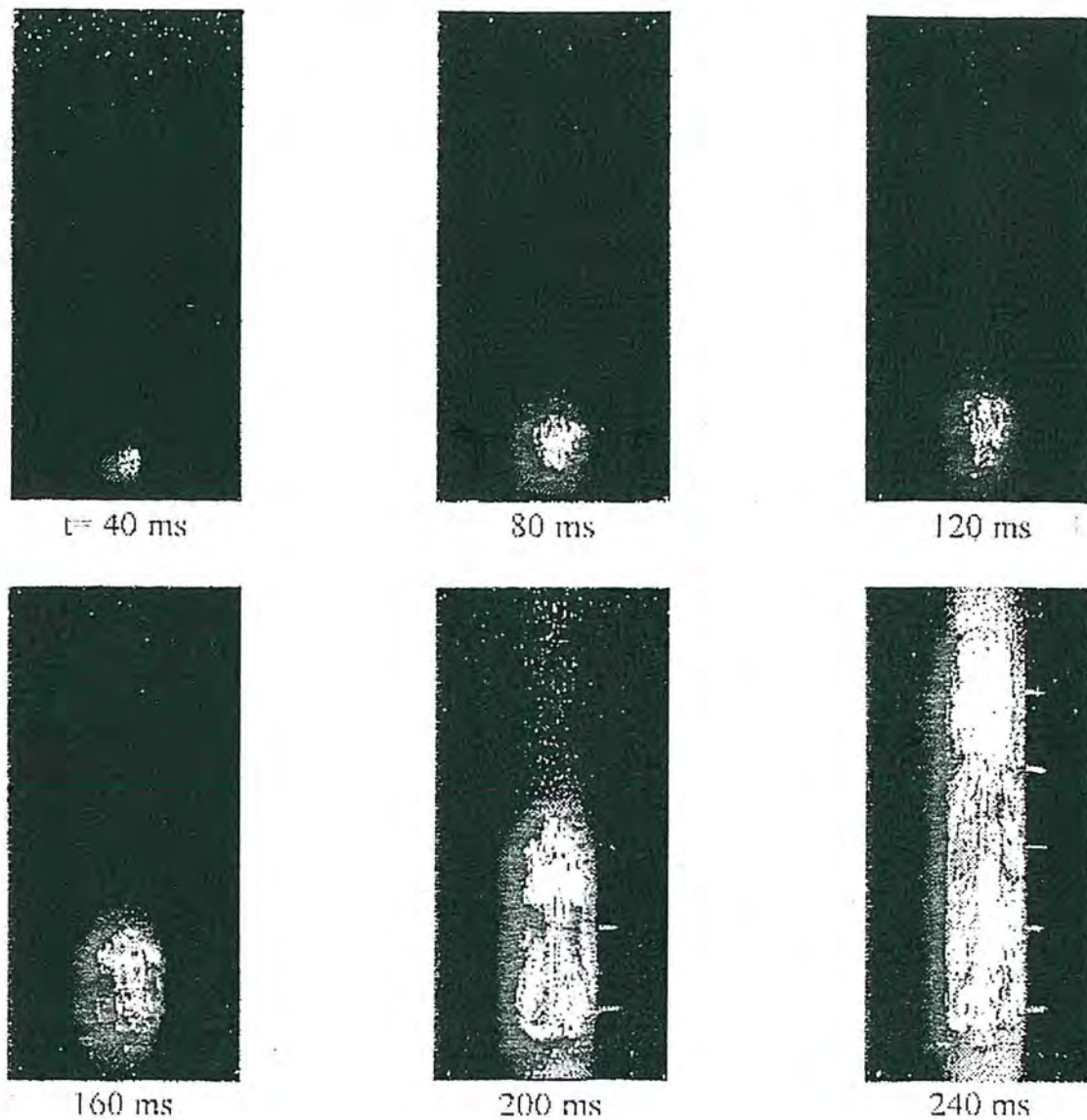


Abb. 4-23. Laminare Flammenausbreitung durch ein Lycopodiumstaub-Luft-Gemisch in einem Rohr von 100 mm \varnothing (nach Krause – persönliche Mitteilung).

Tabelle 4-3. Maximale laminare Verbrennungsgeschwindigkeiten (S_L) von drei Stäuben (nach Krause – persönliche Mitteilung).

Staubart	Staubkonzentration g/m	Strömungsgeschwindigkeit m/s	S_L m/s	K_{St} bar · m/s
Rohrdurchmesser = 60 mm				
Lycopodium	200	0,39	0,28	185
Maisstärke	100	0,34	0,26	141
Weizenmehl	120	0,34	0,23	42
Rohrdurchmesser = 100 mm				
Lycopodium	205	0,19	0,50	185
Maisstärke	375	0,30	0,40	141
Weizenmehl	260	0,28	0,30	42

In Tabelle 4-3 sind die maximalen laminaren Verbrennungsgeschwindigkeiten (S_L) dreier Stäube aufgelistet, die nach Optimierung der Staubkonzentration und der Strömungsgeschwindigkeit der Luft gemessen wurden. Zum Vergleich wurden konventionell gemessene K_{St} -Werte in die letzte Spalte genommen.

4.3.2 Untere Explosionsgrenze

Die untere Explosionsgrenze (UEG) eines Staub-Luft-Gemischs ist diejenige Konzentration an Staub in der Wolke, unterhalb der – trotz Aktivierung einer genügend starken Zündquelle – eine selbständige Flammenfortpflanzung im Gemisch nicht mehr möglich ist.

Sie wird nach der VDI-Richtlinie 2263 experimentell durch Explosionsversuche in der 20-L-Kugel oder im 1-m³-Behälter im unteren Konzentrationsbereich ermittelt. Die Staubkonzentration wird dabei allerdings nicht gemessen, sondern es wird dabei – wie üblich – unterstellt, daß die eingewogene Staubmenge sich durch den Einblasvorgang im Explosionsgefäß gleichmäßig verteilt. Das ist aber nach allem bisher Gesagten unrealistisch (s. dazu die Bemerkungen in der Einleitung).

Als Beispiel zeigt Abb. 4-24 dazu Explosionsdruck-Konzentrations-Kurven, die in der 20-L-Kugel des ehemaligen US Bureau of Mines an Kohlenstaub und Polyethylen gemessen wurden [33]. Diese Kurven weichen stark von der entsprechenden Kurve eines Brenngases – nämlich Methan – ab, die zum Vergleich mit eingezeichnet ist. Die Kurven

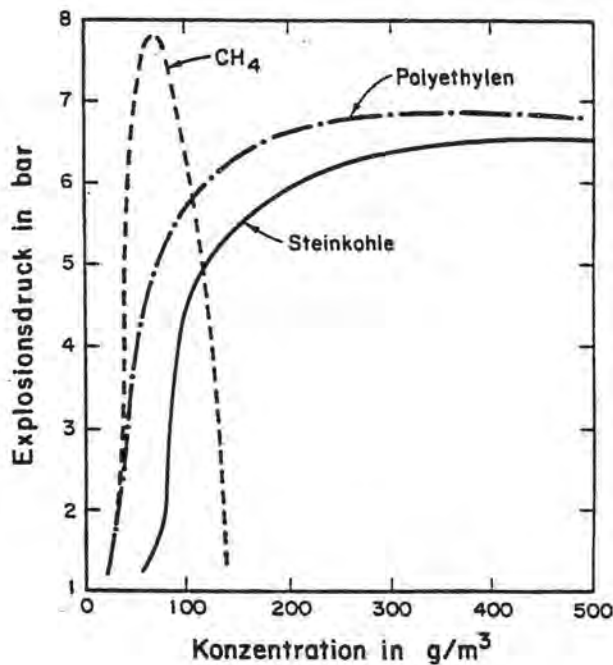


Abb. 4-24. Einfluß der Brennstoffkonzentration auf die Explosionsdruckentwicklung bei Stäuben und einem Gas (nach [33]).

der beiden Stäube sind von ähnlicher Gestalt, nur daß das Polyethylen eine niedrigere untere Explosionsgrenze hat und einen etwas höheren maximalen Explosionsdruck. Das liegt daran, daß Polyethylen zu 100% verdampft, während Kohle nur zu 37% flüchtig ist

und, daß Polyethylen ein größeres H/C-Verhältnis hat als Kohle. Polyethylen hat erkennbar die gleiche *UEG* wie Methan. Der Grund ist, daß das vollständig verdampfbare Polyethylen bei niedrigen Konzentrationen ähnlich reagiert wie das Brenngas Methan [29].

Beim Methan erkennt man eine deutliche obere Grenzkonzentration, oberhalb der die Methan-Luft-Gemische nicht mehr explosionsfähig sind. Diese bei Brenngas-Luft-Gemischen üblicherweise beobachtbare, scharfe obere Explosionsgrenze tritt bei Staub-Luft-Gemischen nicht auf. Eine Erklärung dieses Effekts könnte – wenigstens für viele Stäube – darin gesehen werden, daß die feste Phase zunächst verdampfen muß, ehe sie in Mischung mit Luft verbrennen kann. Sobald genügend brennbare, flüchtige Bestandteile oberhalb der *UEG* der Dämpfe entstanden sind, pflanzt sich die Flamme durch das Gemisch so schnell fort, daß – unabhängig vom vorhandenen Staubüberschuß – weitere flüchtige Bestandteile nicht mehr ausreichend schnell nachgeliefert werden können. Unter anderem aus diesem Grunde gibt es für Stäube – im Gegensatz zu Brenngasen wie Methan – keine "sinnvolle" obere Explosionsgrenze (*OEG*).

Der *UEG* kommt bei Staubwolken, wegen der zeitlich und räumlich stark schwankenden Staubkonzentrationen (Sedimentation, erneute Aufwirbelung) im allgemeinen nicht die große sicherheitstechnische Bedeutung zu, die sie bei Gasen hat.

Die einzige Ausnahme bilden technische Verfahren, bei denen ein definiertes Staub-Luft-Gemisch kontinuierlich aufrechterhalten wird. Das ist z. B. bei dem in letzter Zeit stark in den Vordergrund getretenen elektrostatischen Pulverbeschichtungsverfahren der Fall. Hier hat die Kenntnis der *UEG* durchaus Bedeutung, zumal als weitere Sicherheitsfunktion bei diesen Verfahren eine Begrenzung des elektrischen Energieeintrags der Sprüheinrichtungen erfolgt. So schreibt die zuständige Norm DIN EN 50177 für das elektrostatische Pulverbeschichten vor, daß die Staubkonzentration im Inneren des Sprühstands oder der Sprühkabine (mit Ausnahme des engeren Bereichs des Sprühstrahlaustritts) höchstens die Hälfte der *UEG* betragen darf. Ist die *UEG* nicht bekannt (oder nachgewiesen), dann darf nach dieser Norm die Konzentration des brennbaren Staubs 10 g/m^3 nicht überschreiten, weil die *UEG* von Stäuben in der überwiegenden Mehrzahl der Fälle größer als 20 g/m^3 ist.

Bei Gas- und Staubexplosionen steht die experimentell gemessene *UEG* in Beziehung zu einer minimalen thermodynamisch berechenbaren adiabatischen Verbrennungstemperatur von 1000°C bis 1200°C . Das ist die „Flammengrenztemperatur“, die mindestens erforderlich ist, um eine selbständige Flammenausbreitung zu ermöglichen. Ist die Staubkonzentration in der Wolke (in Verbindung mit dem Brennwert des fraglichen Staubs) so gering, daß diese Temperatur nach der lokalen Zündung des Staubs nicht erreicht wird, dann ist aus thermodynamischen Gründen die *UEG* unterschritten, die Flamme kann sich nicht selbständig fortpflanzen. Die grundlegenden Überlegungen dazu stammen von Zehr [18], bzw. ein vereinfachtes Rechenverfahren für die *UEG* aus dem Brennwert stammt von Schönwald [30].

Die Bestimmung der unteren Explosionsgrenze nach dieser Rechenmethode ist für Pulverlacke als DIN 55 990, Teil 6 genormt. Die Berechnung erfolgt nach der Zahlenwertgleichung:

$$UEG = -2,52 + \frac{1,235 \cdot 10^6}{H_o} ; \quad UEG \text{ in } \text{g} \cdot \text{m}^{-3} \quad (4-4)$$

Dabei ist H_0 der Brennwert (früher: oberer Heizwert!) des Staube in $J \cdot g^{-1}$. Der berechnete Wert gibt den thermodynamisch begründeten niedrigsten Konzentrationswert an, bei dem ein Staub-Luft-Gemisch explodieren kann. Experimentelle Werte können größer sein, weil kinetische Reaktionshemmungen bei der Rechnung nicht berücksichtigt werden. Experimentelle Werte können aber auch kleiner sein, wenn sich verfahrens- oder zufallsbedingt in der Umgebung der Zündquelle eine höhere Staubkonzentration einstellt als im restlichen Prüfvolumen. Die Berechnung der *UEG* liefert von Versuchsbedingungen unabhängige Daten.

Für die experimentelle Bestimmung der unteren Explosionsgrenze werden dieselben Apparaturen und Methoden eingesetzt, wie sie für die Ermittlung des p_{max} - und des $(dp/dt)_{max}$ -Werts in geschlossenen Apparaturen verwendet werden (s. Abschn. 4.3.1). Dabei wird in der 20-L-Kugel ein Zünder von lediglich 1 bis 2 kJ verwendet. Der sonst auch in der 20-L-Kugel verwendete 10-kJ-Zünder ist für diese Zwecke stark überdimensioniert.

Ausgehend von einem explosionsfähigen Staub-Luft-Gemisch wird die Staubkonzentration so lange verringert (z. B. durch fortlaufendes Halbieren der Konzentration), bis keine Explosion mehr festgestellt wird. Bei Nichtentzundung sind mindestens drei Versuche mit der gleichen Staubkonzentration durchzuführen, um zufallsbedingte Schwankungen der Staubkonzentration zu erfassen. Anhand der zeitlichen Druckentwicklung im Explosionsbehalter wird beurteilt, ob eine Staubexplosion stattgefunden hat ($\Delta p > 0,5$ bar über dem Explosionsdruck des Zünders im Blindversuch) oder nicht ($\Delta p < 0,5$ bar über Blindversuch).

Als *UEG* wird die Staubkonzentration in g/m^3 angegeben, mit der bei diesem Vorgehen das Staub-Luft-Gemisch nicht mehr entzündet werden konnte. Die Schwankungsbreite der experimentellen *UEG*-Bestimmungsmethoden in geschlossenen Explosionsapparaturen ist – wegen der Schwierigkeit durch Staubeinblasung in ein geschlossenes System reproduzierbar homogene Staubkonzentrationen zu erzeugen – recht groß und mit systematischen Fehlern behaftet.

Eine alternative experimentelle *UEG*-Bestimmungsmethode wurde von Krause et al. [31] für die bereits in Abschn. 4.3.1.3 beschriebene Rohrapparatur entwickelt. Bei diesem Verfahren werden im oben offenen vertikalen Glasrohr von 100 mm lichter Werte laminar aufwärts strömende, homogene Staub-Luft-Gemische erzeugt (s. Abb. 4-21), deren Staubkonzentrationen online gemessen werden (IR-Lichtschwächung)! Die Zündung erfolgt mittels eines 10-J-Hochspannungsfunkens (beeinflusst nicht die Flammenausbreitung!) und kann direkt beobachtet werden. Ein sichereres Zundkriterium (als der in den geschlossenen Behältern verwendete Druckanstieg) ist in offenen Rohrapparaturen die ebenfalls direkt beobachtbare Flammenablosung von der Zündquelle. Den so bestimmten *UEG*-Werten liegen präzisere Aussagen über die tatsächlich an der Reaktion beteiligten Stoffmengen zugrunde als den in geschlossenen Explosionsbehaltern bestimmten unteren Explosionsgrenzen.

In Abb. 4-25 wird verdeutlicht, daß die *UEG* im Korngrößenbereich $< 100 \mu m$ nahezu konstant ist, aber mit steigender Teilchengröße dann sehr schnell große Werte annimmt [33]. Staubwolken aus Teilchen mit Durchmessern von $> 500 \mu m$ sind praktisch nicht mehr explosionsfähig.

In Abb. 4-26 wird die Abhängigkeit der *UEG* von der Anfangstemperatur der Staubwolke vor der Explosion (Starttemperatur) gezeigt. Die Versuche wurden in einer be-

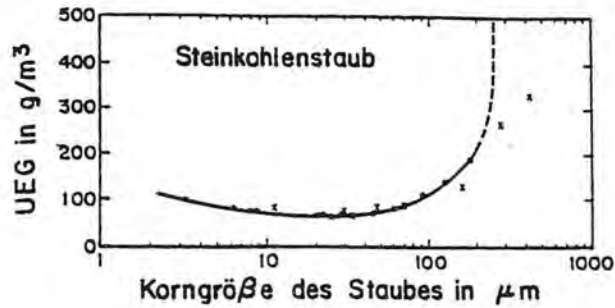


Abb. 4-25. Abhängigkeit der UEG von der Teilchengröße, nach [33]. • enge Korngrößenverteilung; × breite Korngrößenverteilung.

heizten 20-L-Kugel durchgeführt [33]. Die beiden ausgefüllten Kreise zeigen Meßwerte bei 60°C und bei 180°C. Sie passen sich gut an die als Extrapolation eingetragene durchgezogene Kurve an, die unter Benutzung der modifizierten Burgess-Wheeler-Gleichung [32] für Kohlenwasserstoffe (Brenngase) erstellt wurde.

$$UEG_{\vartheta} = UEG_{\vartheta_0} \left(\frac{273 + \vartheta_0}{273 + \vartheta} \right) \cdot [1 - 0,000721 (\vartheta - \vartheta_0)] \quad (4-5)$$

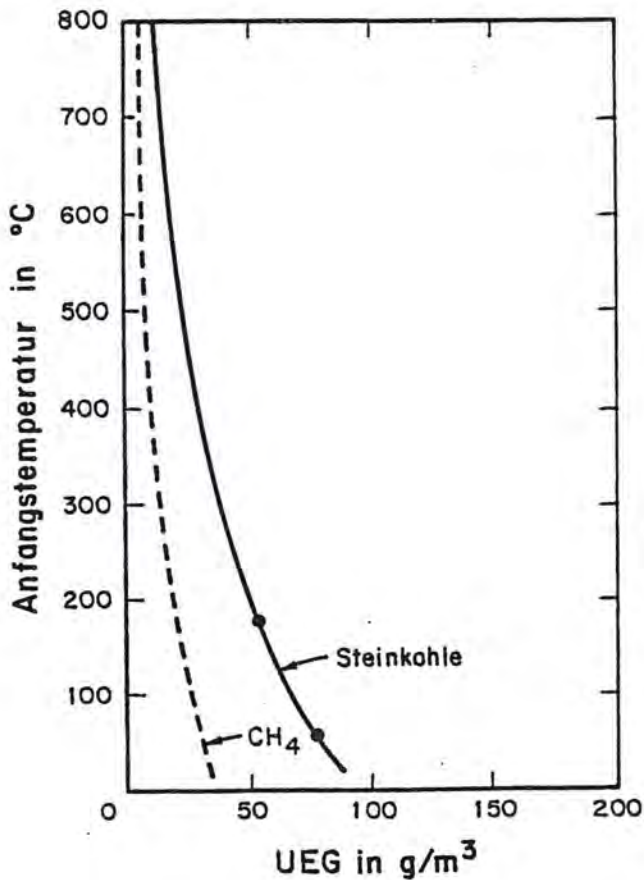


Abb. 4-26. Einfluß der Anfangstemperatur auf die UEG eines Staubs und eines Gases (nach [33]).

Dabei bedeuten UEG_{ϑ} die UEG bei der gesuchten Temperatur ϑ (in $^{\circ}\text{C}$) und UEG_{ϑ_0} die UEG bei einer Bezugstemperatur ϑ_0 (z. B. 20°C).

Rechts von der Kurve befindet man sich im Explosionsbereich. Im Konzentrationsbereich links von der Kurve ist der Staub nicht explosionsfähig. Die zum Vergleich gestrichelt mit eingezeichnete Kurve für Methan zeigt, daß der Einfluß der Temperatur auf die UEG von Stuben prinzipiell ähnlich ist wie bei Brenngasen.

In Abb. 4-27 ist der Einfluß des Anfangsdrucks im Explosionsraum auf die UEG [33] aufgezeigt. Die untere Explosionsgrenze steigt linear mit dem Anfangsdruck an. Die in dieser Abbildung als Massenanteile im Gemisch angegebene UEG von Methan verhält sich identisch wie die von Polyethylen in ihrer Abhängigkeit vom Anfangsdruck. Die Gerade für Kohle hat einen etwas steileren Anstieg.

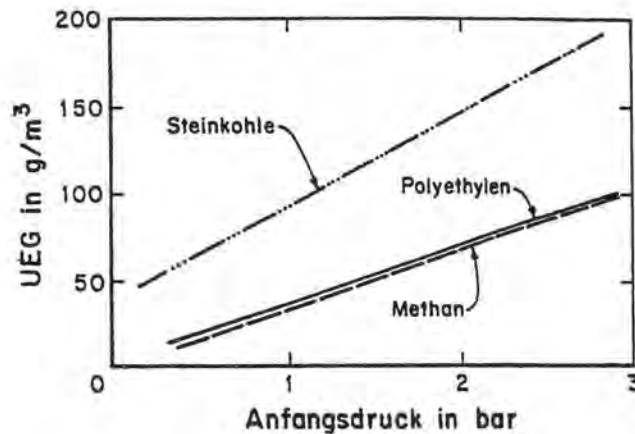


Abb. 4-27. Einfluß des Anfangsdrucks auf die UEG bei Steinkohle, Polyethylen und Methan (nach [33]).

4.3.3 Sauerstoffgrenzkonzentration

Von Staubexplosionen redet man für gewöhnlich, wenn in Luft aufgewirbelte Staubwolken schlagartig unter Energiefreisetzung verbrannt (oxidiert) werden. Das zur explosionsartigen Verbrennung erforderliche Oxidationsmittel ist also normalerweise der Luftsauerstoff, obwohl auch andere Gase (z. B. Chlor) oxidierend wirken können.

Sauerstoffkonzentrationen, die größer als der Sauerstoffanteil der Luft von 21% V/V sind, erhöhen sowohl die Verbrennungsgeschwindigkeit als auch die Zündfähigkeit. Sauerstoffkonzentrationen, die kleiner als 21% V/V sind, vermindern beide Eigenschaften. Daraus ergibt sich eine Möglichkeit Staubexplosionen zu verhindern, indem man den O_2 -Gehalt im gefährdeten Volumen durch Vermischung mit einem inerten Fremdgas soweit erniedrigt, daß keine selbständige Flammenausbreitung mehr eintritt. Die Sauerstoffkonzentration in einem Staub-Luft-Inertgas-Gemisch, bei der man diesen Effekt beobachtet, wird Sauerstoffgrenzkonzentration genannt (SGK).

Die SGK ist die – durch Laborexperimente ermittelte – Sauerstoffkonzentration, bei der im Staub-Luft-Inertgas-Gemisch der zündwilligsten Staubkonzentration gerade keine Explosion mehr möglich ist. Sie ist eine staub- und inertgasspezifische Kenngröße. (Ein Fremdgas ist „inert“, wenn es weder mit dem Sauerstoff noch mit dem brennbaren Staub

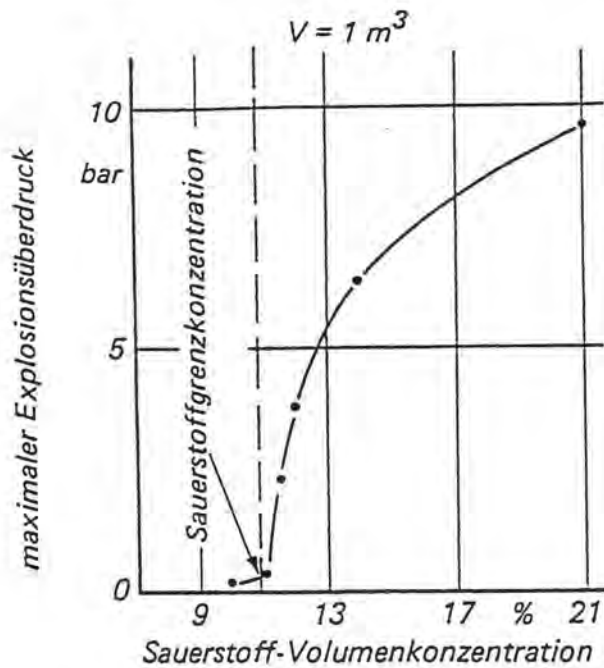


Abb. 4-29. Absenkung des p_{\max} -Werts mit fallender Sauerstoffkonzentration im Staub-Inertgas-Luft-Gemisch als Kriterium für die SGK (nach [1]).

Die SGK ist die Kenngröße, die zur Durchführung der Explosionsschutzmanahme „Inertisierung“ benötigt wird.

Das gebräuchlichste Inertgas ist der Stickstoff, der auch mit 78% Volumenanteil die Hauptkomponente der Luft ist. Andere Gase als N_2 können auch als Inertisierungsmittel verwendet werden (z. B. ist CO_2 bei kohlenstoffhaltigen Stäuben effektiver als N_2). Bei der Inertisierung von Metallstaub-Luft-Gemischen kann es sowohl mit CO_2 (Reduktion zum Kohlenstoff!) als auch mit N_2 (Nitridbildung!) Probleme geben. Meistens ist in diesen Fällen N_2 dem CO_2 vorzuziehen [34]. In jedem Fall kann man mit den teureren Edelgasen inertisieren (Ar ist das preiswerteste Gas dieser Gruppe). Die Sauerstoffgrenzkonzentrationen liegen bei Verwendung von Edelgasen jedoch deutlich niedriger als bei Verwendung von N_2 , was das Verfahren in solchen Fällen weiter verteuert.

In der Regel nimmt die SGK bei ein und demselben Staub in der angegebenen Reihenfolge der verwendeten Inertgase ab:

- Kohlendioxid,
- Stickstoff,
- Edelgase.

Das liegt am molekularen Aufbau dieser Gase: Kohlendioxid ($\text{O}=\text{C}=\text{O}$) ist dreiatomig, Stickstoff ($\text{N}\equiv\text{N}$) ist zweiatomig, während die Edelgase (z. B. Ar) nur einatomig sind. Mehratomige Moleküle können aufgrund der größeren Anzahl der Molekulschwingungsfreiheitsgrade aus einem System mehr Energie aufnehmen als einatomige. Sie sind bessere Energiesenken als einatomige Moleküle und wirken damit besser inertisierend.

Die Sauerstoffgrenzkonzentration ändert sich wenig mit der Anfangstemperatur des Staub-Luft-Gemischs. Eine in Abb. 4-30 dargestellte Zusammenstellung gemessener

Temperaturabhängigkeiten der SGK einiger Stäube stammt von Wiemann [24]. Als „Faustregel“ kann man für den Fall, daß keine experimentellen Werte bekannt sind annehmen, daß sich die SGK pro 100 K Temperaturänderung um ca. 1% O₂ (V/V) ändert.

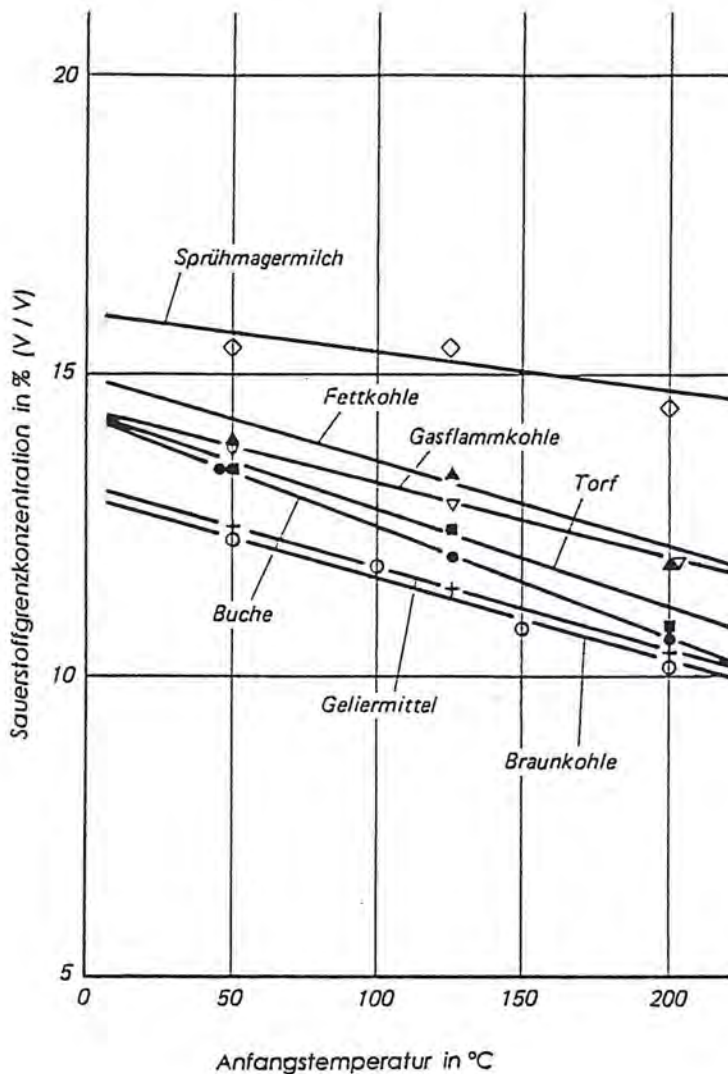


Abb. 4-30. Einfluß der Anfangstemperatur der Staub-Luft-Gemische auf die SGK bei verschiedenen Stäuben (nach [24]).

4.3.4 Die Mindestzündtemperatur einer Staubwolke in einem heißen Ofen (Zündtemperatur)

Durch die Mindestzündtemperatur einer Staubwolke, im folgenden kurz „Zündtemperatur“ genannt (weil diese Bezeichnung in Deutschland gebräuchlich ist), wird das Zündverhalten aufgewirbelten Staubs an heißen Oberflächen in einem geschlossenen Temperaturfeld beschrieben. Nach den Explosionsschutz-Richtlinien (EX-RL) ist sie definiert als „... die *niedrigste* Temperatur einer heißen Fläche, an der das entzündlichste Gemisch des Staubes mit Luft zur Entzündung gebracht wird“.

Zur Veranschaulichung ist in Abb. 4-31 eine Testserie wiedergegeben, in der bei unterschiedlichen Staubkonzentrationen versucht wurde, durch Änderung der Temperatur einer Bezugsfläche den Übergangsbereich zwischen thermischen Zündungen und Nichtzundungen zu ermitteln. Die Versuche erfolgten mit einem Steinkohlenstaub in dem – speziell für solche Untersuchungen gebauten – „6,8-L-Ofen“ des US-Bureau of Mines [37].

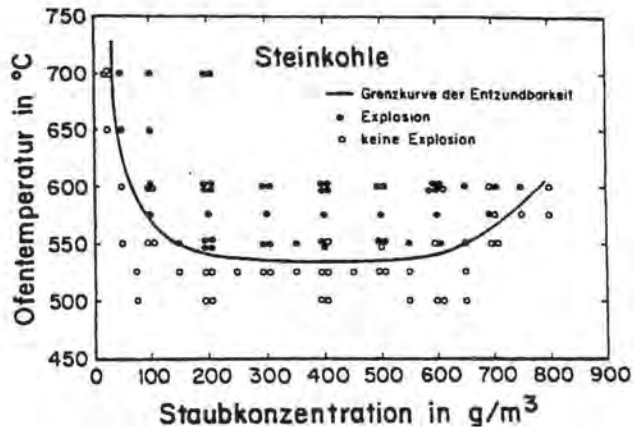


Abb. 4-31. Thermische Zündung von Steinkohlenstaubwolken in Abhängigkeit von der Ofentemperatur und von der Staubkonzentration (nach [33]).

Leere Kreise in Abb. 4-31 kennzeichnen Versuche, bei denen es zu keiner thermischen Zündung kam, während erfolgreiche Versuche (Zündungen durch den Einfluß der heißen inneren Oberfläche des Ofens) durch schwarz ausgefüllte Kreise markiert wurden. Die eingezeichnete ausgezogene Kurve ist die Grenze zwischen dem Bereich der thermischen Zündungen (Temperaturbereich oberhalb der Kurve) und dem Bereich, in dem keine Zündungen möglich waren (Temperaturbereich unterhalb der Kurve). Es fällt auf, daß in einem mittleren Staubkonzentrationsbereich die Zündfähigkeit wenig bis nicht von der Staubkonzentration abhängt. In den Bereichen kleinerer und größerer Konzentration ($c < 200 \text{ g/m}^3$ bzw. $c > 650 \text{ g/m}^3$) steigt die Zündtemperatur dagegen mit fallender bzw. steigender Staubkonzentration deutlich an. Die niedrigste Temperatur, bei der noch eine Zündung möglich war (Zündtemperatur!), lag in diesem speziellen Fall bei etwa 540°C.

In Abb. 4-32 ist der amerikanische „6,8-L-Ofen“ schematisch dargestellt. Im deutschsprachigen Raum werden nebeneinander folgende Untersuchungsapparate für die Bestimmung der Zündtemperatur benutzt:

- der nach IEC genormte Godbert-Greenwald-Ofen, GG-Ofen (Abb. 4-33),
- ein GG-Ofen doppelter Länge,
- der BAM-Ofen (Abb. 4-34),
- ein modifizierter BAM-Ofen.

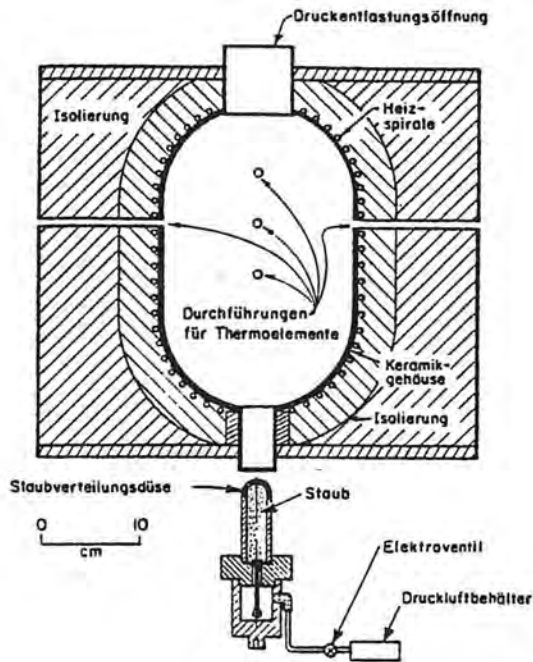


Abb. 4-32. Schnitt durch den „6,8-L-Ofen“ des ehemaligen US-Bureau of Mines (Zündtemperatur-Ofen) (nach [37]).

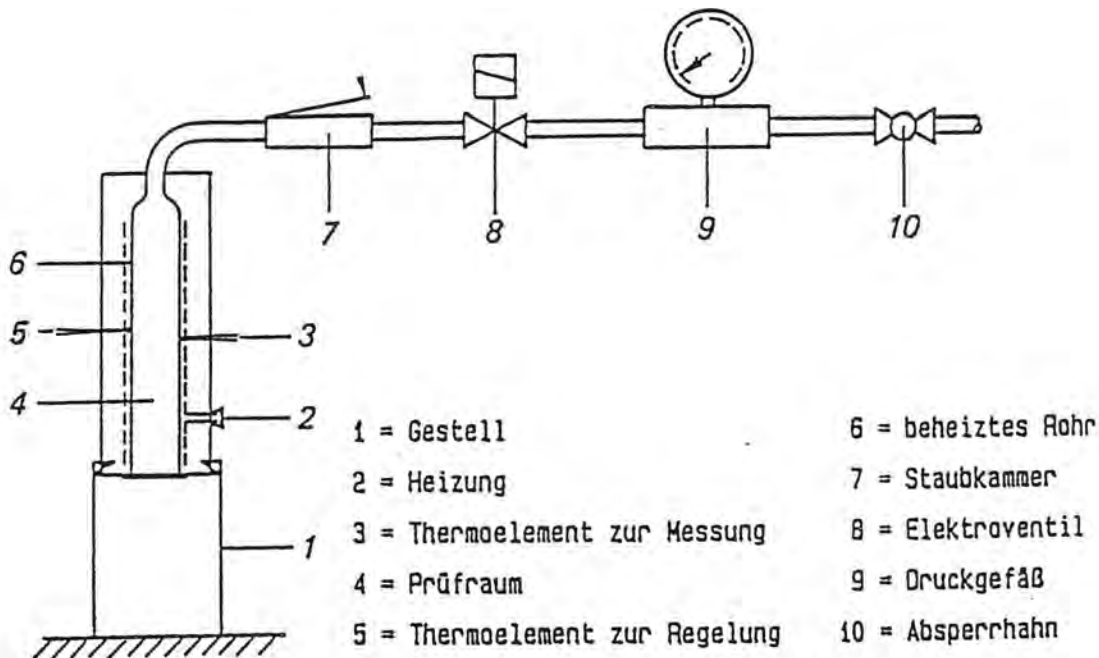


Abb. 4-33. Godbert-Greenwald-Ofen zur Bestimmung der Zündtemperatur (nach [1]).

Die Ergebnisse von Vergleichsmessungen mit den zuletzt genannten vier deutschen Öfen sind geeignet, die Problematik sicherheitstechnischer Kenngrößen (nicht nur bei Stäuben!) noch einmal eingehender zu betrachten.

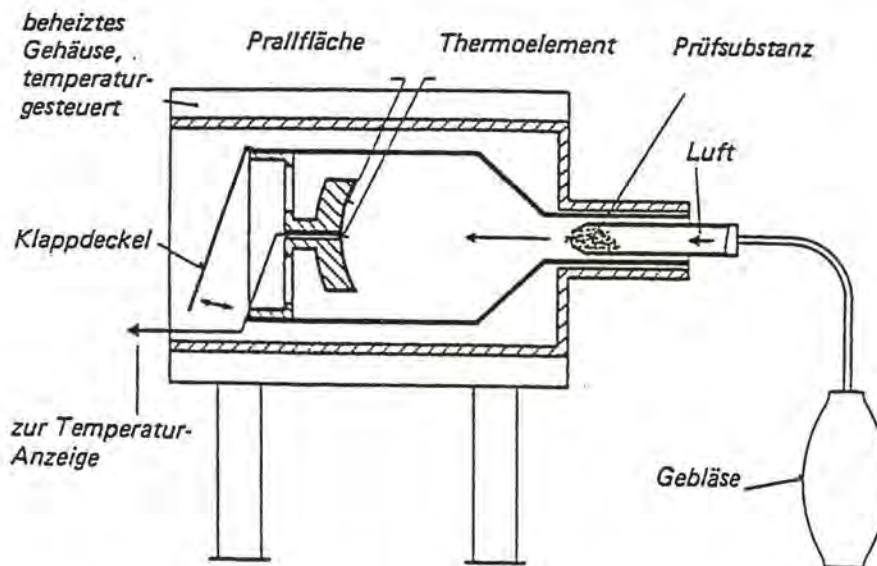


Abb. 4-34. BAM-Ofen zur Bestimmung der Zündtemperatur (nach [1]).

Messungen der Zündtemperaturen in allen vier Öfen an 21 Stäuben brachten das in Abb. 4-35 dargestellte Ergebnis, daß – nach statistischer Auswertung der Mittelwerte jeweils mehrerer Wiederholungsmessungen – der nach IEC zur Bestimmung der Zündtemperatur genormte Godbert-Greenwald-Ofen normaler Länge die *höchsten* Zündtemperaturen lieferte [4-35]. Das heißt, von allen vier Methoden ist aus sicherheitstechnischer Sicht das genormte Verfahren am wenigsten zur Bestimmung der *Mindestzündtemperatur* geeignet: In 8% der Fälle mit signifikanten Unterschieden stammen die niedrigsten Zündtemperaturwerte vom GG-Ofen doppelter Länge. In 92% dieser Fälle liefert der modifizierte BAM-Ofen die sicherheitstechnisch günstigsten (d. h. niedrigsten) Ergebnisse. Die Unterschiede sind teilweise sehr groß. So erhält man im Falle von Weizenmehl folgende Zündtemperaturen:

• genormter GG-Ofen	=	<u>490°C</u>
• verlängerter GG-Ofen	=	470°C
• BAM-Ofen	=	410°C
• modifizierter BAM-Ofen	=	<u>375°C</u>

Das sind 115°C Differenz zwischen dem genormten Godbert-Greenwald-Ofen und dem sicherheitstechnisch konservativ arbeitenden modifizierten BAM-Ofen! (An Lycopodium wurden im modifizierten BAM-Ofen und im amerikanischen 6,8-L-Ofen die gleichen Zündtemperaturen gemessen).

Aus solchen Erfahrungen lassen sich auch für andere Kenngrößen gültige Aussagen ableiten:

- Sicherheitstechnische Kenngrößen sind keine Stoffkonstanten oder gar Naturkonstanten. Sie hängen stark von den gewählten experimentellen Bedingungen ab.

- Nach genormten Methoden bestimmte Kenngrößen müssen nicht unbedingt die besten erhältlichen Werte sein, obwohl dies anzustreben wäre.
- Die Entwicklung brauchbarer Untersuchungsmethoden zur Bestimmung sicherheitstechnischer Kenngrößen ist ein nicht abgeschlossener Prozeß.

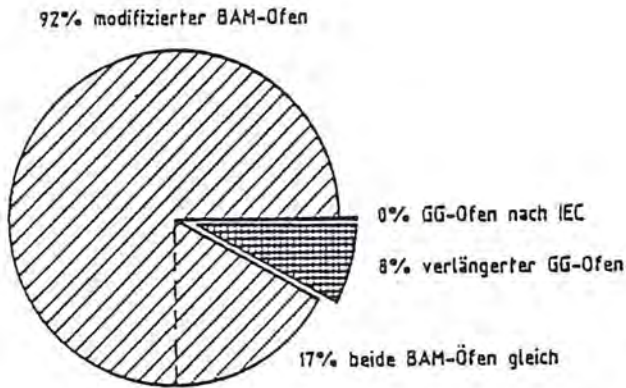


Abb. 4-35. Anteil der signifikant niedrigsten Zündtemperaturen von Stäuben bei Vergleichsmessungen in unterschiedlichen Zündtemperatur-Öfen (nach [35]).

4.3.5 Mindestzündenergie einer Staubwolke

Die Mindestzündenergie eines Staub-Luft-Gemischs (*MZE*) ist der niedrigste Wert der in einem Kondensator gespeicherten elektrischen Energie, die bei der Funkenentladung über geeignete Elektroden gerade ausreicht, das zündwilligste Gemisch aus Staub und Luft bei Atmosphärendruck und Raumtemperatur zu entzünden. Ihre Ermittlung erfolgt in Anlehnung an den VDI-Fortschrittbericht Nr. 134 "Bestimmung der Mindestzündenergie von Staub-Luft-Gemischen" [36]. Eine Europannorm zu diesem Thema ist bei CEN/TC 305 in Vorbereitung.

In dem Maße, in dem pneumatische Förderverfahren mehr und mehr in der Staubtechnik verwendet wurden – und besonders durch immer höhere Anforderungen an die Reinheit der Abluft von Staubanlagen (TA-Luft!), die nur durch immer intensivere Filterverfahren bewältigt werden konnten – traten verstärkt Gefahren durch elektrostatische Aufladungen von Staubströmen, Staubschüttungen und elektrisch nicht leitfähigen Anlagenteilen in den Vordergrund. Solche aufgeladenen Materialien und Stäube können durch Berührung mit oder durch Annäherung an leitfähige Anlagenteile unter Funkenbildung entladen werden. Es ist deshalb sehr wichtig zu wissen, welche niedrigste Energie eines elektrischen Funkens ausreicht, um eine zu handhabende Staubart in Form einer Staubwolke zu zünden.

Als Prüfeinrichtung eignen sich die modifizierte Hartmann-Apparatur und geschlossene Apparaturen wie 1-m³-Behälter und 20-L-Kugel. Als Zündquelle dient die zeitlich gedehnte Funkenentladung eines Hochspannungskondensators über eine Funkenstrecke, deren Energie systematisch variiert wird (Beispiel für eine Prüfapparatur in Abb. 4-36). Der zu untersuchende Staub wird in der Apparatur wieder mit Luft aufgewirbelt. Die im Zündstromkreis freigesetzte Energie (*W*) wird bei dem zu untersuchenden Staub unter Variation der Staubkonzentration durch Verändern der Ladespannung und der Kapazität

von Kondensatoren so lange halbiert, bis bei zehn aufeinanderfolgenden Versuchen unter gleichen Testbedingungen keine Entzündung mehr erfolgt. Die *MZE* liegt zwischen der höchsten Energie W_1 , bei der in mindestens zehn aufeinanderfolgenden Zundversuchen keine Zündung eintritt und der niedrigsten Energie W_2 , bei der nach weniger als zehn aufeinanderfolgenden Zundversuchen eine Zündung beobachtet wird:

$$W_1 < MZE < W_2 \quad (4-6)$$

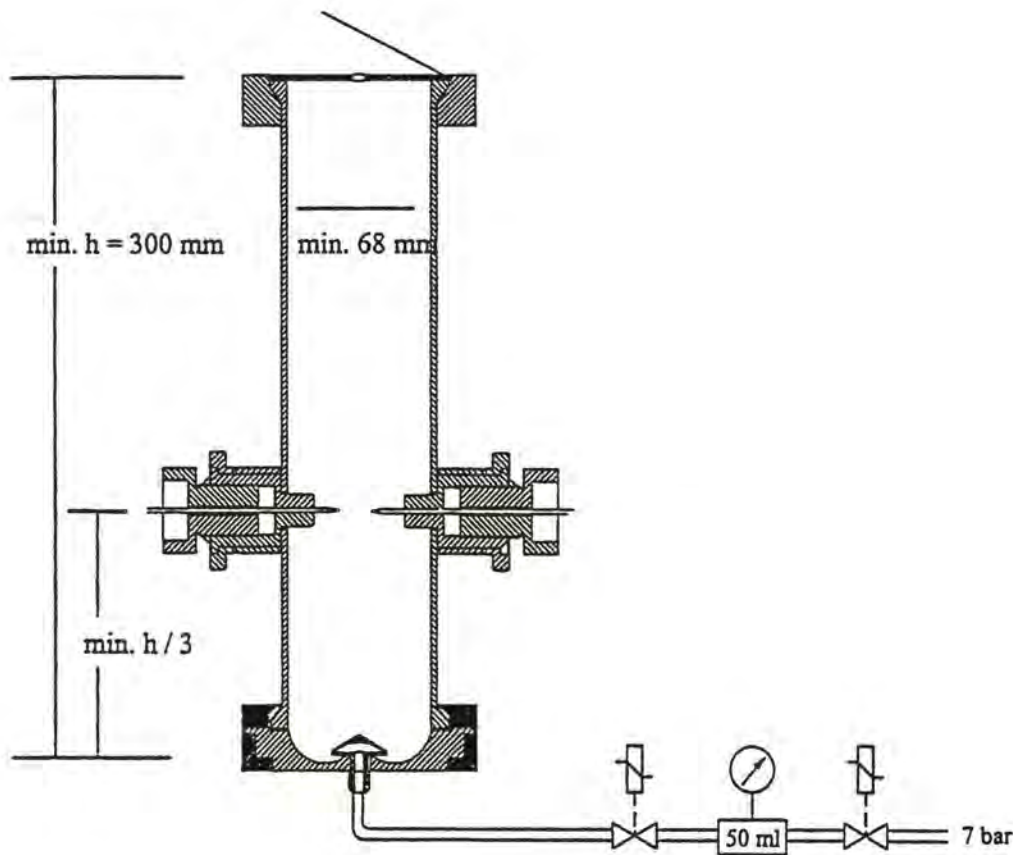


Abb. 4-36. Modifizierte Hartmann-Apparatur zur Bestimmung der *MZE* von Staub-Luft-Gemischen.

Die im Versuch jeweils verwendete Energie wird nach der Gleichung

$$W = 0,5 \cdot C \cdot U^2 \quad (4-7)$$

berechnet.

(W = gespeicherte Energie in Joule, C = Kapazität der Kondensatoren, einschließlich parasitärer Kapazitäten in Farad, U = Ladespannung der Kondensatoren in Volt)

Bei der Ermittlung der *MZE* ist eine Vielzahl von Einflußgrößen zu beachten z. B.:

- Staubkonzentration,
- Zündverzögerungszeit nach der Staubaufwirbelung,
- Elektrodenform,
- Elektrodenabstand,
- Elektrodenmaterial,
- elektrischer Widerstand des Entladestromkreises,
- Induktivität des Entladestromkreises,
- Abstand der Elektroden.

Um in unterschiedlichen Apparaten gleiche *MZE* zu bestimmen, hat man sich bei der Normung hinsichtlich der Funkenerzeugungssysteme auf folgende Bedingungen festgelegt:

- Induktivität des Entladekreises 1 bis 2 mH,
- Ohmscher Widerstand des Entladekreises so klein wie möglich (< 5 Ohm!),
- Elektrodenmaterial rostfreier Stahl oder Messing oder Kupfer oder Wolfram,
- Elektrodendurchmesser 2,0 mm,
- Elektrodenabstand mindestens 6 mm,
- Kondensatoren stoßstromfest und induktionsarm,
- Elektrodenanordnung möglichst kapazitätsarm,
- Ausreichend hoher Isolationswiderstand zwischen den Elektroden.

In Abb. 4-37 sind zwei unterschiedliche Funkenerzeugungssysteme dargestellt:

Anordnung a: Sie ist geeignet wenn niedrige *MZE*-Werte gemessen werden müssen. In solch einem Fall ist es wegen der erforderlichen Kleinheit der Kapazität des Ladekondensators (C_0) unvermeidlich, daß die parasitäre Kapazität des Entladestromkreises (C_p) von gleicher Größenordnung ist wie C_0 . Die Funkenspannung (Entladespannung) kann dann mit Hilfe des konstant zu haltenden C_p -Werts nach

$$U_p = U_0 \cdot C_0 / (C_0 + C_p) \quad (4-8)$$

berechnet werden. Daraus folgt die Energie des Entladestromkreises zu

$$W = 0,5 \cdot (C_0 + C_p) \cdot U_p^2 \quad (4-9)$$

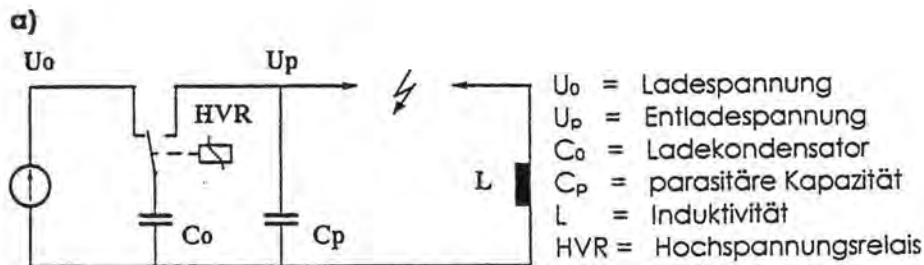
Dieser Zündstromkreis ist für sehr kleine Funkenenergien ($W \leq 10$ mJ) anwendbar.

Anordnung b: Mit ihr lassen sich größere Energien (praktisch verlustfrei) übertragen und sicher messen. Eine der Elektroden des Zündstromkreises (ME) ist beweglich. Vor dem Versuchsbeginn befindet sie sich in einem deutlich größeren Abstand als 6 mm von der Gegenelektrode entfernt. Durch Öffnung des Ladestromrelais wird der Ladekondensator auf die erforderliche Hochspannung gebracht. Die Durchbruchspannung zwischen den Elektroden bleibt aber – wegen des zu großen Elektrodenabstands – zunächst unterschritten. Hat der Kondensator die gewünschte Hochspannung erlangt, dann wird die Elektrode (ME) durch ein pneumatisches System schnell in den Abstand von 6 mm zur

anderen Elektrode geschossen. Der Funkenüberschlag findet statt, ehe die bewegte Elektrode ihre Endposition erreicht hat. Die Funkenenergie errechnet man dann wieder nach Gl. 4-7 zu

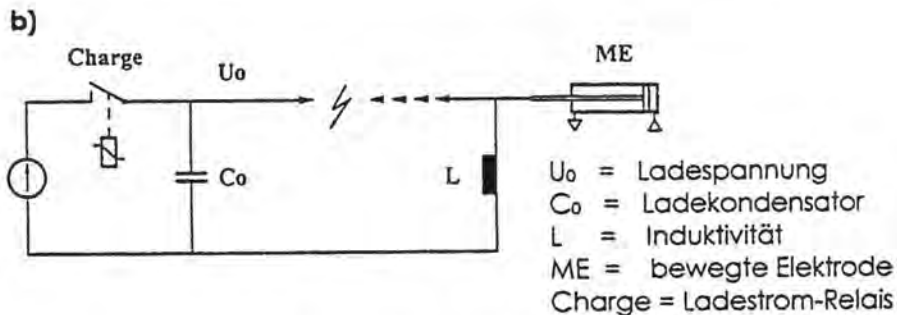
$$W = 0,5 \cdot C_0 \cdot U_0^2$$

Schon während der Elektrodenbewegung fällt die gespeicherte Energie durch Koronaströme zwischen den Elektrodenspitzen geringfügig ab. Deshalb ist dieses System nur für Energien $W \geq 10$ mJ geeignet, bei denen die Coronalverluste zu vernachlässigen sind.



$$U_p = U_0 \cdot C_0 / (C_0 + C_p)$$

$$W = 0,5 \cdot (C_0 + C_p) \cdot U_p^2$$



$$W = 0,5 \cdot C_0 \cdot U_0^2$$

Abb. 4-37. Zwei alternative Funkenzeugungssysteme für die Bestimmung der MZE von Staub-Luft-Gemischen (nach [38]), a Triggerung durch Hochspannungsrelais, b Triggerung durch bewegte Elektrode

4.4 Literatur

- [1] VDI-2263 Staubbrände und Staubexplosionen, Blatt 1: Untersuchungsmethoden zur Ermittlung von sicherheitstechnischen Kenngrößen von Stäuben (Mai 1990).

- [2] Richtlinien für die Vermeidung der Gefahren durch explosionsfähige Atmosphäre mit Beispielsammlung (Explosionsschutz-Richtlinien – EX-RL), Juni 1996.
- [3] DIN/VDE 0165: Errichten elektrischer Anlagen in explosionsgefährdeten Bereichen (Februar 1991).
- [4] VDE 0170/0171 Teil 1503: Methoden zur Bestimmung der minimalen Entzündungstemperatur von Stäuben. Teil 1: Staubschicht auf einer heißen Oberfläche.
- [5] Hensel, W., John, W.: Die Schichtdickenabhängigkeit der Glimmtemperatur, Theorie und Praxis der Selbstentzündungs- und Glimmvorgänge von Stäuben. Fortschrittberichte VDI; Reihe 3, Nr. 244, VDI-Verlag, Düsseldorf: 1991.
- [6] Hensel, W., Krause, U.: Process Safety Progress 13, 4 (1994), 210–213.
- [7] Krause, U.: Zündgefahren lagernder Staubschüttungen und -schichten, Berechnungsmethoden und Diagramme für die Praxis. Fortschrittberichte VDI, Reihe 3, Nr. 422, VDI-Verlag, Düsseldorf, 1995.
- [8] Koenen, H., Ide, K.H., Swart, K.-H.: Explosivstoffe 49 (1961) Nr. 1 bis 3.
- [9] Gesetz über explosionsgefährliche Stoffe vom 6.5.1986 (BGBL I, Nr. 18, 557–98).
- [10] Leuschke, G., Oßwald, R.: In: VDI-Berichte Nr. 304, VDI-Verlag, Düsseldorf, 1978, 29–38.
- [11] Bartknecht, W.: Explosionen. Springer, Berlin, Heidelberg, New York, 1980.
- [12] Field, P.: Dust Explosions, Handbook of Powder Technology, Vol. 4. Elsevier, Amsterdam 1982.
- [13] Cashdollar, K.L., Hertzberg, M. (eds.): Industrial Dust Explosions (Proceedings of the Symposium on Industrial Dust Explosions, Pittsburgh, PA, June 10–13, 1986), STP 958, American Society for Testing and Materials, Philadelphia, PA, 1987.
- [14] Bartknecht, W.: Dust Explosions: Course, Prevention, Protection. Springer, 1989.
- [15] Eckhoff, R. K.: Dust Explosions in the Process Industries, Butterworth Heinemann, 1991.
- [16] Bartknecht, W.: Explosionsschutz. Springer 1993.
- [17] Selle, H., Zehr, K.: VDI-Berichte Nr. 19. VDI-Verlag, Düsseldorf, 1957, 25–36.
- [18] Zehr, J.: VDI-Berichte Nr. 19. VDI-Verlag, Düsseldorf, 1957, 63–68.
- [19] VDI 3673: Druckentlastung von Staubexplosionen (Juni 1979).
- [20] ISO 6184-1: Explosion Protection Systems – Part 1: Determination of Explosion Indices of Combustible Dusts in Air (1985).
- [21] Siwek, R.: 20-L-Laboratory Apparatus for the Determination of the Explosion Characteristics of Flammable Dust. Ciba Geigy AG. Basel/Wintherthur Engineering College, Wintherthur, 1977.
- [22] Cashdollar, K.L., Hertzberg, M.: Rev. Sci. Instrum. 56 (1985), 596.
- [23] Cashdollar, K.L.: Process Safety Progress 13 (1994) 139–145
- [24] Wiemann, W.: In: Industrial Dust Explosions. STP 958. American Society for Testing and Materials, Philadelphia, PA, 1987, 33–44.
- [25] Andrews, G.E., Bradley, D.: Comb. Flame. 18 (1972), 133–153.
- [26] Krause, U., Kasch, T.: In: Transport Phenomena in Combustion. Chan S.H. (ed.), Taylor + Francis, 1996, 389–391.
- [27] Proust, C., Veysseyre, B.: Comb. Sci. Techn. 62 (1988), 149–172.
- [28] Pedersen, L.S., van Wingerden, K.: Measurement of Fundamental Burning Velocity of Dust-Air Mixtures in Industrial Situations. CREDIT Project, Final Report, 1995, 140–167.
- [29] Hertzberg, M., Zlochower, I.A., Cashdollar, K L.: In: Twenty-First Symposium (International) on Combustion. The Combustion Institute Pittsburgh, PA, 1988, 325–333.
- [30] Schönwald, I.: Staub, Reinhaltung der Luft 31, 9 (1971), 376–378.
- [31] Krause, U., Wang, R., Dinc, S.: In: 7. Kolloquium zu Fragen der chemischen und physikalischen Sicherheitstechnik. Tagungsbericht, Bundesanstalt für Materialforschung und -prüfung, Berlin, 1997, 21–31.
- [32] Zabetakis, M.G.: Flammability Characteristics of Combustible Gases and Vapors. U.S. Bureau of Mines, Bulletin 627 (1965):
- [33] Cashdollar, K.L.: J. Loss Prev. Process Ind. 9 (1996), 65–76.
- [34] Nagy, J., Dorsett, H.G. Jr., Jacobson, M.: U.S. Bureau of Mines Report of Investigations 6543 (1964).
- [35] Hensel, W.: BAM-Jahresbericht, 1984, 86–88.
- [36] Berthold, W. (Hrsg.): Bestimmung der Mindestzündenergie von Staub/Luft-Gemischen. Fortschrittberichte VDI, Reihe 3, Nr. 134. VDI-Verlag, Düsseldorf 1987.
- [37] U.S. Bureau of Mines Report of Investigations 9467 (1993).
- [38] Siwek, R., Cesana, Ch.: Process Safety Progress 14, 2 (1995), 107ff.

ROUTING AND TRANSMITTAL SLIP

Date

May 16, 2000

TO: (Name, office symbol, room number,
building, Agency/Post)

Initials

Date

1. RJTuchman, Bldg. 01

2.

3.

4.

5.

Action	File	Note and Return
Approval	For Clearance	Per Conversation
As Requested	For Correction	Prepare Reply
Circulate <input checked="" type="checkbox"/>	For Your Information	See Me
Comment	Investigation	Signature
Coordination	Justify	

REMARKS

Publication Name: Properties of Flammable Dusts (Characteristic Data)

Conference Name:

Location:

Dates:

cc:

DLFelice

DO NOT use this form as a RECORD of approvals, concurrences, disposals,
clearances, and similar actions**FROM:** (Name, org. symbol, Agency/Post)**Room No. — Bldg.**

212 143

Secretary (Office Automation)

Phone No. 412-386-6552

Disaster Prevention and Response Branch

Fax No. 412-386-6595

5041-102

OPTIONAL FORM 41 (Rev. 7-76)Prescribed by GSA
FPMR (41 CFR) 101-11.206

notification of publication of chapter in book:

authors: Willi Hensel (BAM, Berlin, Germany) and Kenneth L. Cashdollar

title: **Eigenschaften brennbarer Stäube (Kenngrößen)**
[Properties of Flammable Dusts (Characteristic Data)]

chapter 4 in **Handbuch des Explosionsschutzes** [Handbook of Explosion Protection]
ed. by Henrikus Steen

published in German by Wiley-VCH, Weinheim, Germany
April 2000