



Internationale Sektion
der IVSS für
Maschinensicherheit

Staubexplosions- schutz an Maschinen und Apparaten

Grundlagen

suva

**Schweizerische
Unfallversicherungsanstalt
Postfach 4358
CH-6002 Luzern
Schweiz**



DIE INTERNATIONALE VEREINIGUNG FÜR SOZIALE SICHERHEIT (IVSS)

hat über 300 Mitglieder (Regierungsbehörden und Anstalten) in mehr als 120 Staaten, von denen sich die Hälfte mit der Arbeitssicherheit befassen. Sitz der IVSS ist Genf, beim Internationalen Arbeitsamt. Ihr Hauptziel ist die Förderung und der Ausbau der SOZIALEN SICHERHEIT in allen Teilen der Welt.

Zur Verbesserung der Arbeitssicherheit und des Gesundheitsschutzes in den Betrieben wurde 1975 die



INTERNATIONALE SEKTION DER IVSS FÜR MASCHINENSICHERHEIT

gegründet. Sie behandelt Fragen zur Sicherheit von Maschinen, Anlagen und Systemen. Vorsitz und Sekretariat: Berufsgenossenschaft Nahrungsmittel und Gaststätten, D-68165 Mannheim.

Zur Intensivierung der Arbeitssicherheit in den Betrieben ist seit 1970 für den Bereich der chemischen Industrie einschliesslich der Kunststoff-, Sprengstoff-, Mineralöl- und Gummiindustrie die



INTERNATIONALE SEKTION DER IVSS FÜR DIE VERHÜTUNG VON ARBEITSUNFÄLLEN UND BERUFSSKRANKHEITEN IN DER CHEMISCHEN INDUSTRIE

gebildet worden. Vorsitz und Sekretariat liegen bei der Berufsgenossenschaft der chemischen Industrie, D-69115 Heidelberg.

Staubexplosionsschutz an Maschinen und Apparaten

Grundlagen

Herausgeber

Internationale Sektion der IVSS für Maschinensicherheit
Dynamostr. 7-11
D-68165 Mannheim

Vorwort

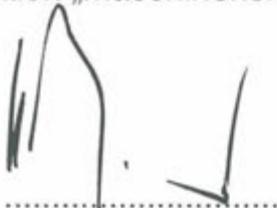
Die Sektion „Maschinensicherheit“ im Ständigen Fachausschuss zur Verhütung von Arbeitsunfällen und Berufskrankheiten der Internationalen Vereinigung für Soziale Sicherheit (IVSS) befasst sich in mehreren Arbeitskreisen mit der Frage der Sicherheit von Maschinen, Anlagen und Systemen. Ihre Mitglieder sind internationale Experten, die nicht nur aus Universitäten und Forschungseinrichtungen kommen, sondern wesentlich auch aus Betrieben und aus den Präventionsbereichen von Unfallversicherungsträgern. Sie stellen damit praxisorientierte Lösungsvorschläge zu komplexen, sicherheitsrelevanten Fragestellungen sicher.

Hierbei ist der Explosionsschutz eine spezifische Aufgabenstellung, welche der Arbeitskreis „Staubexplosionen“ der Sektion bearbeitet. Die jetzt vorgelegte Neuauflage „Staubexplosionsschutz an Maschinen und Anlagen“ fasst die neuesten Erkenntnisse über vorbeugende und konstruktive Schutzmassnahmen zusammen.

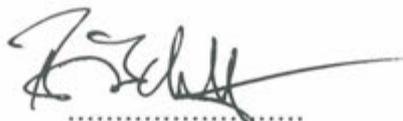
Die Broschüre ermöglicht es Verantwortlichen in den Betrieben, ohne spezifische Kenntnisse auf dem Gebiet des Explosionsschutzes zu beurteilen, ob Staubexplosionsgefahren bestehen können. Sie kann auch hinsichtlich der Anforderungen an die Betriebe zur Dokumentation von Gefährdungsanalysen und Problemlösungen durch das EG-Recht herangezogen werden. Die jeweils einzelfallbezogenen, betriebsspezifisch notwendigen Explosionsschutzmassnahmen müssen aber im Betrieb unter Beteiligung von Experten erarbeitet werden.

Die Sektion „Maschinensicherheit“ leistet so einen Beitrag zur Erhaltung und Weiterentwicklung eines hohen und - über die aktive Mitarbeit von Mitgliedern ihrer Arbeitskreise in Ausschüssen der EG - unter Industrieländern vergleichbaren Standes der Technik. Aus ihrem Verständnis der umfassenden, weltweiten Bedeutung einer wirksamen Prävention bietet die Sektion auch den sich in Entwicklung befindlichen Ländern ihre Unterstützung und Beratung an.

Sektion „Maschinensicherheit“



Vorsitzender des Vorstands
(Dr. F. Mosetter)



Generalsekretär
(Dr. H.-J. Bischoff)

Vorsitz

Berufsgenossenschaft
Nahrungsmittel und Gaststätten,
Prof. Dr. S. Radandt

Unter Mitwirkung von

Allgemeine Unfallversicherungsanstalt (AUVA), Wien	(A)
Berufsgenossenschaftliches Institut für Arbeitssicherheit (BIA), Sankt Augustin	(D)
Berufsgenossenschaft der chemischen Industrie, Heidelberg	(D)
Berufsgenossenschaft Nahrungsmittel und Gaststätten (BGN), Mannheim	(D)
Christian Michelsen Research AS, Fantoft	(N)
Heineken Technical Services, Zoeterwoude	(NL)
Health and Safety Laboratory, Buxton	(GB)
DMT - Fachstelle für Brand- und Explosionsschutz - Bergbau-Versuchsstrecke, Dortmund	(D)
StuvEx International Belgium, Kontich	(B)
Pellmont Explosionsschutz, Binningen	(CH)
Sicherheitsinstitut, Basel	(CH)
Suva (Schweizerische Unfallversicherungsanstalt), Luzern	(CH)

Die Autoren

Dr. W. Bartknecht, Freiburg	(D)	Dr. H. Rainbauer, Wien	(A)
Dipl.-Ing. H. Beck, Sankt Augustin	(D)	Dipl.-Ing. R. Siwek, Basel	(CH)
Dr. B. Dyrba, Heidelberg	(D)	Ir. G. van Laar, Kontich	(B)
Ing. H. B. Janssens, Kontich	(B)	Ir. K. van Wingerden, Fantoft	(N)
Dr. G. Lunn, Buxton	(GB)	Ing. H. Voorschuur, Zoeterwoude	(NL)
Dr. R. J. Ott, Luzern	(CH)	Dipl.-Phys. W. Wiemann, Dortmund	(D)
Dr. G. Pellmont, Binningen	(CH)	Dipl.-Ing. C. Zockoll, Dortmund	(D)

Gestaltung und Grafik

Dr. R. J. Ott, Luzern	(CH)
Dipl.-Designer D. Settele (Computergrafik)	(D)

	Seite
1. Einführung	8
2. Vorbeugender Explosionsschutz	10
2.1 Vermeiden explosionsfähiger Staub/Luft-Gemische	10
2.1.1 Beseitigen brennbarer Stäube	10
2.1.2 Begrenzen der Konzentration brennbarer Stäube	10
2.2 Beseitigen bzw. Begrenzen des Sauerstoffs	11
2.2.1 Inertisieren mit Gasen	11
2.2.2 Inertisieren mit Feststoffen	16
2.2.3 Anwenden von Vakuum	16
2.3 Vermeiden wirksamer Zündquellen	17
3. Konstruktiver Explosionsschutz	31
3.1 Explosionsfeste Bauweise	32
3.2 Explosionsfeste Bauweise in Verbindung mit Explosionsdruckentlastung	32
3.3 Explosionsfeste Bauweise in Verbindung mit Explosionsunterdrückung ...	36
3.4 Explosionstechnische Entkopplung	36
3.4.1 Zellenradschleuse	37
3.4.2 Löschmittelsperre	38
3.4.3 Explosionsschutzschieber/-klappe	39
3.4.4 Explosionsschutzventil	40
3.4.5 Entlastungsschlot	42
4. Anhang	44
4.1 Begriffe, Definitionen und Abkürzungen	44
4.2 Literatur	47
5. Schriftenreihe der IVSS (Explosionsschutz)	49

1 Einführung

Die vorliegende Schrift soll die an Maschinen und Apparaten im Falle der Anwesenheit von brennbaren Stäuben möglichen Explosionsgefahren aufzeigen, nach dem heutigen Stand der Technik mögliche Schutzmassnahmen beschreiben und für deren Anwendung Entscheidungsgrundlagen bereitstellen.

Voraussetzung für eine Entzündung und fortschreitende Verbrennung ist, dass an derselben Stelle und gleichzeitig

- ein exotherm oxidierbarer Stoff,
- ausreichender Sauerstoff und
- eine wirksame Zündquelle

vorhanden sind. Für das Eintreten einer Explosion sind zusätzlich zu diesen Bedingungen erforderlich

- ausreichende Feinheit des brennbaren Stoffes und
- dessen Konzentration im Staub/Luft-Gemisch innerhalb der Explosionsgrenzen.

Alle Massnahmen, die mindestens eine der drei Voraussetzungen beseitigen oder so stark vermindern, dass ein Brand oder eine Explosion ausgeschlossen wird, werden als **vorbeugende Schutzmassnahmen** bezeichnet.

Kann die Sicherheit mit den Massnahmen des vorbeugenden Explosionsschutzes nicht ausreichend gewährleistet werden, so müssen Massnahmen des **konstruktiven Explosionsschutzes** angewendet werden.

Solche Massnahmen verhindern nicht das Auftreten eines Brandes bzw. einer Explosion, sondern beschränken deren Auswirkungen auf ein unbedenkliches Mass.

Konstruktive Schutzmassnahmen sind:

- explosionsfeste Bauweise
- Explosionsunterdrückung
- Explosionsdruckentlastung
- Explosionsentkopplung

Bestehen nach dem Wirksamwerden von Explosionsschutzmaßnahmen noch Risiken, müssen die Anlagen in einen sicheren Zustand gebracht werden, z.B. durch Abschalten. Staubbrände und Staubexplosionen können sich z.B. ereignen

- beim Mahlen und Trocknen von Kohle und beim Befüllen von Kohlenstaubsilos,
- beim Absaugen und Fördern von Holzstaub in Filter- und Abscheideanlagen,
- beim Umschlagen und Silieren von Getreide,
- beim Mahlen, Mischen und mechanischen Fördern von organischen Produkten wie Getreide, Futtermittel, Zucker, Kunststoffe, Farbstoffe, Pharmazeutika,
- beim Sprühtrocknen von organischen Produkten wie Milch, Kaffee, Waschpulver,
- beim Trocknen, Granulieren und Beschichten in Wirbelschichtapparaturen,
- beim Schleifen von Leichtmetallen und ihren Legierungen,
- beim Herstellen und Verarbeiten von Metallpulvern.

Das optionale Anwenden von vorbeugenden und/oder konstruktiven Schutzmassnahmen in bezug auf Sicherheit, Ökologie und Wirtschaftlichkeit setzt genaue Kenntnisse über das Zustandekommen und den Ablauf von Bränden¹⁾ und Explosionen (z.B. sicherheitstechnische Kenngrößen) sowie über die Wirksamkeit der Schutzmassnahmen voraus [1] - [8].

¹⁾ Im folgenden wird nur mehr der Bereich Explosionsschutz behandelt

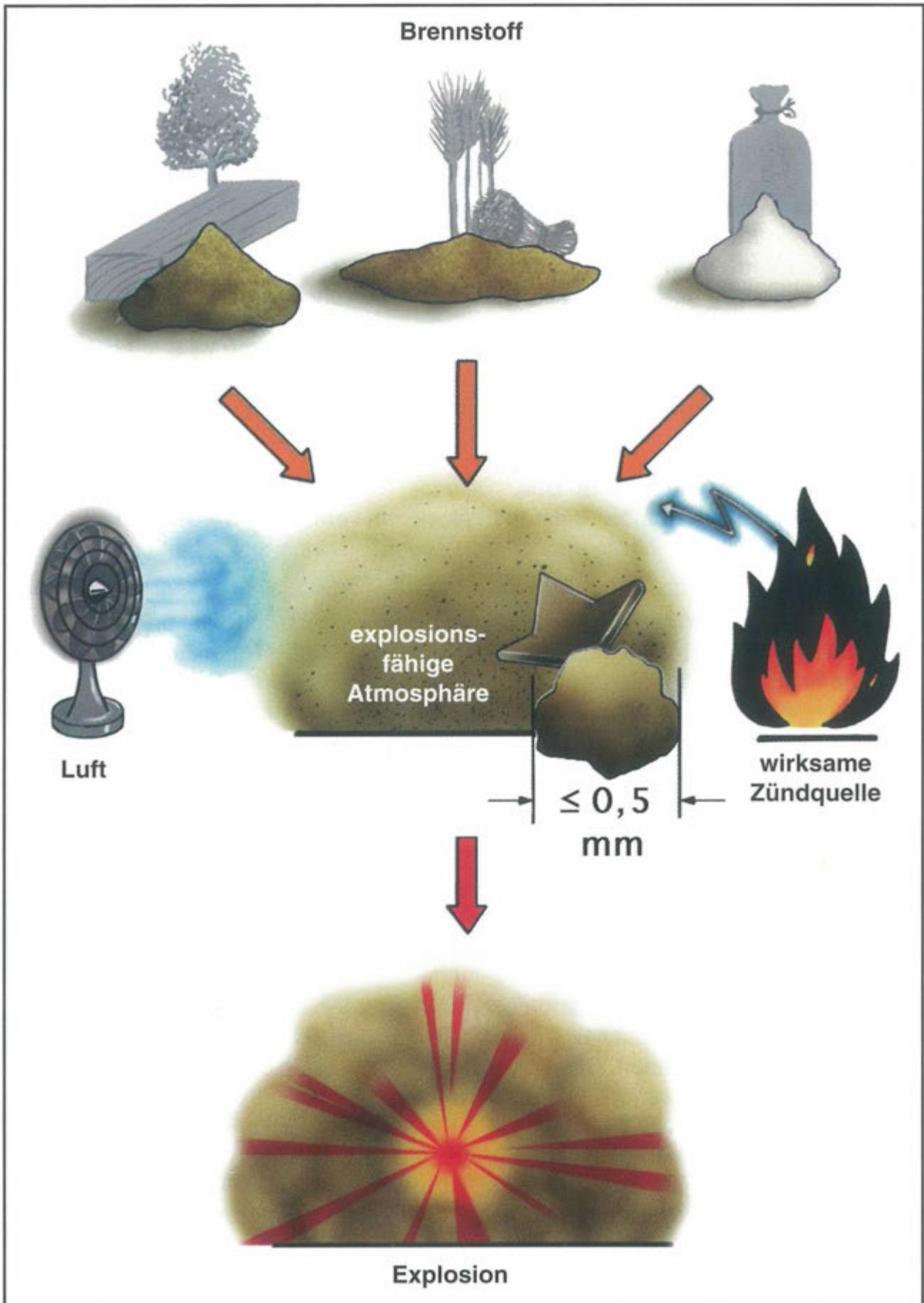


Abb. 1: Voraussetzungen für das Zustandekommen von Explosionen

2 Vorbeugender Explosionsschutz

Das Prinzip des vorbeugenden Explosionsschutzes ist es, mindestens eine der für das Zustandekommen einer Explosion erforderlichen Voraussetzung zu vermeiden (auszuschliessen). Hierfür ergeben sich grundsätzlich folgende Möglichkeiten:

- das Vermeiden explosionsfähiger Staub/Luft-Gemische durch Beseitigen bzw. Begrenzen der brennbaren Stäube,
- das Vermeiden explosionsfähiger Staub/Luft-Gemische durch Beseitigen bzw. Begrenzen des für das Verbrennen erforderlichen Sauerstoffs,
- das Vermeiden wirksamer Zündquellen.

2.1 Vermeiden explosionsfähiger Staub/Luft-Gemische

2.1.1 Beseitigen brennbarer Stäube

Beim Handhaben von Stäuben können Explosionen vermieden werden, indem brennbare Stoffe durch unbrennbare ersetzt, oder indem brennbaren Stoffen unbrennbares Material in ausreichender Menge zugegeben wird.

Durch einen genügend grossen Teilchendurchmesser - z.B. oberhalb 0,5 mm wird die Explosionsgefahr heruntersetzt. Auch bei grober Körnung ist aber zu beachten, dass z.B. durch mechanisches Beanspruchen des Materials wiederum Feinstaub entstehen kann.

Das Auftreten von explosionsfähigen Staub/Luft-Gemischen oder von Staubablagerungen in der Umgebung von staubführenden Anlagen kann durch staubdichte Bauweise oder entstaubungstechnische Massnahmen vermieden werden. Da sich in der Praxis Staubablagerungen häufig nicht vermeiden lassen, kommt dem Beseitigen von abgelagertem Staub durch regelmässiges Reinigen eine herausragende Bedeutung zu. Bezogen auf das Innere von staubführenden Anlagen ist das Beseitigen brennbarer Stäube nur selten möglich. So lassen sich beispielsweise in einigen Fällen brennbare Füllstoffe durch unbrennbare ersetzen.

2.1.2 Begrenzen der Konzentration brennbarer Stäube

Gelingt es, Staubkonzentrationen ausserhalb der Explosionsgrenzen zu halten, werden Staubexplosionen verhindert. Diese Massnahme kann allein oder ergänzend zu anderen Massnahmen angewendet werden. Dies hängt von der Verfahrenstechnik und den Kenngrössen des Staubes ab.

Eine einfache summarische Betrachtung, z.B. die Gesamtmenge des Staubes bezogen auf das Gesamtvolumen des Behälters, gibt wegen der Inhomogenität der Staubverteilung nicht die Konzentrationsverhältnisse für jedes Teilvolumen wieder.

In Einzelfällen ist die Konzentrationsbegrenzung als Schutzmassnahme möglich, wenn bei Anlagen oder Anlagenteilen eine konstante Staubkonzentration, die deutlich unterhalb der unteren Explosionsgrenze des Feinstaubes ($< 63 \mu\text{m}$) liegt, gewährleistet werden kann.

Im Luftstrom von Raumluft-Absauganlagen und Reinluftleitungen nach Filtereinrichtungen wird im Normalbetrieb die untere Explosionsgrenze deutlich unterschritten. Im Laufe der Zeit muss jedoch mit Ablagerungen von Staub gerechnet werden. Bei Aufwirbelung dieser Produktablagerungen kann Explosionsgefahr entstehen. Durch wiederkehrende Reinigung kann diese Gefahr beseitigt werden.

In pneumatischen Dichtstromförderanlagen ist in der Regel die Überschreitung der oberen Explosionsgrenze in den Förderleitungen aufgrund der hohen Produktbeladung gegeben. Beim An- und Abfahren sowie beim Eintritt des Produktstromes in Filter, Zyklon oder Silo können jedoch staubexplosionsfähige Gemische auftreten.

Vor allem wenn sich während der An- und Abfahrphasen explosionsfähige Gemischkonzentrationen ergeben können, sind unter Umständen weitere Schutzmassnahmen wie Inertisierung für diese Phasen erforderlich.

Um explosionsfähige Konzentrationen zu verhindern, kann auch die Bindung des Feinstaubes durch Besprühen mit Flüssigkeiten, z.B. mit Wasser oder mit speziellen Ölen, eine taugliche Massnahme sein.

2.2 Beseitigen bzw. Begrenzen des Sauerstoffs

2.2.1 Inertisieren mit Gasen

Zum Vermeiden von Staubexplosionen kann als vorbeugende Schutzmassnahme ebenfalls die Inertisierung angewendet werden [9], [10]. Sie verhindert das Entstehen von Explosionen dadurch, dass der Sauerstoff der Luft - zumindest teilweise - durch ein Inertgas - meist Stickstoff oder Kohlendioxid - ersetzt wird. Eine Anwendung dieser Schutzmassnahme erfordert entsprechende Sachkenntnisse und das Beherrschen des Inertisierungsprozesses und setzt in der Regel eine gasdichte Anlage voraus.

Die Sauerstoffgrenzkonzentration in einem Staub/Luft/Inertgas-Gemisch wird experimentell bei Variation der Staubkonzentration als diejenige Sauerstoffkonzentration bestimmt, bei der gerade keine Staubexplosion mehr möglich ist. Sie ist eine für den Staub (Tabelle 1) und das Inertgas spezifische Grösse. Für Kohlendioxid als Inertgas ergeben sich höhere Werte für die Sauerstoffgrenzkonzentration als für Stickstoff.

Werden Anlagen mit erhöhter Temperatur betrieben, so ist zu berücksichtigen, dass die Sauerstoffgrenzkonzentration mit zunehmender Temperatur fällt (ca. 1,5 Vol.-% pro 100°C Temperaturerhöhung).

Aus der experimentell ermittelten Sauerstoffgrenzkonzentration ergibt sich für die Praxis durch Abzug von im allgemeinen 2 Vol.-% die höchstzulässige Sauerstoffkonzentration. Die Inertisierung ist zu überwachen, so dass die höchstzulässige Sauerstoffkonzentration nicht überschritten wird. Dies kann durch kontinuierliche oder intermittierende Messung geschehen. Hierbei ist insbesondere folgendes zu beachten:

- Auswahl einer geeigneten Messgrösse (z.B. Sauerstoffkonzentration).
- Auswahl der geeigneten Messtechnik (z.B. Messprinzip, Querempfindlichkeit, Fehlergrenzen, Eigenzeit des Messgerätes, Zeitverzögerung der Anzeige durch den Abstand zwischen Messgerät und Entnahmestelle).

- Auswahl des geeigneten Messortes, der unter Beachtung der Strömungsverhältnisse die für die Sauerstoffkonzentration ungünstigsten Zustände erfasst. Gegebenenfalls können mehrere Messorte erforderlich sein.

Staubart	Medianwert (M)	Sauerstoffgrenzkonzentration (SGK)
	[μm]	[Vol.-%]
Erbsenmehl	25	15,5
Cadmiumlaurat	< 63	14
Steinkohle (Fett-)	17	14
Bariumstearat	< 63	13
Roggenmehl	29	13
Braunkohle	63	12
Russ	13	12
Organisches Pigment	< 10	12
Herbizid	10	12
Cadmiumstearat	< 63	12
Calciumstearat	< 63	12
Weizenmehl	60	11
Polyacrylnitril	26	11
Cellulose	22	10,5
Holz	27	10
Harz	63	10
Methylcellulose	70	10
Polyethylen (HDPE)	26	10
β -Naphthol	< 30	9,5
Bisphenol A	34	9,5
Maisstärke	17	9
Netzschwefel mit 20 %		
Ligniumsulfonat	30	7
Paraformaldehyd	23	6
Aluminium	22	5

Tabelle 1: Sauerstoffgrenzkonzentration (SGK) in Stickstoff
(1-m³-Behälter, ISO-Verfahren)

Bei intermittierender Messung ist ferner darauf zu achten, dass

- vollständig in sich geschlossene Systeme mit stets definierter und reproduzierbarer Gasführung vorliegen (Gefahr: Reinigungsöffnungen),
- vorher in einer ausreichend langen Fahrperiode sichere Betriebsbedingungen für die Inertisierung festgelegt wurden,
- nach jeder Änderung an der Anlage die Betriebsbedingungen für die Inertisierung überprüft und gegebenenfalls neu festgelegt werden,
- der Inertisierungsgrad der in Frage kommenden Anlagenteile bei allen Betriebszuständen bekannt ist

und

- ein Ausfall des Inertisierungsgases durch Alarm gemeldet wird und weitere Massnahmen unverzüglich eingeleitet werden.

Für den Fall von Betriebsstörungen sind geeignete Massnahmen festzulegen:

- Stillsetzen der Anlage bei Überschreiten der höchstzulässigen Sauerstoffkonzentration bzw. bei Unterschreiten der für eine einwandfreie Inertisierung erforderlichen Inertgasmenge. Das Stillsetzen sollte in der Regel automatisch erfolgen.
- Auswahl einer geeigneten Alarmschwelle, bei deren Überschreitung Gegenmassnahmen (automatisch/manuell) eingeleitet werden können.

Durch die hier beschriebene Inertisierung können Staubbrände nicht ausgeschlossen werden. Hierfür sind deutlich geringere Sauerstoffkonzentrationen erforderlich. Gegen thermische Zersetzungen (spontane Zersetzung), die auch ohne Luftsauerstoff ablaufen, ist Inertisierung keine wirksame Schutzmassnahme.

Die Eignung des Inertgases ist stets zu prüfen. Leichtmetallstäube können z.B. mit Kohlendioxid, z.T. auch mit Stickstoff reagieren.

Bei hybriden Gemischen aus brennbarem Staub und brennbaren Gasen oder Dämpfen ist die höchstzulässige Sauerstoffkonzentration auf den brennbaren Stoff mit dem niedrigsten Wert für die Sauerstoffgrenzkonzentration zu beziehen (Abb. 2 und 3).

Die im Vergleich zu Literaturwerten niedrigere Sauerstoffgrenzkonzentration der Gase (ca. 2 Vol.-%) in Abb. 2 und 3 ergibt sich durch die für das Staubprüfverfahren im 1-m³-Behälter festgelegten Randbedingungen (Zündenergie von 10 kJ, turbulentes Gemisch).

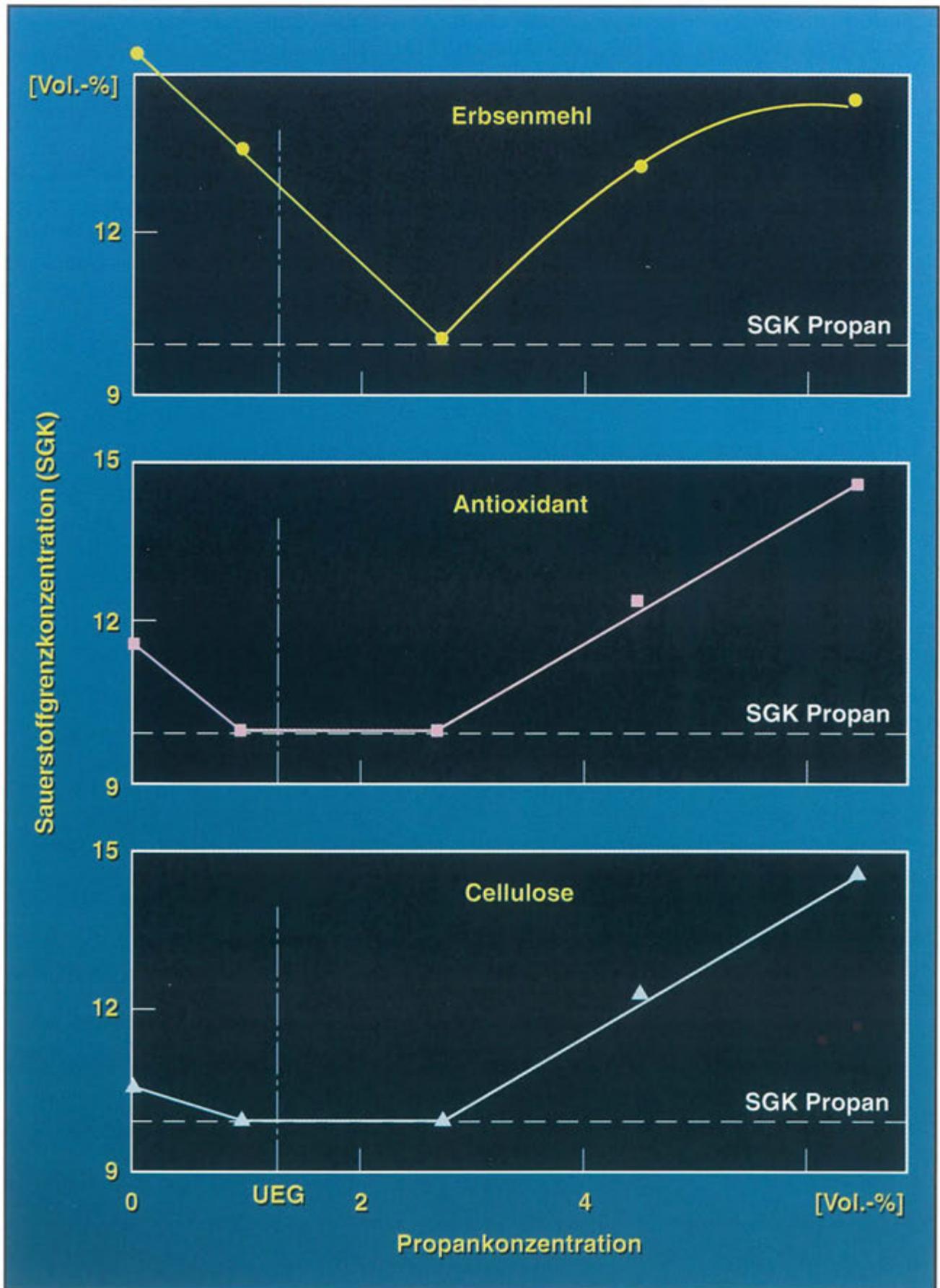


Abb. 2: Inertisierung von hybriden Gemischen mit Stickstoff:
 Brennbare Stäube/Propan (1-m³-Behälter, ISO-Verfahren)

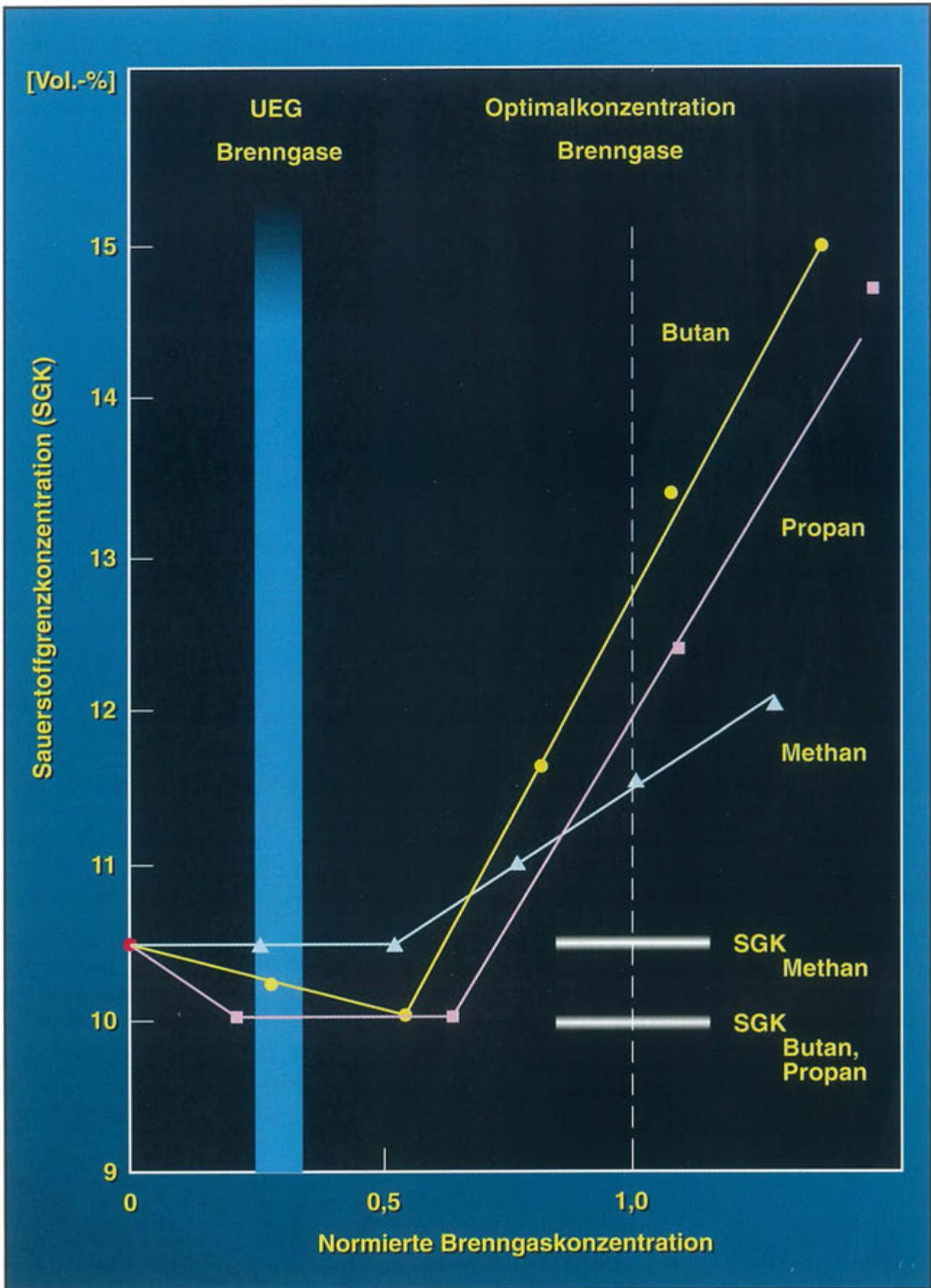


Abb. 3: Inertisierung von hybriden Gemischen mit Stickstoff: Cellulose/Brenngase (1-m³-Behälter, ISO-Verfahren)

2.2.2 Inertisieren mit Feststoffen

Explosionsfähige Stäube können durch Zugabe nichtbrennbarer Feststoffe (z.B. Steinsalz, Natriumsulfat oder Phosphate) in nicht mehr explosionsfähige Gemische verändert werden. Im allgemeinen sind nichtbrennbare Feststoffanteile von mehr als 50 Gew.-% erforderlich (Tabelle 2).

Brennbarer Staub	Medianwert (M) [µm]	Nicht-brennbarer Feststoff	Medianwert (M) [µm]	Mindestanteil nichtbrennbarer Feststoff [Gew.-%]
Methylcellulose	70	CaSO ₄	< 15	70
Organ. Pigment	< 10	NH ₄ H ₂ PO ₄	29	65
Steinkohle (Fett-)	20	CaCO ₃	14	65
Steinkohle (Fett-)	20	NaHCO ₃	35	65
Zucker	30	NaHCO ₃	35	50

Tabelle 2: Vermeiden explosionsfähiger Staub/Luft-Gemische durch Zugabe von nichtbrennbaren Feststoffen (1-m³-Behälter, ISO-Verfahren)

2.2.3 Anwenden von Vakuum

Durch Herabsetzen des Druckes unter den Atmosphärendruck kann erreicht werden, dass entweder keine Explosion mehr stattfindet (dies ist bei Staub/Luft-Gemischen im allgemeinen bei Ausgangsdrücken von ca. 50 mbar gegeben) oder dass der Explosionsdruck unter dem Atmosphärendruck bleibt (da der Explosionsdruck proportional abhängig ist vom Ausgangsdruck, ist dies bei Stäuben mit einem maximalen Explosionsüberdruck von 10 bar der Fall, wenn der Ausgangsdruck kleiner 0,1 bar ist) (Abb. 4). Bei abnehmendem Druck steigt darüber hinaus die Mindestzündenergie an. Je grösser also der Unterdruck ist, desto höher ist das Sicherheitsniveau.

Das Vakuum muss messtechnisch überwacht und im Fall einer Störung (z.B. bei Luft-einbruch) durch Einspeisen von Inertgas aufgehoben werden.

Für brennbare Stäube haben die Explosionsgrenzen wegen der Wechselwirkung zwischen abgelagertem und aufgewirbeltem Staub nicht die gleiche Bedeutung wie bei gasförmigen brennbaren Stoffen. So verändert sich die Staubkonzentration, z.B. durch Ablagern einerseits und Aufwirbeln andererseits ständig und lässt sich sicherheitstechnisch nur schwer beherrschen.

Das Begrenzen der Mengen brennbarer Stoffe und damit das Reduzieren der Auftretswahrscheinlichkeit explosionsfähiger Staub/Luft-Gemische hat insbesondere im Hinblick auf die Umgebung staubführender Anlagen Bedeutung.

So ist das Austreten von Staub in die Umgebung (Arbeitsräume) bereits durch dichte Bauweise und entstaubungstechnische Massnahmen (Unterdruck, Objektabsaugung) zu begrenzen (vermeiden). Unvermeidbare Staubablagerungen sind durch regelmässiges Reinigen zu beseitigen.

Auch der Einsatz von Nassabscheidern zählt zum vorbeugenden Explosionsschutz. Hierbei wird der Staub durch intensives Vermischen mit Wasser so stark angefeuchtet, dass er als Schlamm vorliegt und in diesem Zustand keine explosionsfähigen Staub/Luft-Gemische mehr bilden kann.

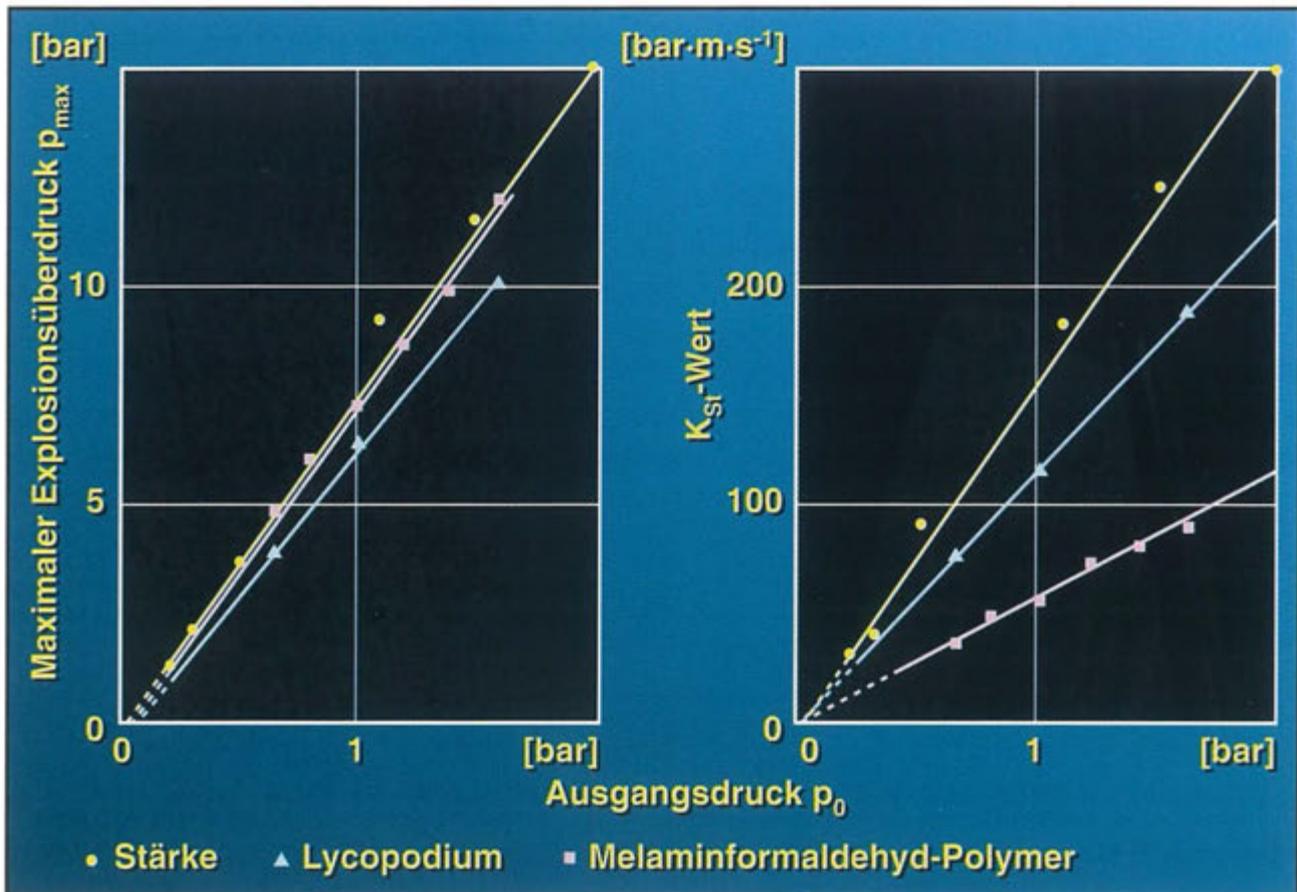


Abb. 4: Einfluss des Ausgangsdrucks auf die Explosionskenngrößen

2.3 Vermeiden wirksamer Zündquellen

Staubexplosionen können verhindert werden, wenn es gelingt, die Zündquellen zu vermeiden, die aufgrund ihrer Eigenschaften, z.B. Energie, Temperatur und Zeitverlauf, in der Lage sind, Staub/Luft-Gemische zu entzünden.

In diesem Zusammenhang ist zu unterscheiden zwischen

- trivialen Zündquellen (z.B. Schweißen, Schleifen, Rauchen),
- betrieblichen Zündquellen (z.B. heiße Oberflächen, elektrische oder elektrostatische Funken) und
- bei Störungen betriebsüblich zu erwartenden Zündquellen (z.B. Fremdkörper in Mühlen, Glimmnester).

Können erstere durch organisatorische Massnahmen (z.B. schriftliche Festlegungen von Verhaltensweisen und Sicherheitsmassnahmen) ausgeschlossen werden und lassen sich auch die betrieblichen und die störungsbedingten Zündquellen sicher ausschliessen (z.B. staubexplosionsgeschützte Elektroinstallation, einwandfreie elektrostatische Erdung, keine mechanischen Antriebe mit hohen Drehzahlen bzw. hoher Leistung, Vermeiden des Eintragens von Fremdkörpern oder von Glimmnestern), so wird dies nach dem augenblicklichen Stand der Erkenntnisse als ausreichende Schutzmassnahme angesehen. Besondere Vorsicht beim Anwenden dieser Schutzmassnahme ist jedoch bei Stäuben mit einer sehr niedrigen Mindestzündenergie (<10 mJ) und bei hybriden Gemischen, das heisst von Gemischen aus brennbarem Staub und brennbaren Gasen bzw. Dämpfen, geboten. In diesen Fällen kann die Schutzmassnahme Vermeiden wirksamer Zündquellen als alleinige Schutzmassnahme nicht ausreichend sein.

Als Zündquellen (Abb. 5) für Staub/Luft-Gemische sind besonders zu beachten:

- heisse Oberflächen,
- Flammen und heisse Gase,
- Schleif-, Reib- und Schlagvorgänge, die zu Funken und heissen Oberflächen führen können,
- nicht staubexplosionsgeschützt ausgeführte elektrische Betriebsmittel (Anlagen),
- statische Elektrizität (speziell Funkenentladungen, Gleitstielbüschel- und Schüttkegelentladungen) [11], [12] und
- stark exotherm verlaufende chemische Reaktionen.

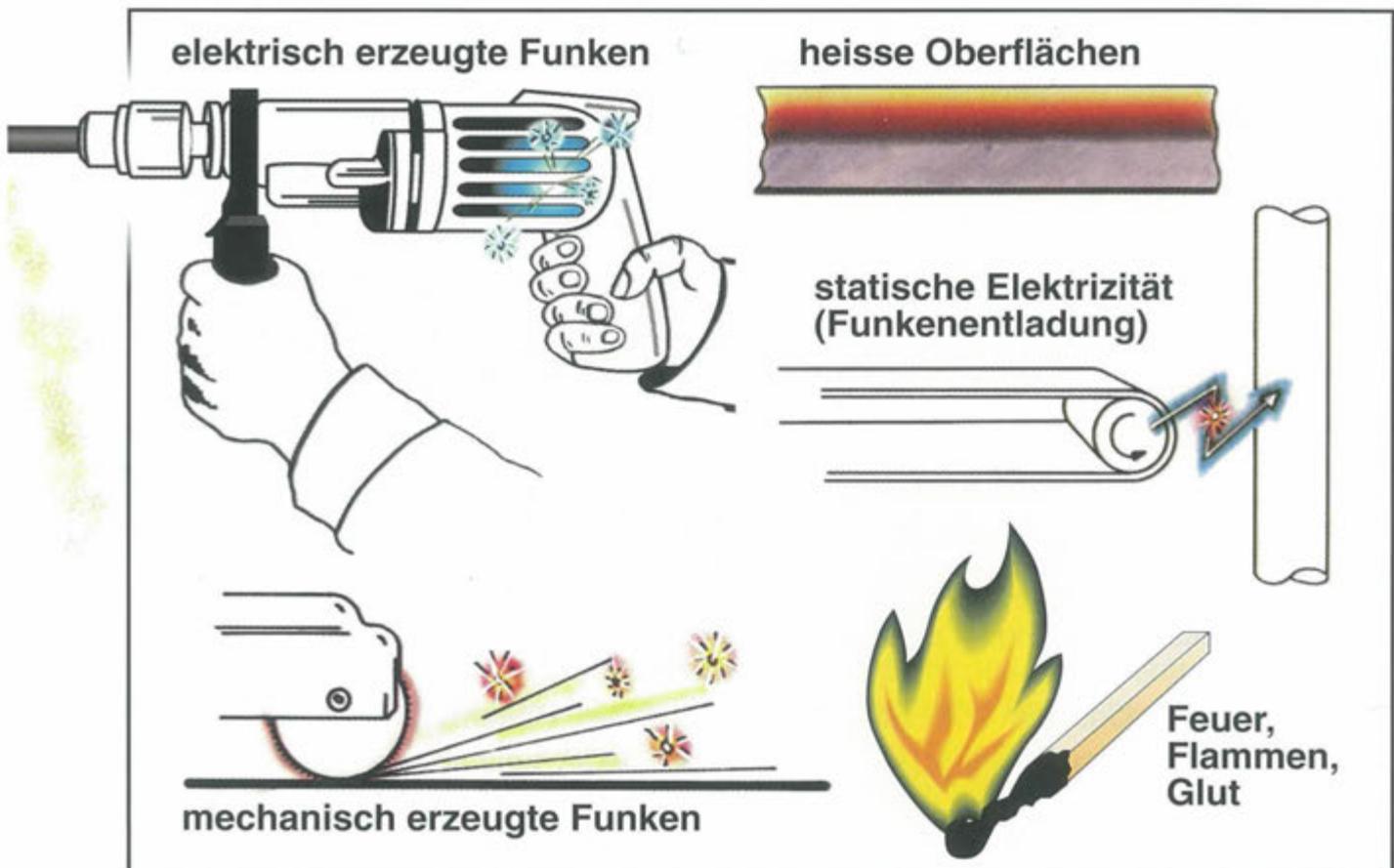


Abb. 5: Beispiele von möglichen Zündquellen

Im Zusammenhang mit der Zündwirksamkeit von mechanisch erzeugten Funken in Staub/Luft-Gemischen hat die Analyse eingetretener Schadensfälle zu den folgenden Erfahrungswerten über die Zündfähigkeit rotierender Teile im Hinblick auf die Relativgeschwindigkeit v geführt:

$$v < 1 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$$

$$v = 1 - 10 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$$

$$v > 10 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$$

Keine Zündgefahren.

Es müssen von Fall zu Fall Überlegungen angestellt werden, bei denen staub- und werkstoffspezifische Daten zu berücksichtigen sind.

Es ist in jedem Fall Zündgefahr gegeben.

Die Annahme, dass bei sehr niedrigen Relativgeschwindigkeiten keine Zündgefahr besteht, konnte durch die Ergebnisse neuerer Untersuchungen bestätigt werden. Abbildung 6 zeigt den Zusammenhang von Anpresskraft F_A und Relativgeschwindigkeit v beim Schleifen und Reiben von Stahlstiften gegen Stahlscheiben. Danach ist bei Relativgeschwindigkeiten von $v < 1 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ unter diesen Versuchsbedingungen nicht mit der Bildung von Schleif- oder Reibfunken noch mit dem Entstehen von heißen Oberflächen zu rechnen.

Um die Zündfähigkeit von mechanisch erzeugten Funken untereinander und mit der Mindestzündenergie von Stäuben vergleichen zu können, ordnet man ihnen eine elektrische Äquivalentenergie E_Q zu. Dies ist die Energie einer zeitlich gedehnten Kondensator-entladung, die die gleiche Zündwirksamkeit wie ein vorgegebener mechanisch erzeugter Funke hat. Die Abbildungen 7 und 8 zeigen den Zusammenhang zwischen der elektrischen Äquivalentenergie E_Q für Schleif- und Schlagfunken, die bei kurzzeitiger Berührung der Werkstoffe (20 ms bis 50 ms) entstehen, und der Mindestzündtemperatur MZT der brennbaren Stoffe. Es ergeben sich für die verschiedenen Werkstoffe sogenannte Zündgrenzgeraden.

Zum Beurteilen der Zündfähigkeit von mechanisch erzeugten Funken ist also die Kenntnis der Mindestzündtemperatur MZT und der Mindestzündenergie MZE des jeweiligen Staubes erforderlich. Aus den Abbildungen 7 und 8 lässt sich mit Hilfe der Mindestzündtemperatur über die Zündgrenzgerade des in Frage kommenden Werkstoffes die jeweilige elektrische Äquivalentenergie ermitteln. Liegt die Mindestzündenergie des Staubes unterhalb dieser elektrischen Äquivalentenergie, so ist eine Entzündung möglich.

Wie die Abbildungen 7 und 8 zeigen, können mechanisch erzeugte Funken Stäube mit niedriger Mindestzündtemperatur (z.B. MZT = 300°C) selbst dann entzünden, wenn sie eine hohe Mindestzündenergie aufweisen. Haben die Stäube dagegen eine hohe Mindestzündtemperatur (z.B. MZT = 600°C), dann können sie nur entzündet werden, wenn sie eine sehr niedrige Mindestzündenergie besitzen.

Die Zündwirksamkeit von mechanisch erzeugten Funken nimmt in der folgenden Reihenfolge (Abbildung 7 und 8) ab:

- Zündstein-Reib- und Schleiffunken
- Zirkon-Schleiffunken
- Titan-Schleiffunken und Titan/Rost-Schlagfunken
- Stahl-Schleiffunken und
- Aluminium/Rost-Schlagfunken.

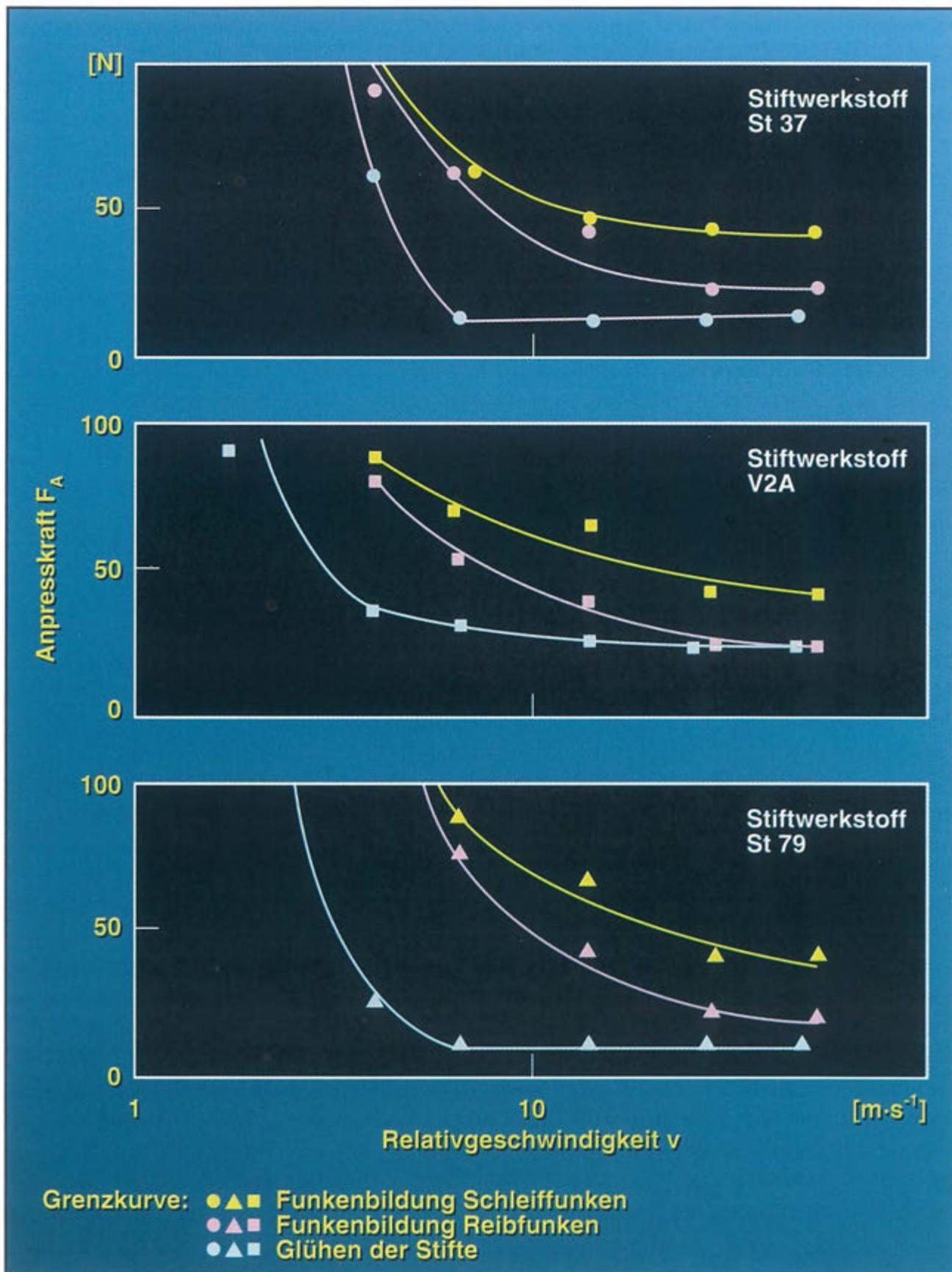


Abb. 6: Grenzkurven für das Entstehen von Schleif- und Reibfunken sowie von heißen Oberflächen
Scheibenwerkstoffe entsprechen den Stiftwerkstoffen - Stiftdurchmesser: 4 mm

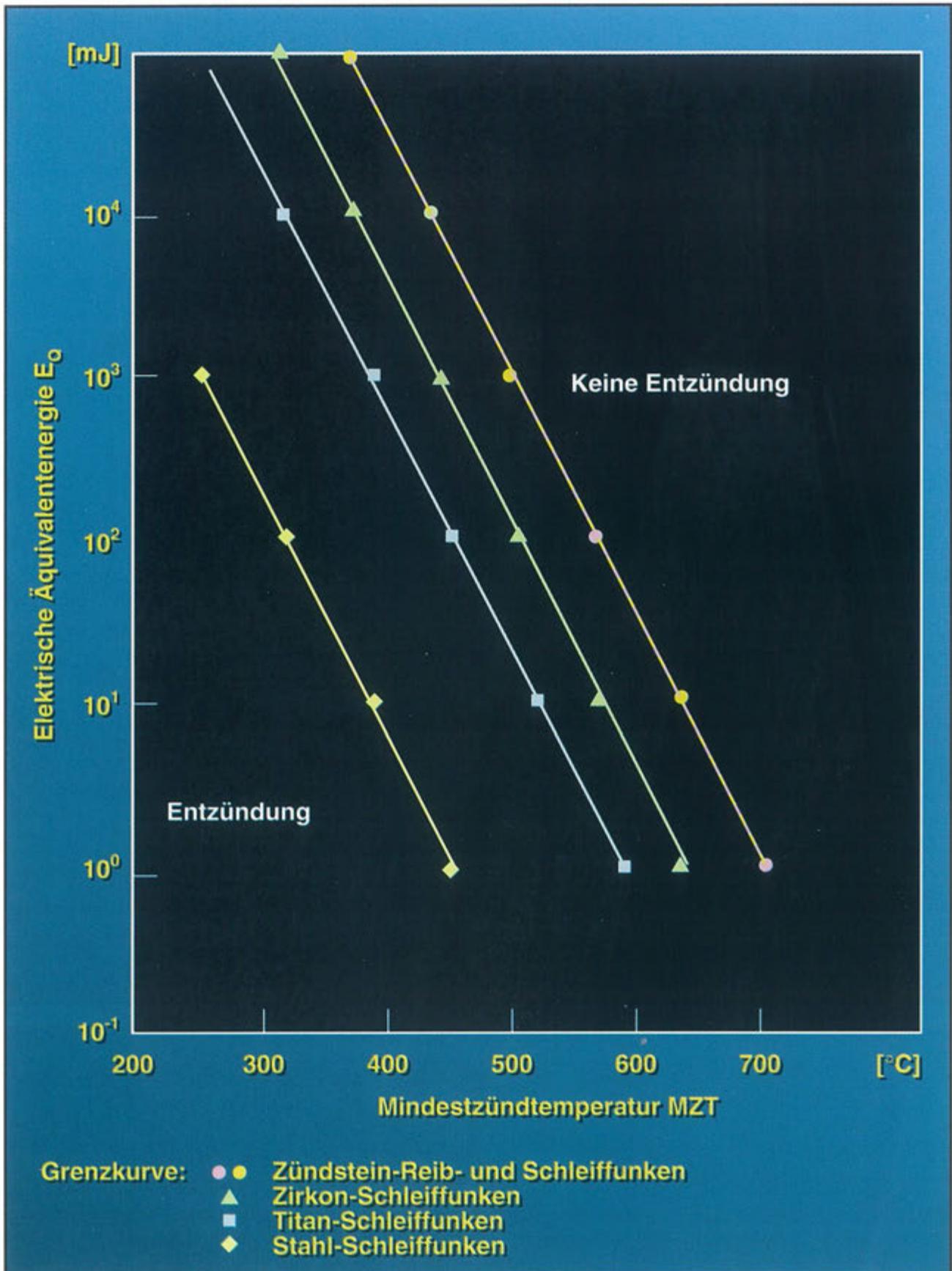


Abb. 7: Schleiffunken: Zusammenhang zwischen elektrischer Äquivalentenergie E_Q und Mindestzündtemperatur MZT
 $F_A = 60 \text{ N}$, $v = 30 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$

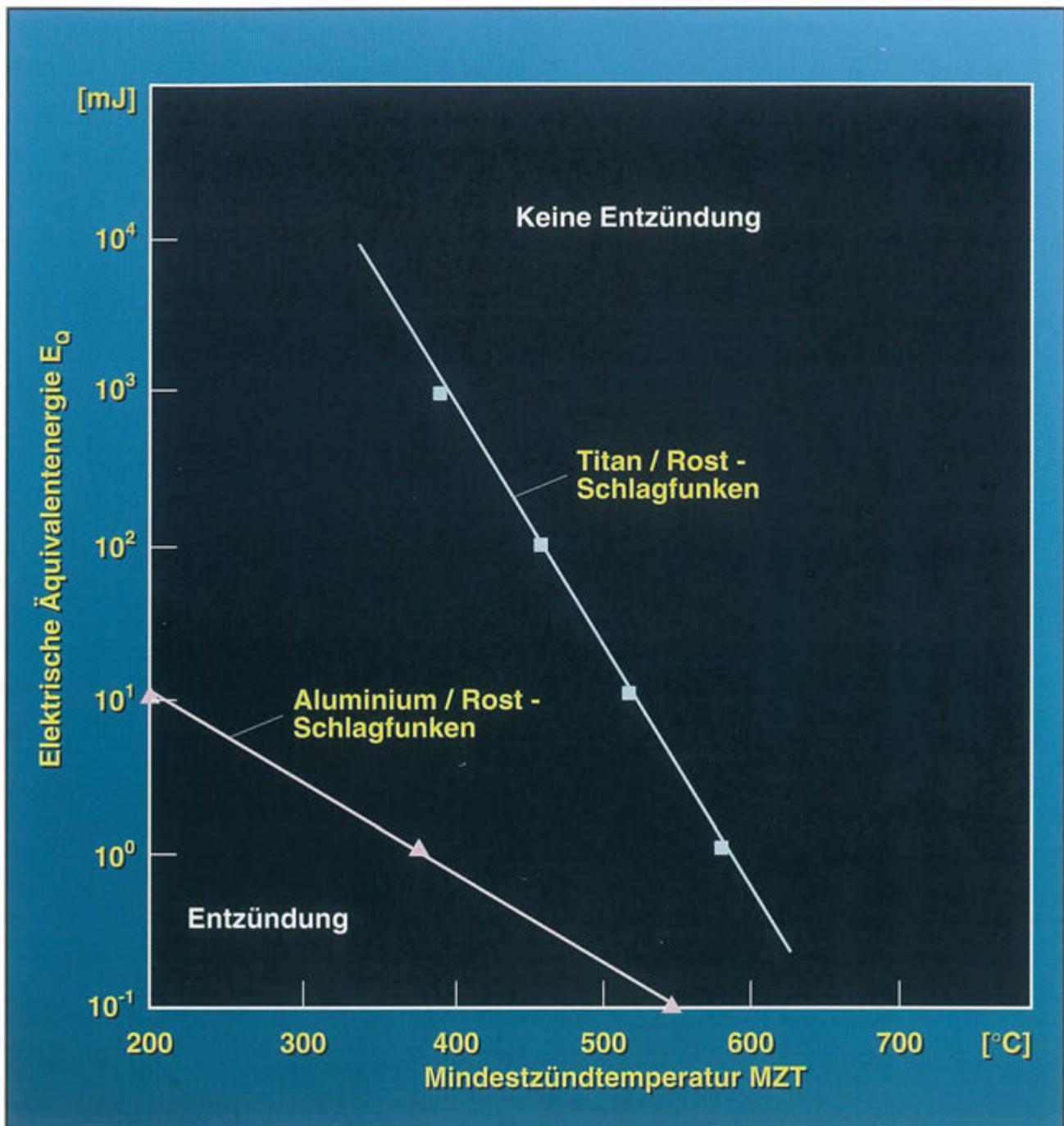


Abb. 8: Schlagfunken: Zusammenhang zwischen elektrischer Äquivalentenergie E_Q und Mindestzündtemperatur MZT
 $F_A = 60 - 100 \text{ N}$, $v = 25 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$

Stahl-Schleiffunken haben unter den aufgeführten Beispielen eine sehr schlechte Zündwirksamkeit (Abb. 9). Bei einer mittleren Mindestzündtemperatur von z.B. $MZT = 400^\circ\text{C}$ werden nur solche Staub/Luft-Gemische entzündet, deren Mindestzündenergie $< 10 \text{ mJ}$ ist. Die bei längerem Reiben von Stahl gegen Stahl (0,5 - 2 s) auftretenden Reibfunken sind deutlich zündwirksamer. Bezogen auf die gleiche Mindestzündtemperatur ist die Entzündung der Staub/Luft-Gemische bereits dann zu erwarten, wenn deren Mindestzündenergie unterhalb von 100 mJ liegt.

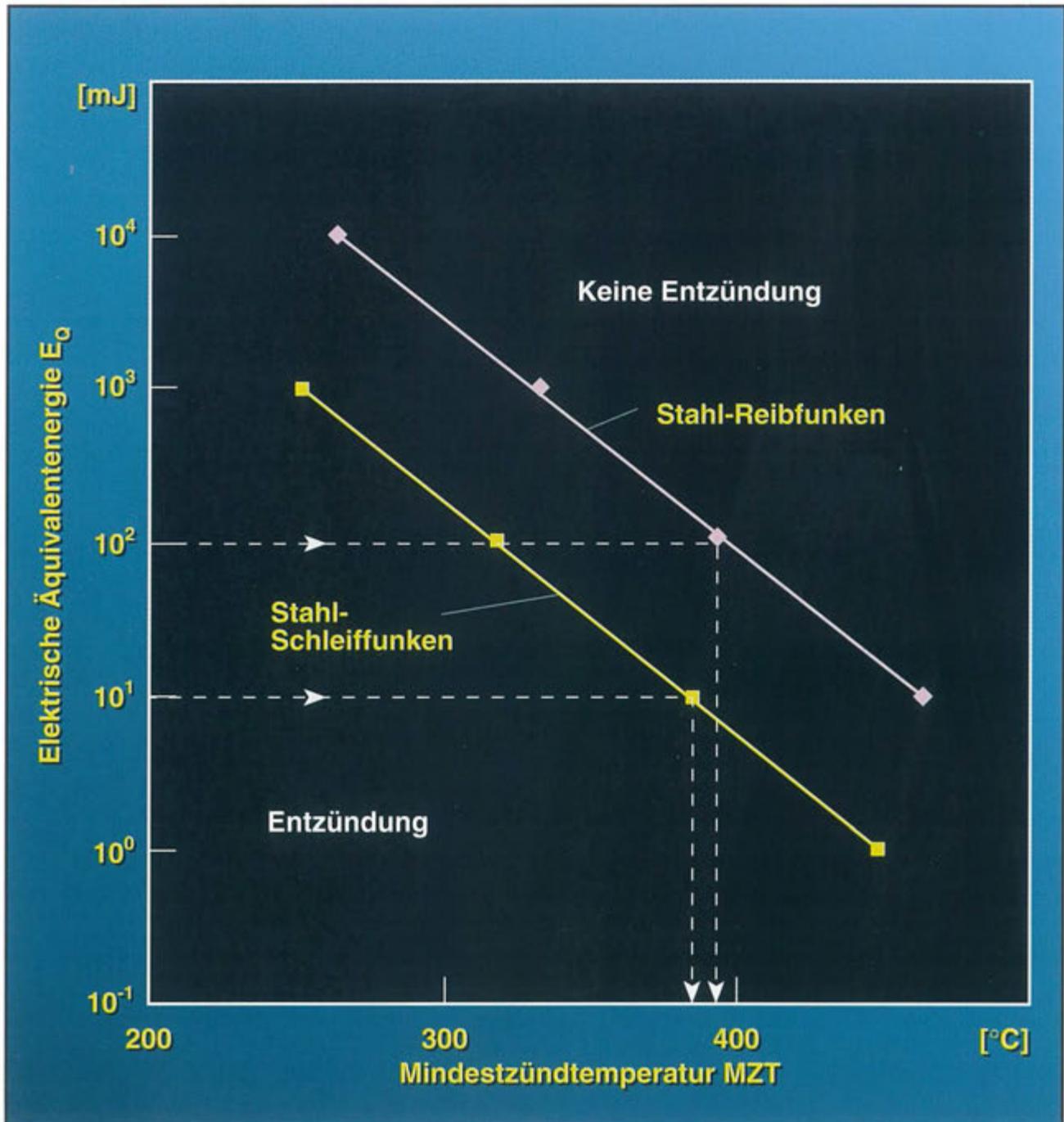


Abb. 9: Stahl-, Schleif- und Reibfunken: Zusammenhang zwischen elektrischer Äquivalentenergie E_0 und Mindestzündtemperatur MZT

$$F_A = 60 - 90 \text{ N}, v = 25 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$$

Zusammenfassend ist also festzustellen, dass die Mindestzündtemperatur, die Mindestzündenergie und die Art des funkengebenden Werkstoffes dafür entscheidend sind, ob beim Auftreten von mechanisch erzeugten Funken (Schleif-, Reib-, Schlagfunken) mit einer Entzündung von Staub/Luft-Gemischen zu rechnen ist.

Nach dem heutigen Stand des Wissens hat sich gezeigt, dass sich viele Stäube ähnlich leicht durch zeitlich gedehnte Kondensatorentladungen entzünden lassen, wie die Brenngase Methan, Butan, Propan und Propylen. Dies sind Stäube mit einer Mindestzündenergie von $< 10 \text{ mJ}$ (Abb. 10).

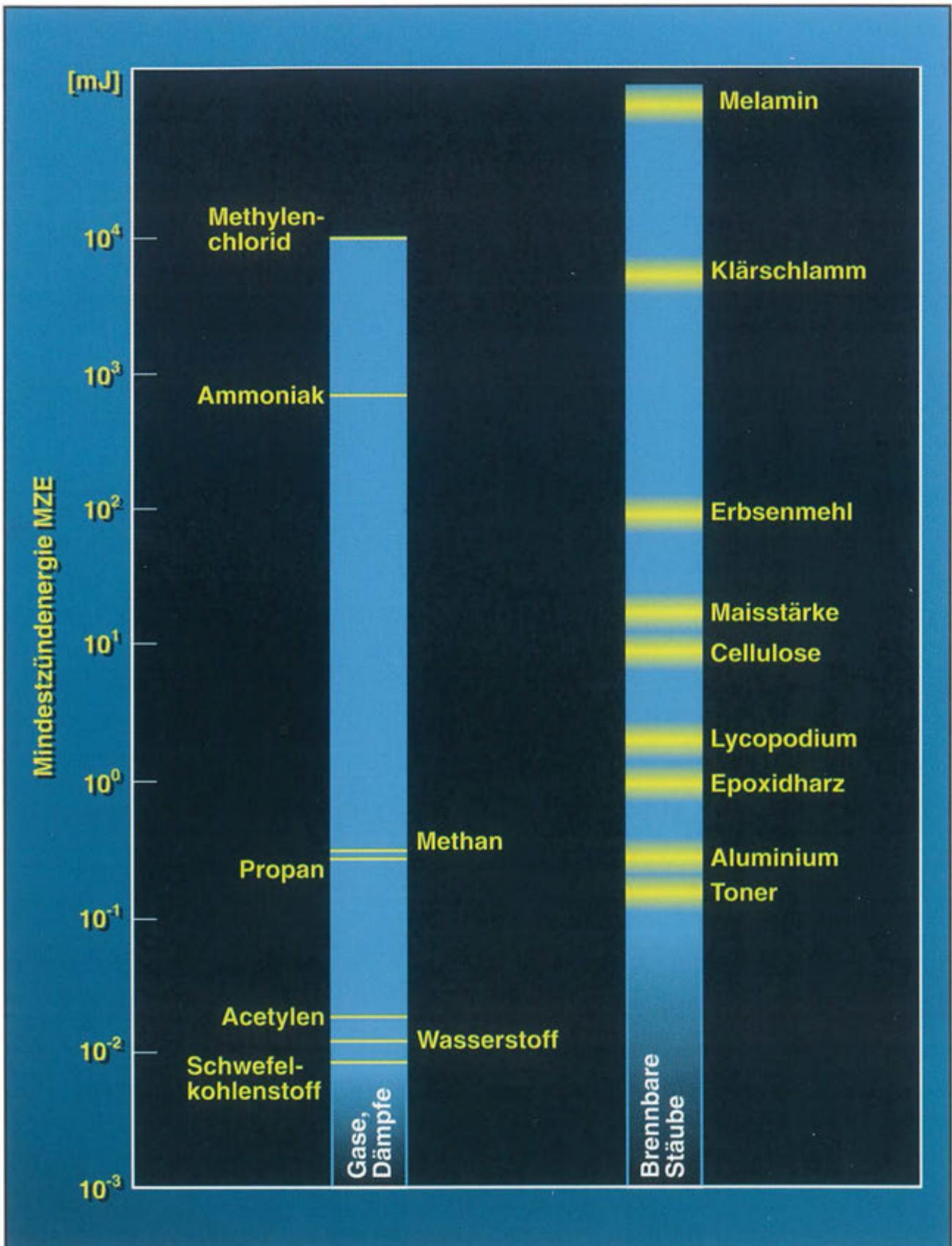


Abb. 10: Mindestzündenergie: Vergleich Brenngase/brennbare Stäube
 (Die Mindestzündenergien der aufgeführten Stäube können je nach Staubzustand z.B. Korngrösse, Feuchte deutlich von den dargestellten Werten abweichen.)

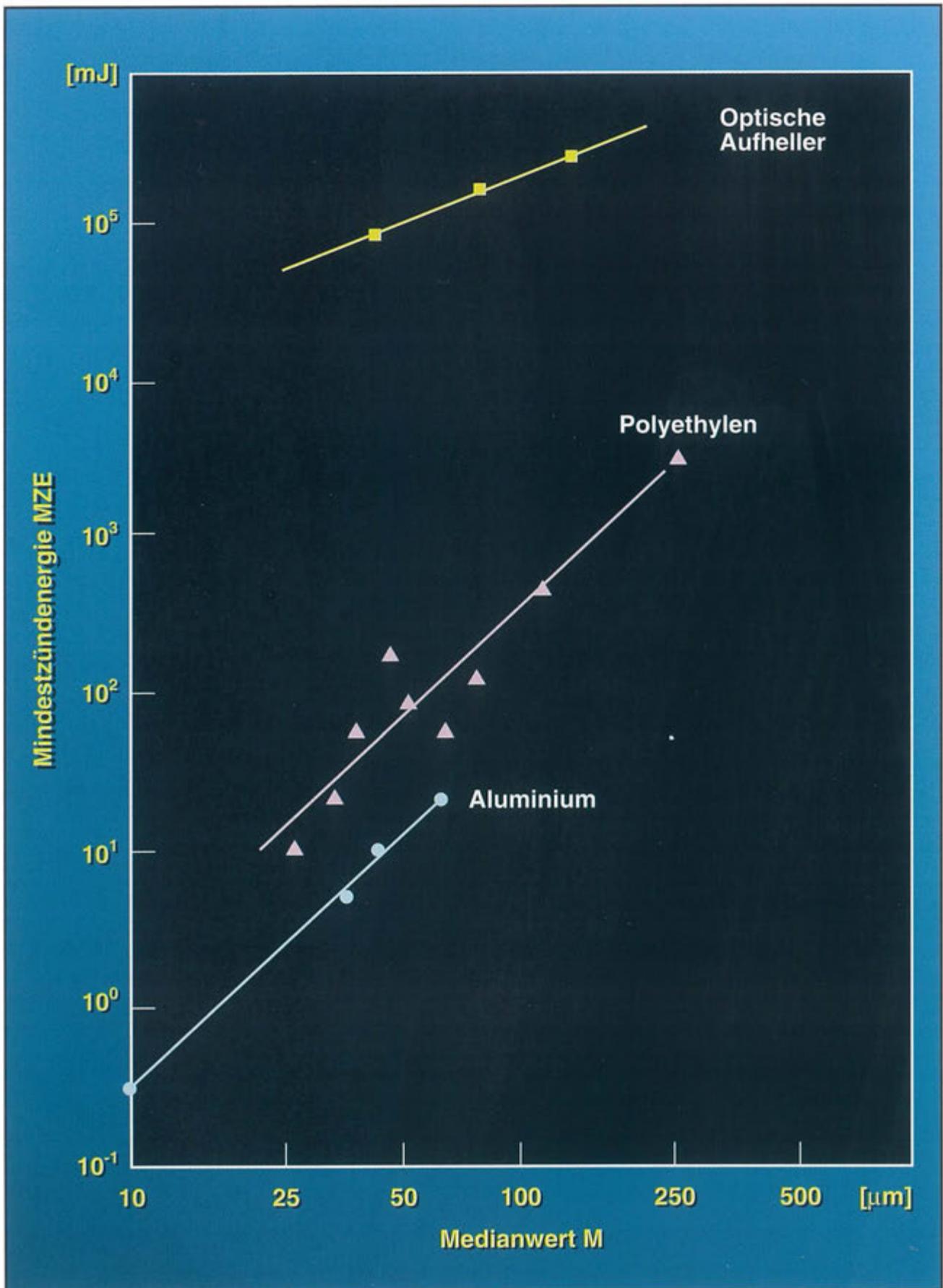


Abb. 11: Brennbare Stäube: Zusammenhang zwischen Medianwert und Mindestzündenergie

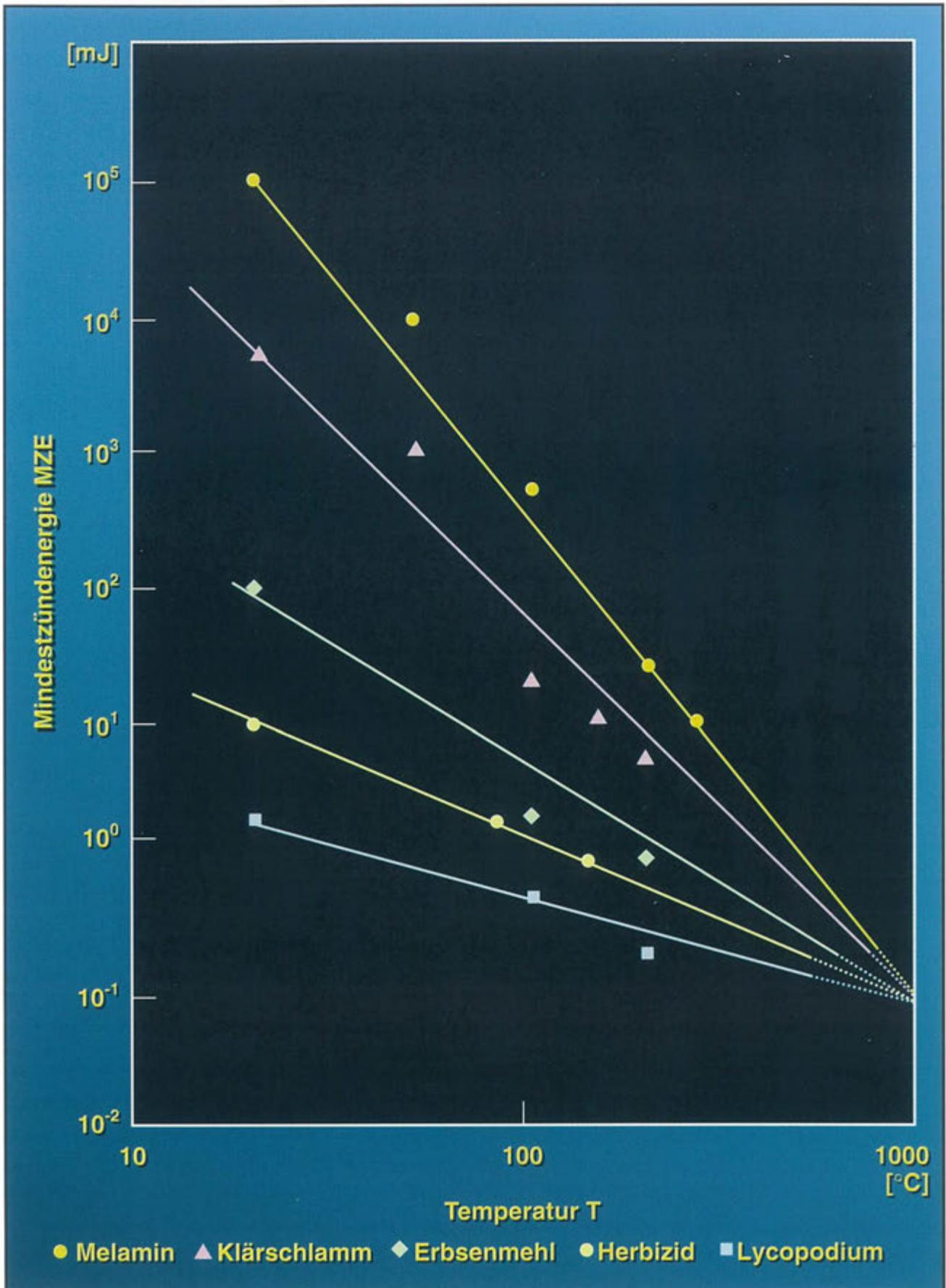


Abb. 12: Einfluss der Temperatur auf die Mindestzündenergie von brennbaren Stäuben

Die Mindestzündenergie wird wesentlich beeinflusst von der Korngröße bzw. der Korngrößenverteilung - die näherungsweise vom Medianwert beschrieben wird (Abb. 11) - von der Temperatur (Abb. 12) und von der Produktfeuchte (H_2O) (Abb. 13). Die zum Ermitteln der Mindestzündenergie benutzte zeitlich gedehnte Kondensator-entladung ist zwar wirksamer als die rein kapazitive Entladung, es gibt jedoch Stäube, die sich durch rein kapazitive Entladungen genauso leicht entzünden lassen.

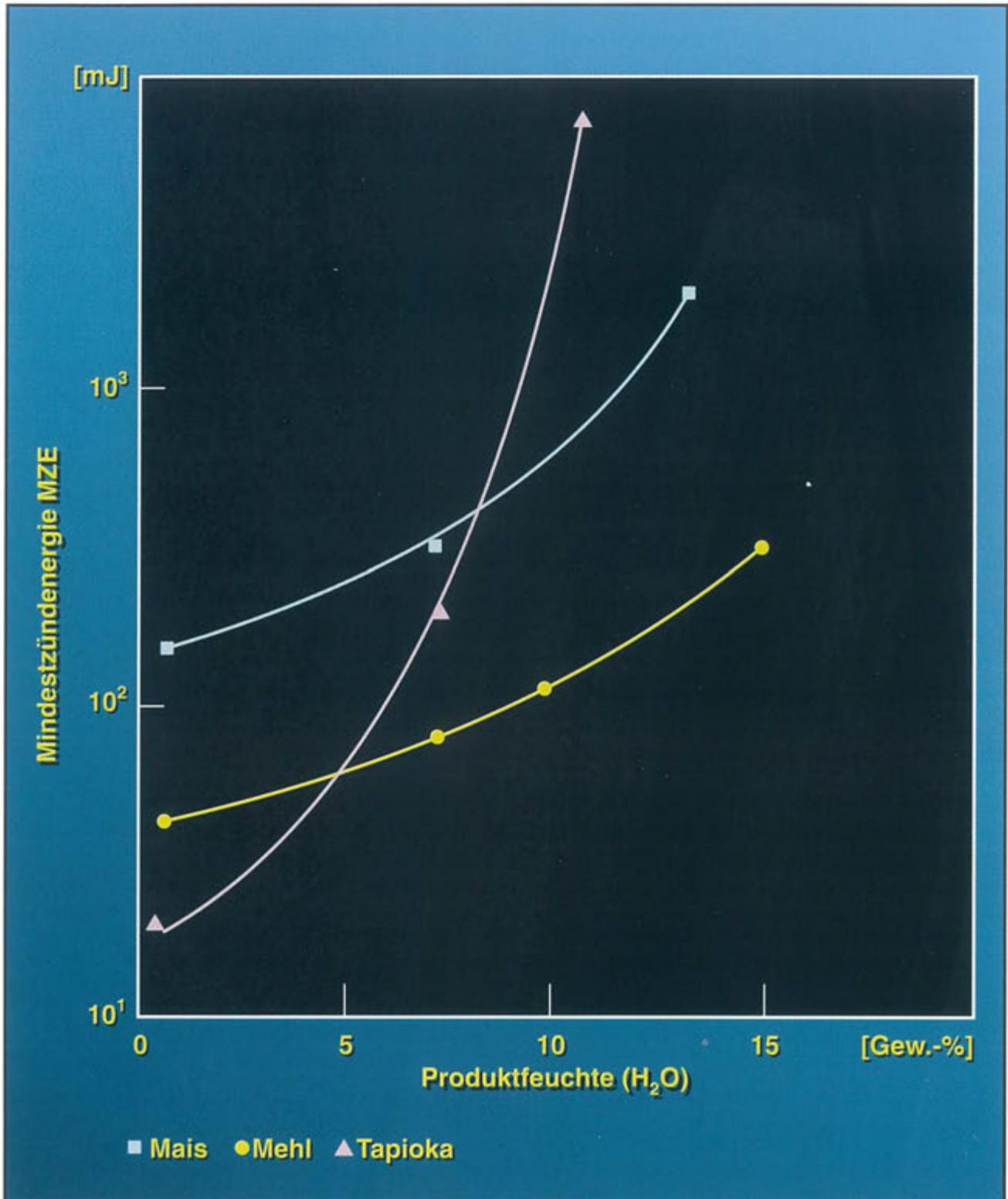


Abb. 13: Einfluss der Produktfeuchte (H_2O) auf die Mindestzündenergie

Ferner hat sich gezeigt, dass sich einige Stäube bereits bei einer Energie von unter 3 mJ entzünden lassen. Dies bedeutet, dass für solche Stäube das Entzünden durch Büschelentladungen nicht ganz auszuschliessen ist (Tabelle 3).

Im Hinblick auf die verschiedenen elektrostatischen Entladungsformen (Abb. 14.1 bis 14.5), [11] ist festzustellen, dass

- Funkenentladungen über die ermittelte Mindestzündenergie zu beurteilen sind,
- Gleitstielbuschelentladungen dort wirksam sein können wo die Mindestzündenergie des Staubes bis zu 1 J beträgt,
- Schuttkegelentladungen in die Überlegungen einbezogen werden müssen, wenn hochisolierendes Grobgut (Durchgangswiderstand $> 10^{10} \Omega \cdot m$) und Feingut zusammen gehandhabt werden.

Das Vermeiden von wirksamen Zündquellen kann nur im Zusammenhang mit der Betrachtung der sicherheitstechnischen Kenngrössen der brennbaren Stäube beurteilt werden, wobei der Mindestzündenergie und der Mindestzündtemperatur eine besondere Bedeutung zukommen.

Art der Entladung	Wirksamkeit als Zündquelle für Gemische mit Luft von		
	Wasserstoff, Acetylen usw. MZE ≤ 0.025 mJ	Lösemittel-dämpfen MZE > 0.025 mJ	trockenen brennbaren Stuben MZE > 1 mJ
Funke	+	+	+
Büschel	+	+	(-) ¹⁾
Gleitstielbuschel	+	+	+
Corona	(+)	-	-
Schüttkegel	+	+	+

1) Entzündung von extrem zundempfindlichen Stuben kann nicht mit Sicherheit ausgeschlossen werden

Tab. 3: Zündwirksamkeit verschiedener elektrostatischer Entladungsarten [11]



Abb. 14.1: Funkenentladung (Foto)

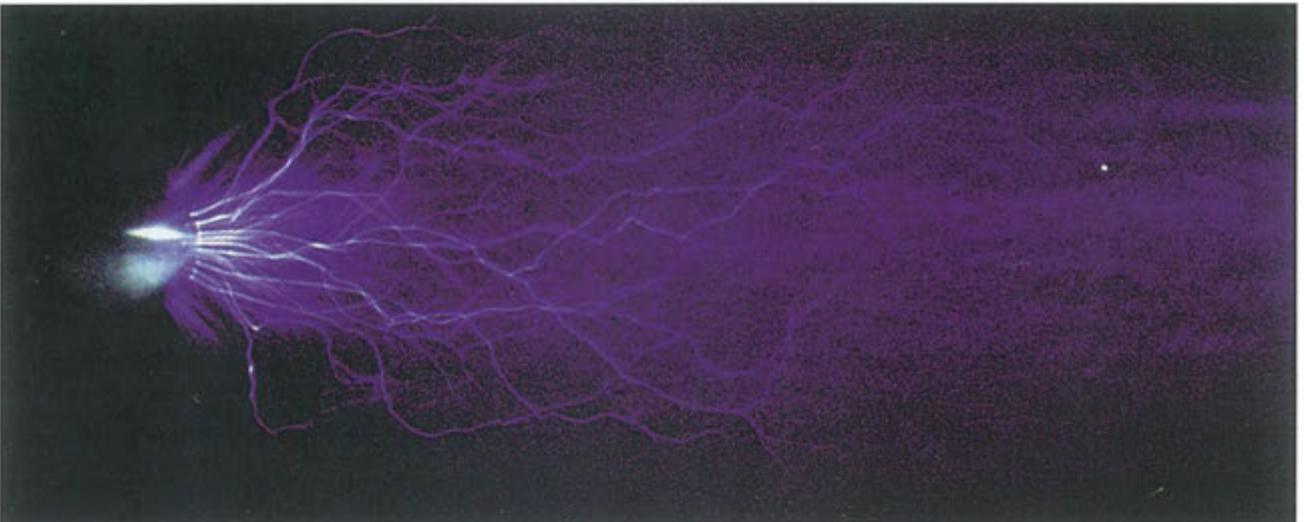


Abb. 14.2: Büschelentladungen (Foto)

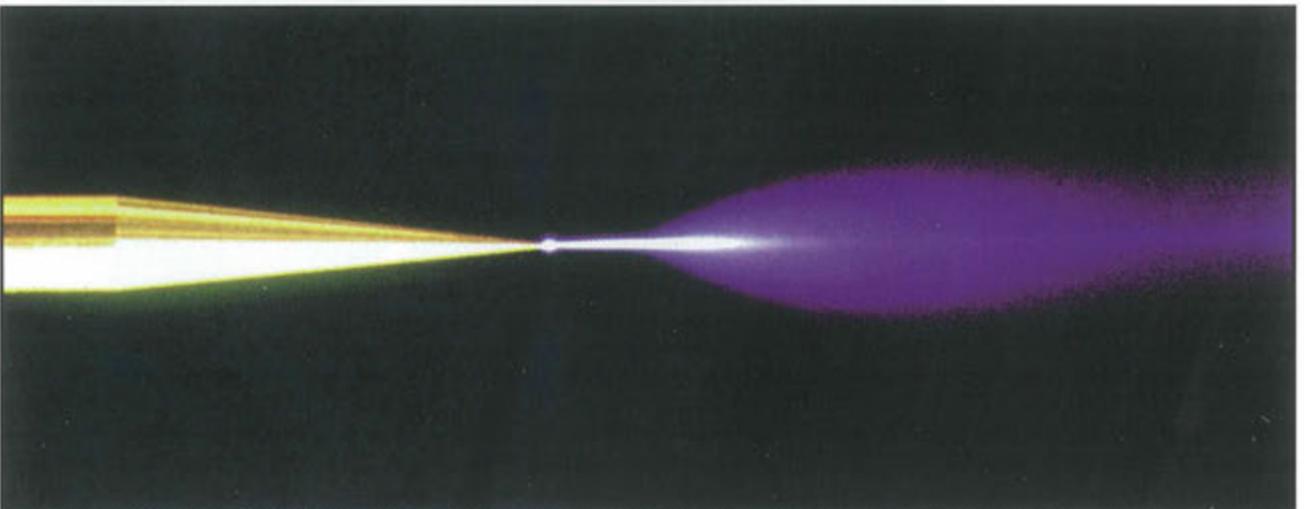


Abb. 14.3: Coronaentladung (Foto)

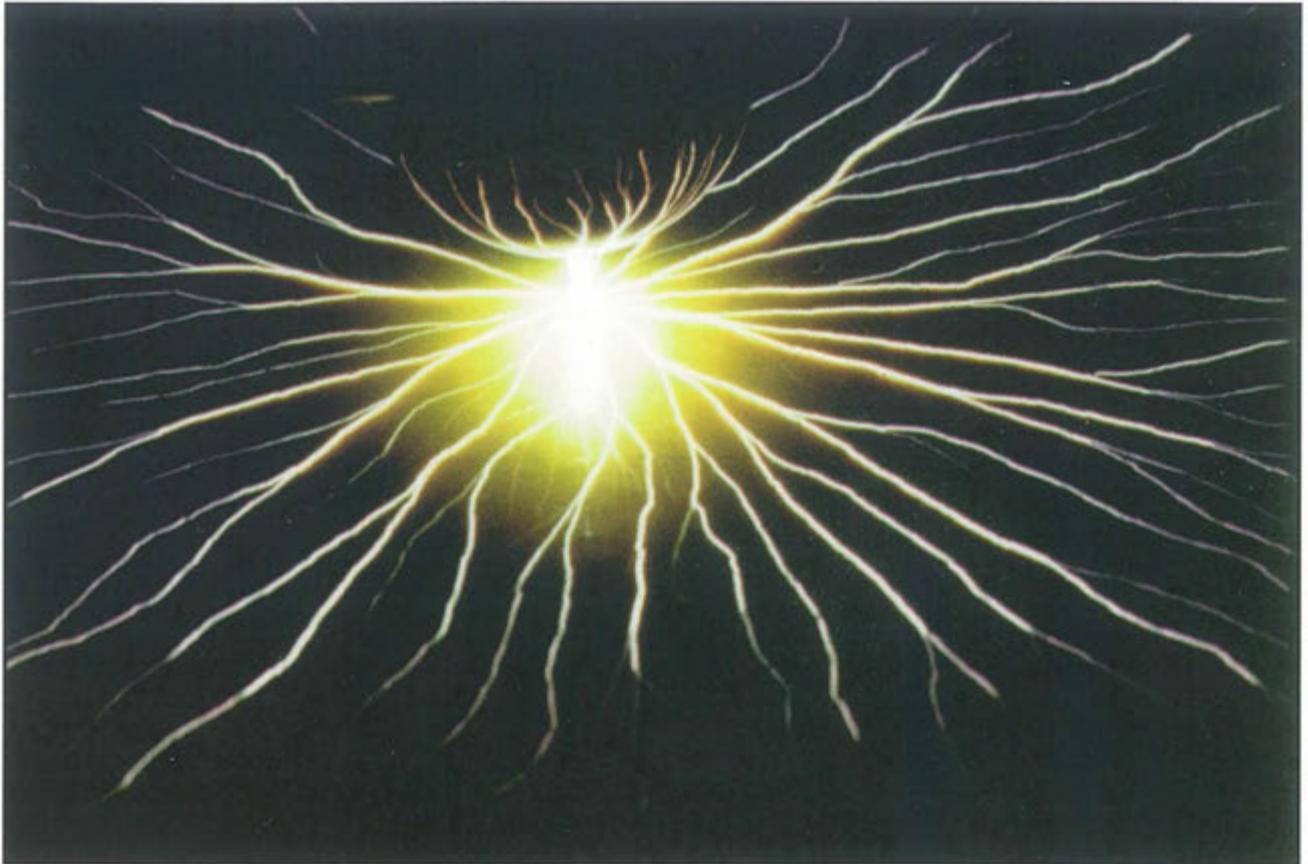
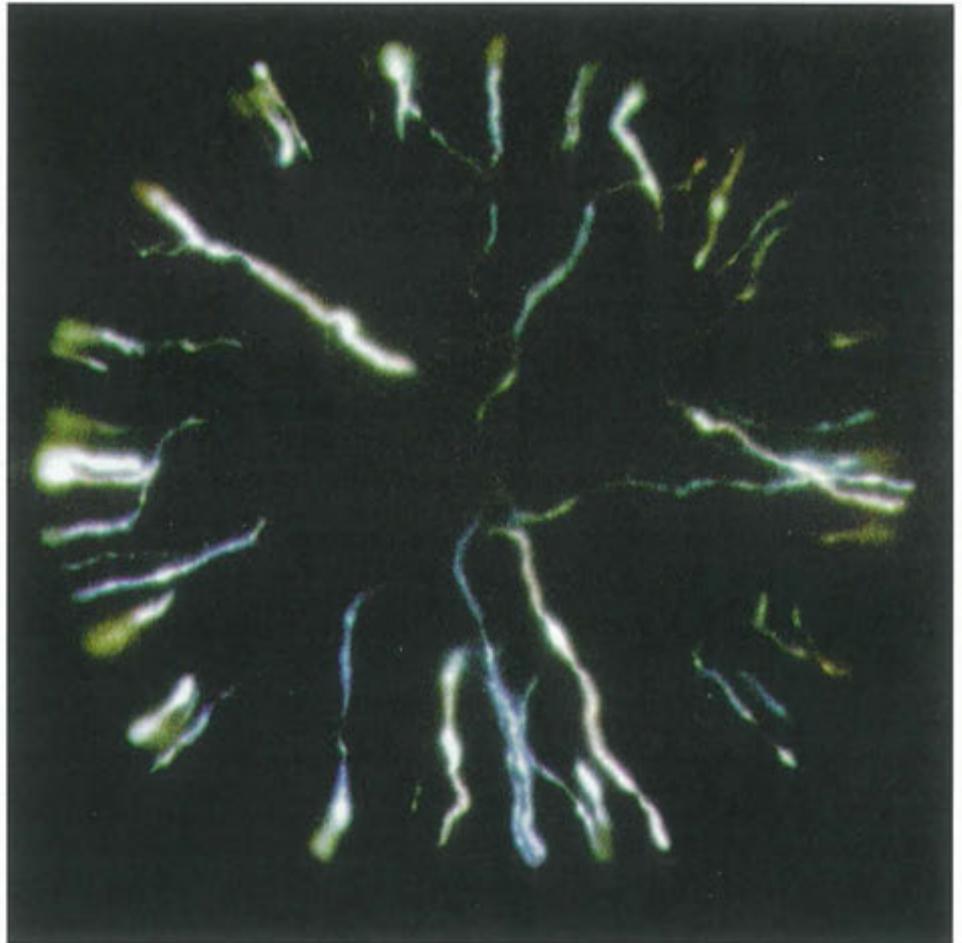


Abb. 14.4: Gleitstielbüschelentladung (Foto)



*Abb. 14.5:
Schüttkegel-
entladungen (Foto)*

3 Konstruktiver Explosionsschutz

Konstruktive Explosionsschutzmassnahmen sind erforderlich, wenn das Schutzziel, Explosionen zu vermeiden durch Massnahmen des vorbeugenden Explosionsschutzes nicht oder nicht mit hinreichender Sicherheit erreicht werden kann. Durch die Anwendung konstruktiver Schutzmassnahmen wird das Auftreten einer Explosion nicht verhindert. Deshalb müssen alle gefährdeten Anlageteile explosionsfest gebaut werden, so dass sie dem im Explosionsfall zu erwartenden Explosionsüberdruck standhalten.

Die in den einschlägigen Richtlinien [13], [14], [15] beschriebenen konstruktiven Explosionsschutzmassnahmen basieren auf dem in geschlossenen Behältern nach einem vereinbarten Verfahren gemessenen maximalen Explosionsüberdruck. In der Praxis kann jedoch dieser Wert sowohl unterschritten (z.B. bei grösserer Körnung, Abweichung von der optimalen Staubkonzentration, erhöhter Temperatur, erhöhtem Wassergehalt des Staubes oder Teilbefüllung der zu schützenden Apparatur mit explosionsfähigem Staub/Luft-Gemisch) als auch überschritten (z.B. bei erhöhtem Vordruck oder erhöhter Sauerstoffkonzentration) werden. Ist der zu erwartende Explosionsüberdruck höher als der maximale Explosionsüberdruck, so muss bei der Projektierung dieser zu erwartende Explosionsüberdruck zugrunde gelegt werden. Ist der zu erwartende Explosionsüberdruck niedriger als der maximale Explosionsüberdruck, so kann sowohl der maximale Explosionsüberdruck, als auch der entsprechende zu erwartende Explosionsüberdruck verwendet werden.

Folgende konstruktive Schutzmassnahmen können angewendet werden:

- explosionsfeste Bauweise für den zu erwartenden Explosionsüberdruck,
- Explosionsdruckentlastung,
- Explosionsunterdrückung.

Ausserdem muss die Übertragung einer Explosion aus durch konstruktive Schutzmassnahmen geschützten Anlagenteilen in ungeschützte/geschützte Anlagenteile - oder in Arbeitsräume hinein verhindert werden. Man spricht in diesem Zusammenhang von

- explosionstechnischer Entkopplung.

Diese Entkopplung hat so nah wie möglich an der geschützten Apparatur zu erfolgen. Die Anwendung der genannten Schutzmassnahmen erfordert im Ereignisfall eine Abschaltung der Produktzu- und -abführung und der Aspiration.

Welche dieser Massnahmen für eine ganze Anlage oder für einzelne Anlagenteile angewendet werden, muss von Fall zu Fall entschieden werden. Immer aber müssen alle Teile der Anlage, die im Explosionsfall einem mehr oder weniger heftigen Druckstoss ausgesetzt sind, so gebaut sein, dass sie diesem Druckstoss ausreichend sicher standhalten.

3.1 Explosionsfeste Bauweise

Zum Schutz gegen die Druckwirkungen von Explosionen besteht die Möglichkeit, Behälter und Apparate für den zu erwartenden Explosionsüberdruck entsprechend explosionsfest auszulegen [13]. Hierbei können zusätzliche konstruktive Explosionsschutzmassnahmen - mit Ausnahme der Explosionsentkopplung - entfallen. Es ist jedoch zu beachten, dass auch die angeschlossenen Armaturen dem Explosionsüberdruck standhalten müssen. Bei der explosionsfesten Bauweise unterscheidet man die explosionsdruckfeste und die explosionsdruckstossfeste Bauweise.

Explosionsdruckfest ist ein Behälter oder Apparat, der dem zu erwartenden Explosionsüberdruck - auch mehrfach - ohne bleibende Verformung standhält.

Explosionsdruckstossfeste Behälter oder Apparaturen sind so gebaut, dass sie dem zu erwartenden Explosionsüberdruck standhalten ohne aufzureissen; dabei dürfen jedoch bleibende Verformungen auftreten. Hier wird also eine höhere Ausnutzung der Materialfestigkeit zugestanden.

Für das Auslegen von explosionsfesten Behältern werden soweit wie möglich rotations-symmetrische Bauteile (d.h. zylindrische oder kegelförmige Mäntel oder Klöpferböden) verwendet.

Nach einer Explosion ist in jedem Fall - auch bei nicht sichtbarer Verformung - zu prüfen, ob die verbleibende Festigkeit den Anforderungen weiterhin genügt.

3.2 Explosionsfeste Bauweise in Verbindung mit Explosionsdruckentlastung

Der Begriff Explosionsdruckentlastung umfasst im weitesten Sinne alle Massnahmen, die dazu dienen, im Falle einer Explosion den ursprünglich geschlossenen Behälter oder Apparat in eine ungefährliche Richtung zu öffnen, um den Aufbau eines unzulässig hohen Druckes im Innern zu verhindern.

Die Anwendung der Schutzmassnahme Explosionsdruckentlastung setzt also eine bestimmte Festigkeit des Behälters oder der Apparatur voraus, die im Sinne der Ausführungen des vorangegangenen Abschnittes explosionsfest auszuführen ist [14]. Für die Berechnung ist jedoch gegenüber dem im geschlossenen Behälter oder Apparat zu erwartenden Explosionsüberdruck (z.B. den maximalen Explosionsüberdruck) ein reduzierter Explosionsüberdruck zugrunde zu legen (Abb. 15). Die Druckreduzierung wird durch das Öffnen entsprechend dimensionierter Entlastungseinrichtungen, wie Berstscheiben oder Explosionsklappen, erreicht.

Beim Ansprechen der Druckentlastung ist mit dem Austreten von Verbrennungsgasen, und Staub, sowie mit umfangreichen Flammerscheinungen und mit Druckentwicklung ausserhalb des zu schützenden Behälters oder Apparates zu rechnen. Dabei kann es bei Stäuben mit niedrigen K_{St} -Werten durchaus zu heftigeren Aussenwirkungen kommen als bei Stäuben mit höheren K_{St} -Werten, wenn infolge der langsameren Verbrennung grössere Mengen unverbrannten Staubes ausgeworfen werden (Abb. 16, 17 und 18). Dem Personenschutz ist deshalb im Entlastungsbereich besondere Beachtung zu schenken.

Wird die genannte Schutzmassnahme an Behältern oder Apparaten in Arbeitsräumen angewendet, so ist es notwendig, die Druckentlastung über eine Abblaseleitung ins Freie zu führen. Es muss in diesem Fall damit gerechnet werden, dass der reduzierte Explosionsüberdruck in dem zu schützenden Behälter oder Apparat erhöht wird.

Bei der Dimensionierung der Schutzmassnahme Explosionsdruckentlastung sind im übrigen die einschlägigen Richtlinien [14] zu beachten.

Bei der Schutzmassnahme Explosionsdruckentlastung ist mit Rückstosskräften zu rechnen.

Die Schutzmassnahme Explosionsdruckentlastung ist unzulässig, wenn durch ausgeworfene Stoffe Gefährdungen auftreten können (z.B. beim Handhaben giftiger oder ätzender Stoffe).

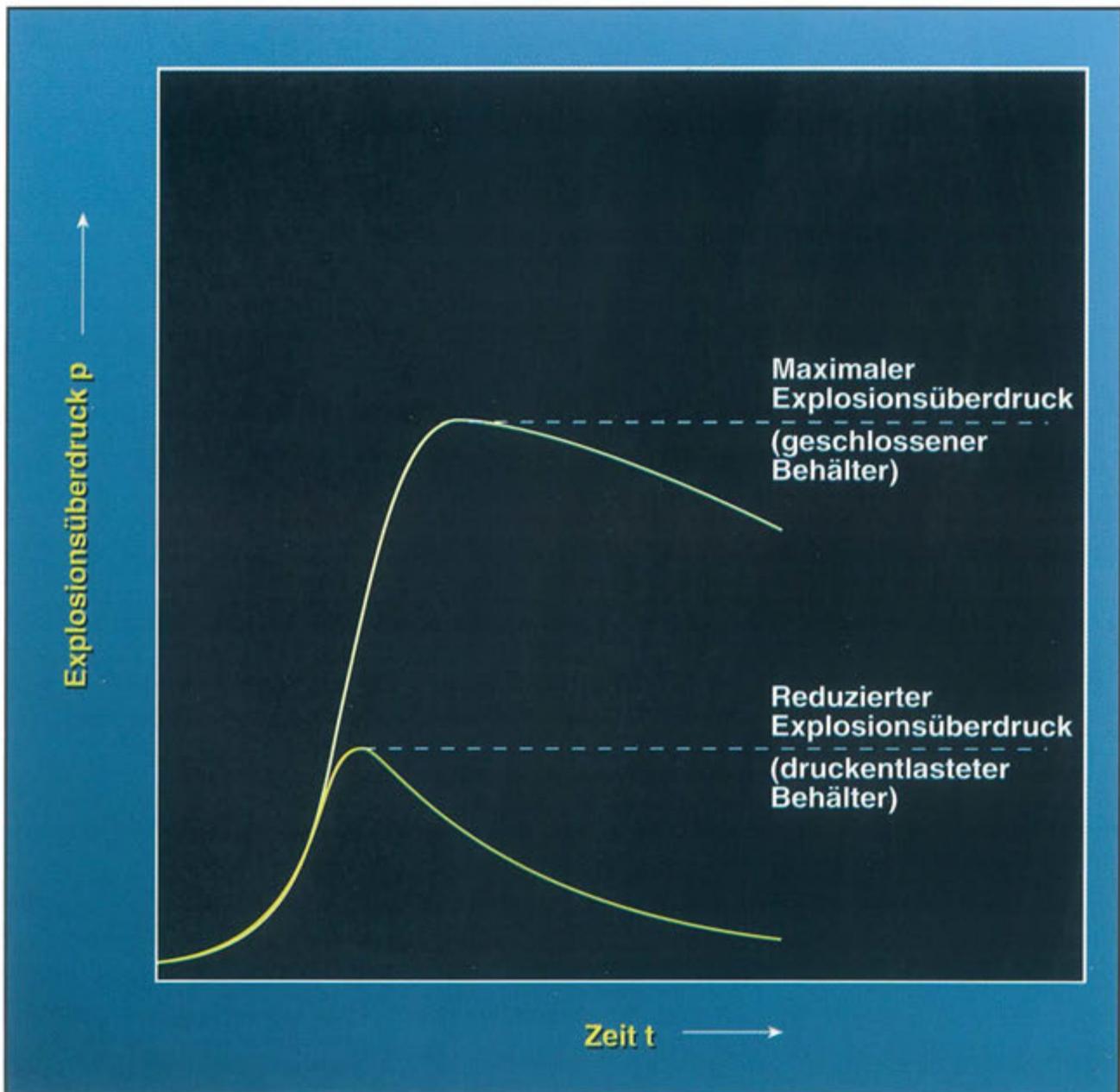


Abb. 15: Ablauf einer Staubexplosion ohne und mit der Schutzmassnahme Explosionsdruckentlastung

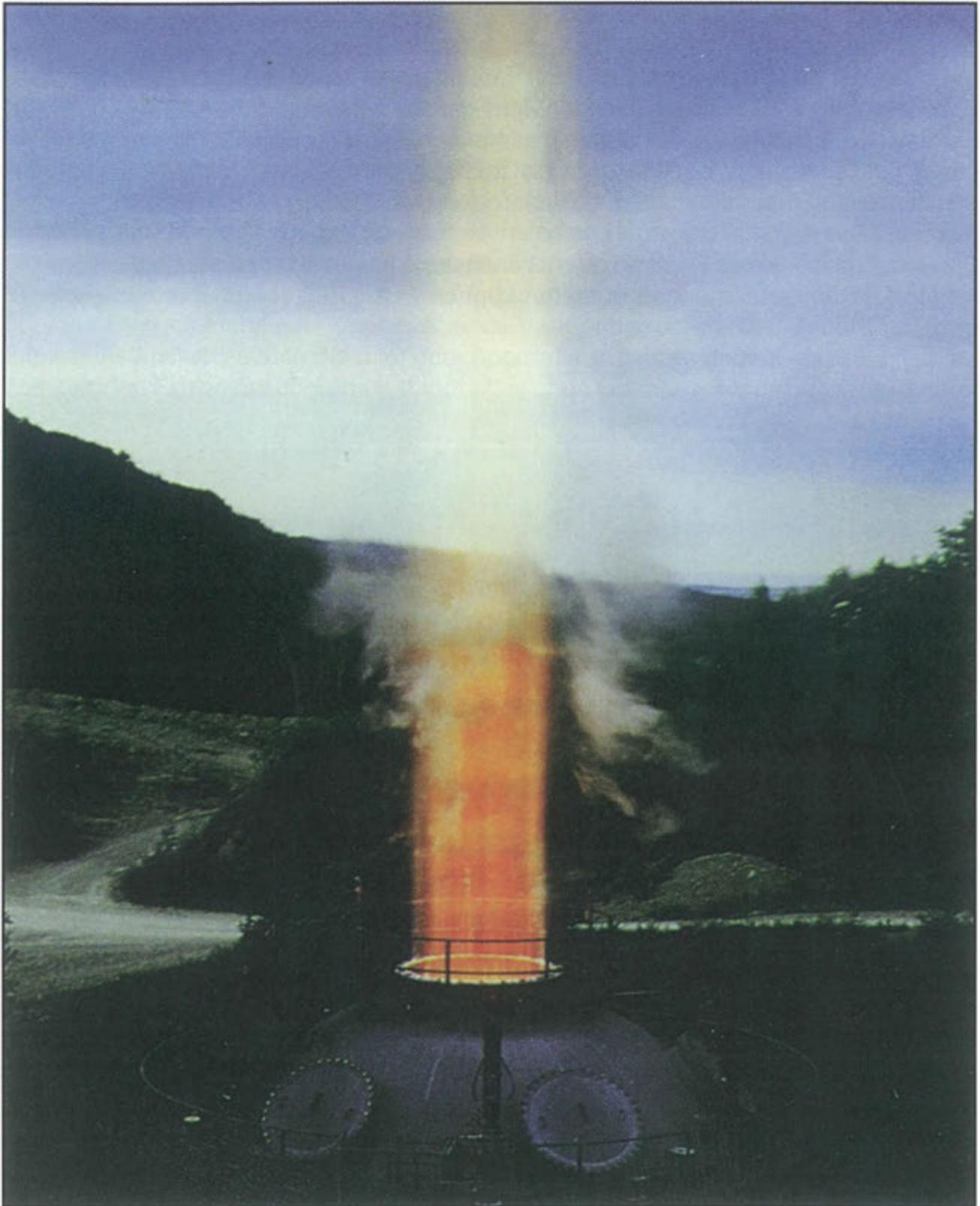


Abb. 16: Druckentlastung eines 250-m³-Behälters

Schnell ablaufende Staubexplosion (K_{St} -Wert = 300 bar · m · s⁻¹) in einem Behälter mit kleiner Entlastungsfläche führt zwar zu einem hohen reduzierten Explosionsüberdruck, jedoch neben einem langen Flammenstrahl nur zu einer relativ geringen Druckäusserung ausserhalb des Behälters (s. auch Abb. 18).



Abb. 17: Druckentlastung eines 250-m³-Behälters

Langsamer ablaufende Staubexplosion (K_{St} -Wert = 200 bar · m · s⁻¹) in einem grossflächig entlasteten Behälter ergibt zwar einen relativ niedrigen Wert für den reduzierten Explosionsüberdruck, führt aber zu einer Sekundärexplosion ausserhalb des Behälters mit nicht unerheblichen Druckwirkungen (s. auch Abb. 18).

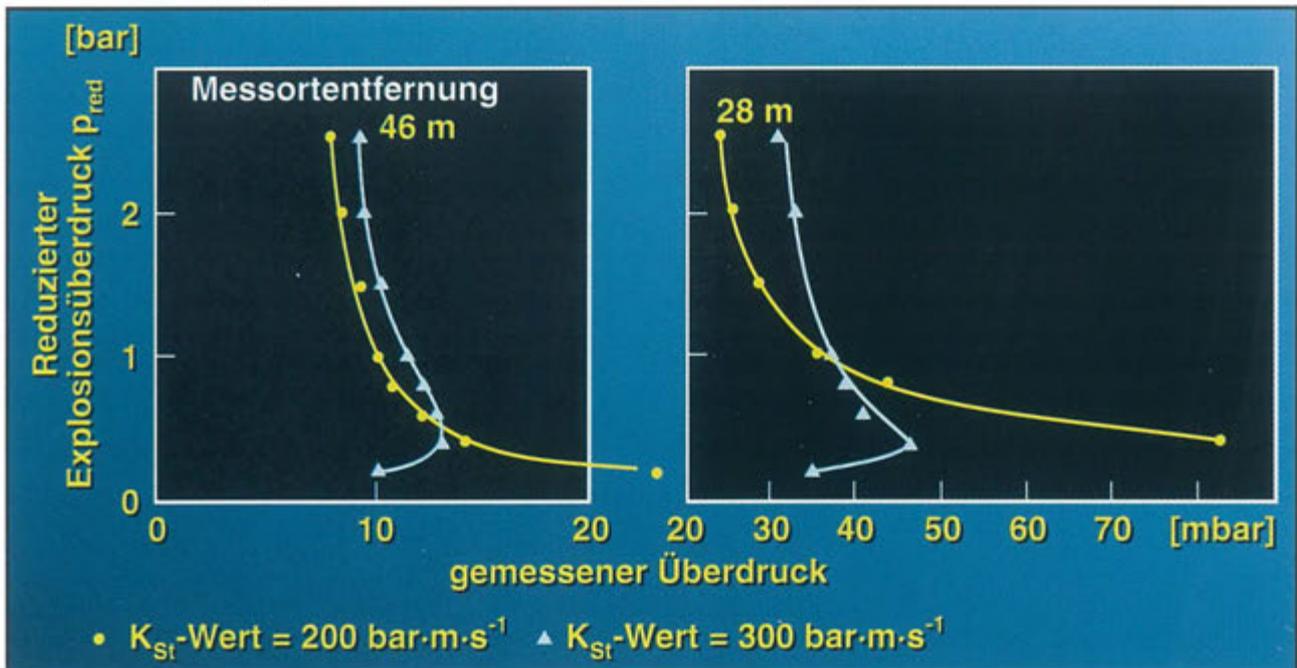


Abb. 18: Druckentlasteter 250-m³-Behälter. Ergebnis der Druckmessung in der freien Atmosphäre

3.3 Explosionsfeste Bauweise in Verbindung mit Explosionsunterdrückung

Explosionsunterdrückungsanlagen sind Einrichtungen, die - wie die Explosionsdruckentlastung - den Aufbau eines unzulässig hohen Druckes bei Staubexplosionen in Behältern verhindern. Sie engen den Wirkungsbereich von Explosionsflammen bereits im Anfangsstadium der Explosion ein.

Die Anwendung dieser Schutzmassnahme setzt deshalb eine explosionsfeste Bauweise der Apparatur voraus im allgemeinen für einen reduzierten Explosionsüberdruck von $p_{red} < 1 \text{ bar}$ [15].

Explosionsunterdrückungsanlagen bestehen aus einem die anlaufende Explosion erkennenden Detektorsystem und den unter Druck stehenden Löschmittelbehältern, deren Ventile durch das Detektorsystem betätigt werden. Der Löschmittelinhalt wird in kurzer Zeit in den zu schützenden Behälter entleert und gleichmässig verteilt.

Explosionsunterdrückungsanlagen sollen sich selbst überwachen und bei Netzausfall über einen bestimmten Zeitraum ihre Funktionsfähigkeit beibehalten.

Explosionsunterdrückungssysteme sind in der Regel nur wirksam bei Stäuben mit einem Explosionsüberdruck $p_{max} < 10 \text{ bar}$ und einem $K_{St} < 400 \text{ bar} \cdot \text{m} \cdot \text{s}^{-1}$. Die Wirksamkeit der eingesetzten Löschmittel für die jeweilige Staubart muss nachgewiesen sein (vgl. IVSS-Broschüre: *Explosionsunterdrückung* [16]).

3.4 Explosionstechnische Entkopplung

Überall dort, wo staubexplosionsgefährdete Behälter und Apparate in Anlagen durch Rohrleitungen verbunden sind, besteht die Gefahr, dass bei einer Staubexplosion an einer Stelle im System eine Übertragung durch diese Rohrleitungen an andere Stellen gegeben ist.

Bei dieser Explosionsübertragung kann es vorkommen, dass - bedingt durch Verdrängungs-, Turbulenz- und Vorkompressionseffekte - entweder überhöhte Explosionsüberdrücke oder sogar Detonationen auftreten. Um eine solche Übertragung zu unterbinden, kann es sinnvoll sein, für den Explosionsfall die Abtrennung bestimmter Anlagenteile durch geeignete Vorrichtungen vorzusehen, d.h. die Anlage explosionstechnisch zu entkoppeln [17].

Der Einsatz von solchen Entkopplungseinrichtungen ist immer dann notwendig, wenn

- in einer Anlage der ungeschützte Teil vom geschützten Teil sicher getrennt werden muss

oder wenn

- Behälter durch längere Rohre verbunden sind, so dass mit Flammenstrahlzündung bzw. mit hohen Druckspitzen zu rechnen ist. Dabei ist es besonders problematisch, wenn sich ein grosser Behälter in einen kleinen Behälter entlasten kann oder wenn Behälter höherer Festigkeit mit solchen niedrigerer Festigkeit verbunden sind.

Die Entkopplung kann - je nach Einsatzbereich - z.B. durch Zellenradschleusen, Löschmittelsperren, Explosionsschutzorgane oder Entlastungsschlote vorgenommen werden.

3.4.1 Zellenradschleuse

Erfolgt der Staubaustrag aus explosionsgeschützten Behältern oder Apparaten über eine Zellenradschleuse, so kann diese - unter Berücksichtigung bestimmter Konstruktionsmerkmale - wie eine mechanische Sperre gegenüber Staubexplosionen wirken. Zellenradschleusen dürfen nur eingesetzt werden, wenn ihre Zünddurchschlagsicherheit und mechanische Druckbelastbarkeit nachgewiesen sind.

Die Zünddurchschlagsicherheit ist erfahrungsgemäss gegeben, wenn drei Stege je Seite im Eingriff sind, die Stege bzw. Abstreifer eine Dicke von mindestens 2 mm aufweisen und aus Metall gefertigt sind sowie die Spaltweite zwischen Rotor und Gehäuse $\leq 0,2$ mm ist. Für organische Stäube und Netzschwefel sind - bei sonst gleichen Bedingungen - nur zwei Stege erforderlich.

Wenn in Sonderfällen nur ein Steg im Eingriff sein kann, dann müssen dieselben Spaltweiten wie bei Brenngasen eingehalten werden. Sowohl bei Gasen als auch bei Stäuben hängen die Spaltweiten von der Mindestzündtemperatur und der Mindestzündenergie ab.

Im Explosionsfall muss die Schleuse durch ein Detektorsystem sofort stillgesetzt werden, um sicherzustellen, dass kein brennender oder glimmender Staub weitergeführt wird.

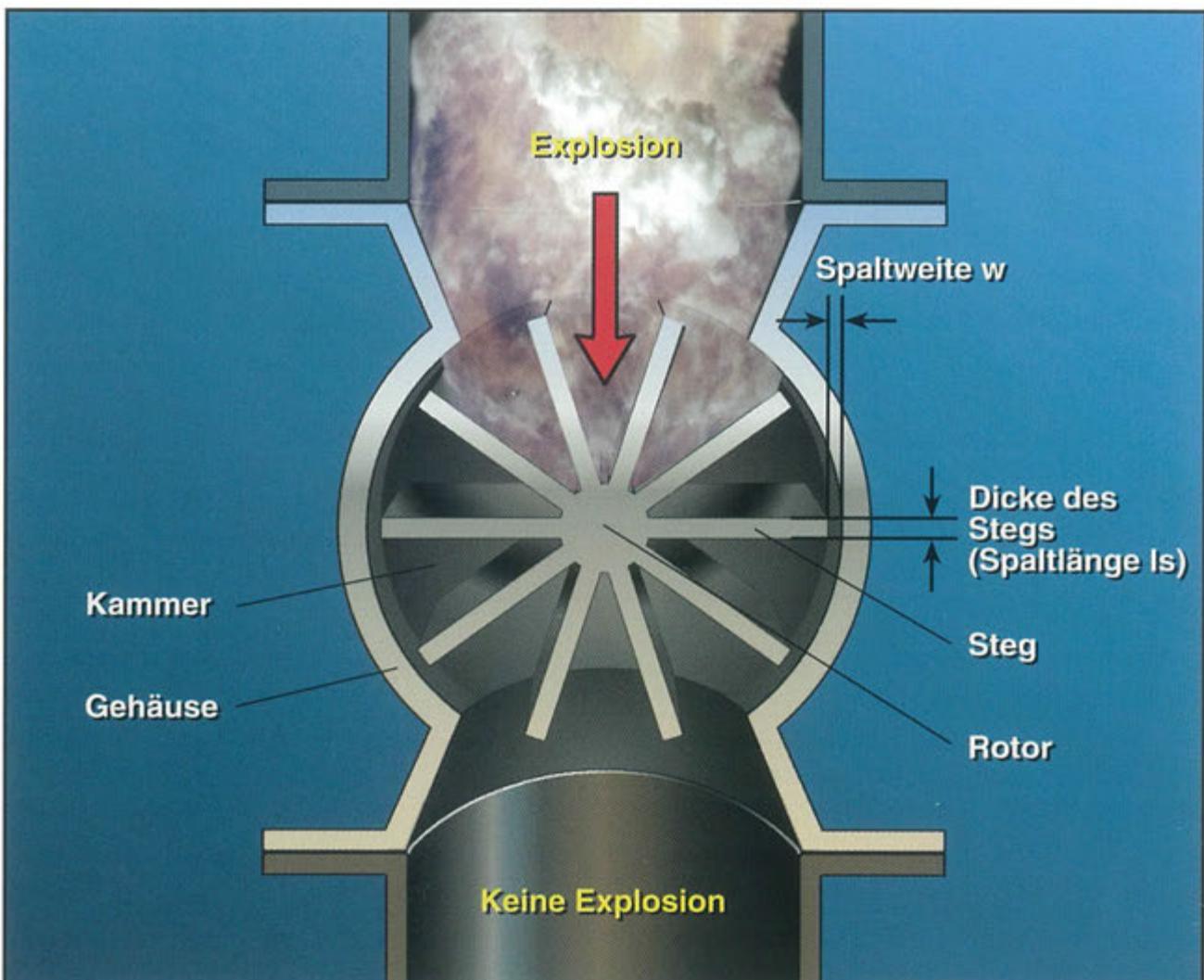


Abb. 19: Zellenradschleuse

3.4.2 Löschmittelsperre

Bei der Löschmittelsperre wird die Flammenfront einer Explosion durch einen Detektor erkannt, der über einen Verstärker die Ventile von Löschmittelbehältern öffnet. Das Löschmittel - vorzugsweise Löschpulver - tritt durch Expansion des Treibmittels (z.B. Stickstoff) innerhalb einiger Millisekunden in die Rohrleitung ein, erzeugt unmittelbar vor der Flamme eine dichte Löschmittelwolke und löscht die Flamme (Abb. 20).

Zwischen dem Einbauort des Detektors und dem Einbauort der Löschmittel muss - je nach Explosionsgeschwindigkeit - ein bestimmter Abstand bestehen, damit das Löschmittel im Ereignisfall unmittelbar auf die Explosionsflamme einwirkt.

Der erforderliche Löschmittelbedarf ist abhängig von der Art des brennbaren Staubes, der Nennweite der zu schützenden Rohre und von der zu erwartenden Explosionsgeschwindigkeit an dem Einbauort der Löschmittelsperre. Durch den Einsatz solcher Sperren wird der Rohrquerschnitt nicht vermindert.

Durch den Löschvorgang wird der auftretende Explosionsüberdruck nicht erhöht. Die Festigkeit der zu schützenden Rohrleitung ist daher auf den zu erwartenden oder gegebenenfalls auch auf den reduzierten Explosionsüberdruck abzustimmen.

Löschmittelsperren dürfen nur dann eingesetzt werden, wenn ihre Wirksamkeit nachgewiesen worden ist.

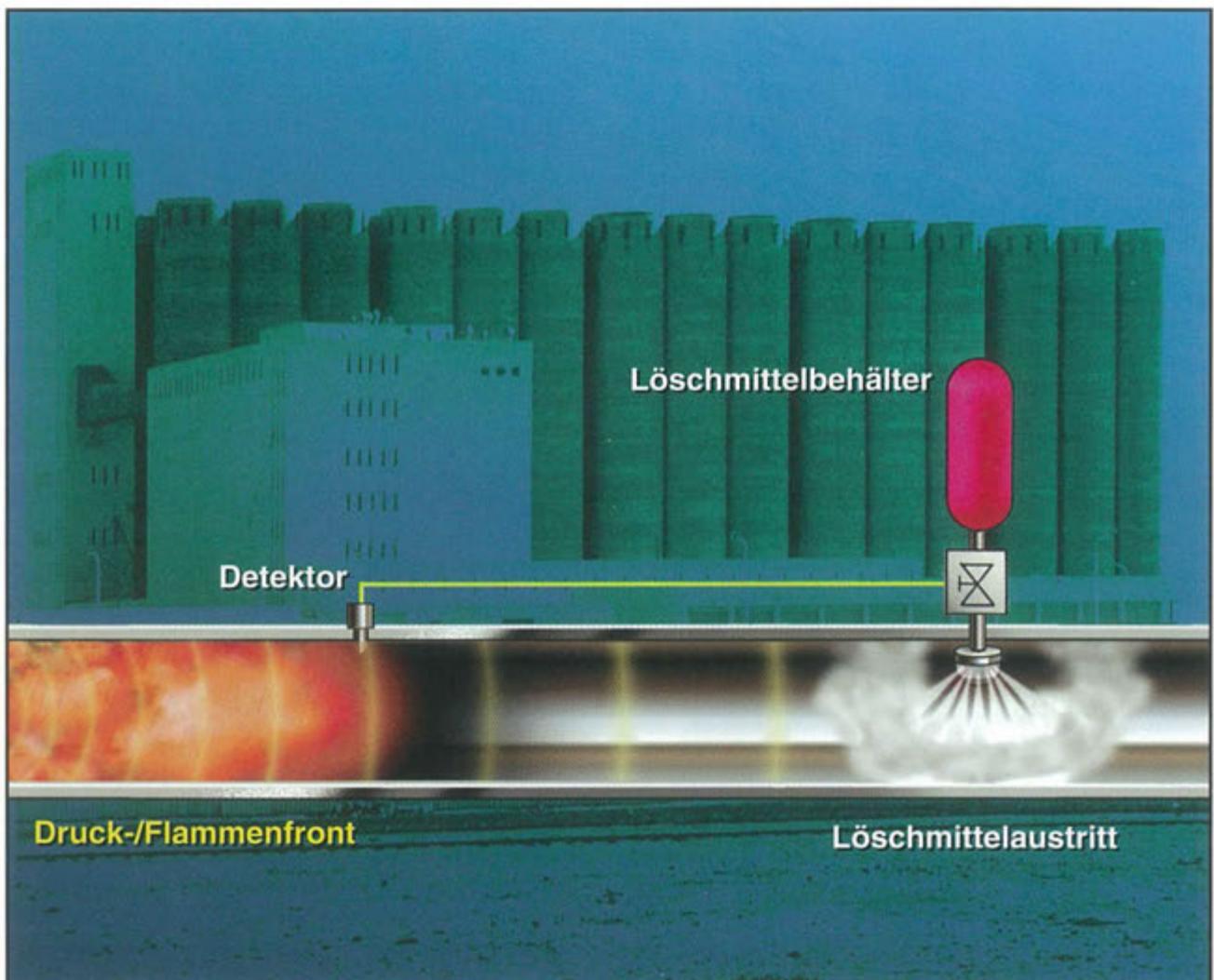


Abb. 20: Automatische Löschmittelsperre

3.4.3 Explosionsschutzschieber/-klappe

Die Anwendung von Explosionsschutzschiebern für das automatische Absperren von Anlagenteilen hat den Vorteil, dass das Sperrelement des Schiebers sich im Normalfall ausserhalb des Rohrquerschnittes befindet. Der Rohrquerschnitt ist frei und kann taschenlos und ohne tote Ecken ausgeführt werden, so dass sich der Staub nicht ablagern kann (Abb. 21)

Die Gehäuse derartiger Schieber sind aus Stahl, Stahlguss oder Aluminiumdruckguss gefertigt, während die Schieberplatte aus hochfestem Material leicht gebaut ist, um kurze Schliesszeiten zu erreichen.

Generell muss ein bestimmter Abstand zwischen dem - eine Explosion erkennenden - Detektor und dem Einbauort des Explosionsschutzschiebers eingehalten werden. Dieser hängt von der Explosionsgeschwindigkeit und der Schliesszeit ab.

Explosionsschutzschieber dürfen nur dann eingesetzt werden, wenn ihre Wirksamkeit (mechanische Belastbarkeit, Schliesszeit, Zünddurchschlagsicherheit) nachgewiesen worden ist.

Obige Ausführungen gelten grundsätzlich auch für Explosionsschutzklappen, jedoch befindet sich in diesem Fall das Sperrelement im Rohrquerschnitt (Abb. 22).

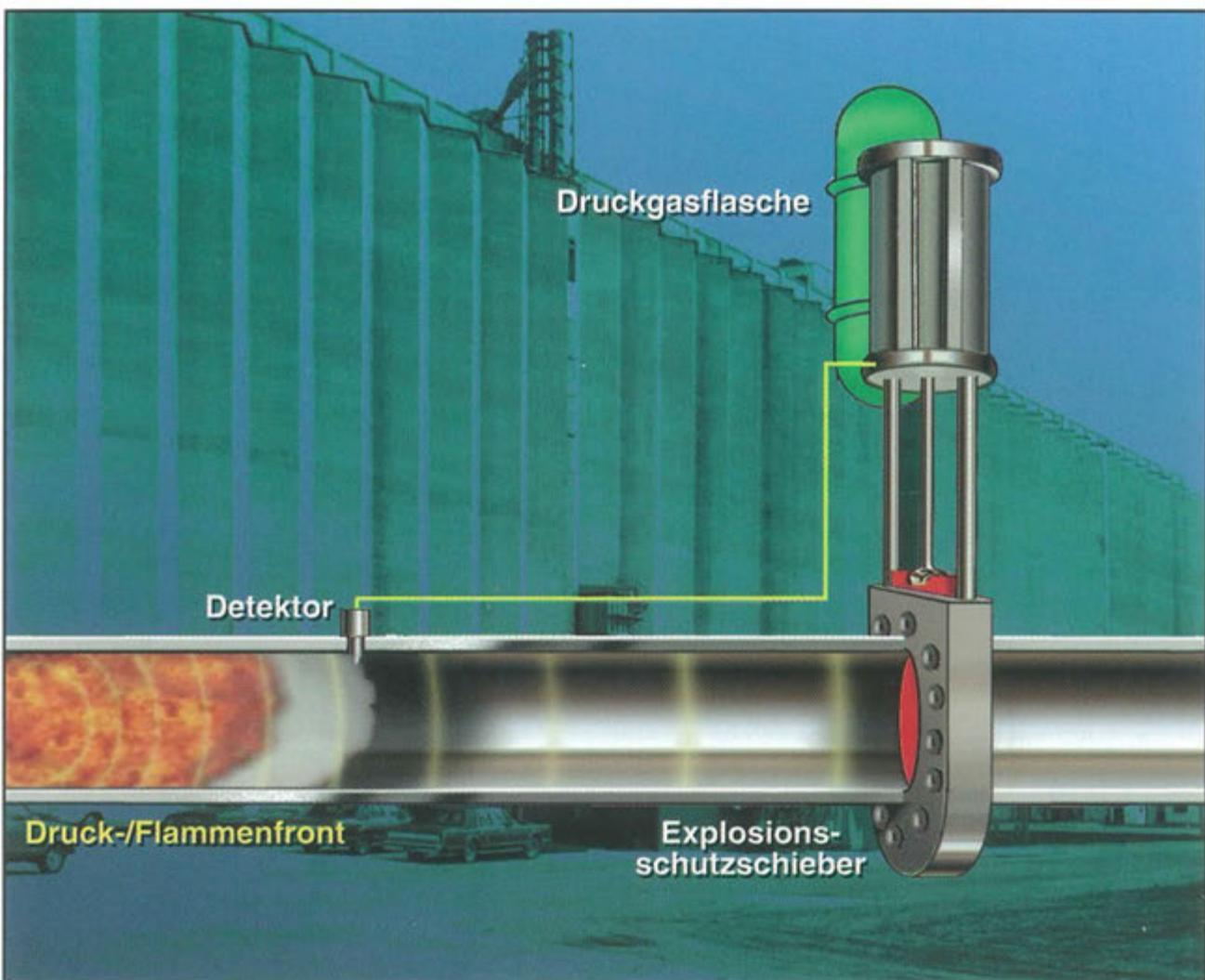


Abb. 21: Explosionsschutzschieber

3.4.4 Explosionsschutzventil

Das Explosionsschutzventil schliesst, wenn in der Rohrleitung eine bestimmte Strömungsgeschwindigkeit überschritten wird. Die Schliessstellung kann nur von Hand entriegelt werden. Die für das Schliessen notwendige Strömungsgeschwindigkeit wird entweder durch die Explosion oder durch eine detektorgesteuerte Hilfsströmung (Einblasen von Stickstoff auf den Ventilkegel) erzeugt (Abb. 23, 24).

Bisher bekannte Schnellschlussventile eignen sich nur für Leitungen mit relativ geringer Staubbelastung (z.B. Reinaltseite von Filteranlagen).

Schnellschlussventile dürfen nur dann eingesetzt werden, wenn ihre Wirksamkeit (mechanische Belastbarkeit, Schliesszeit, Zünddurchschlagsicherheit) nachgewiesen worden ist.

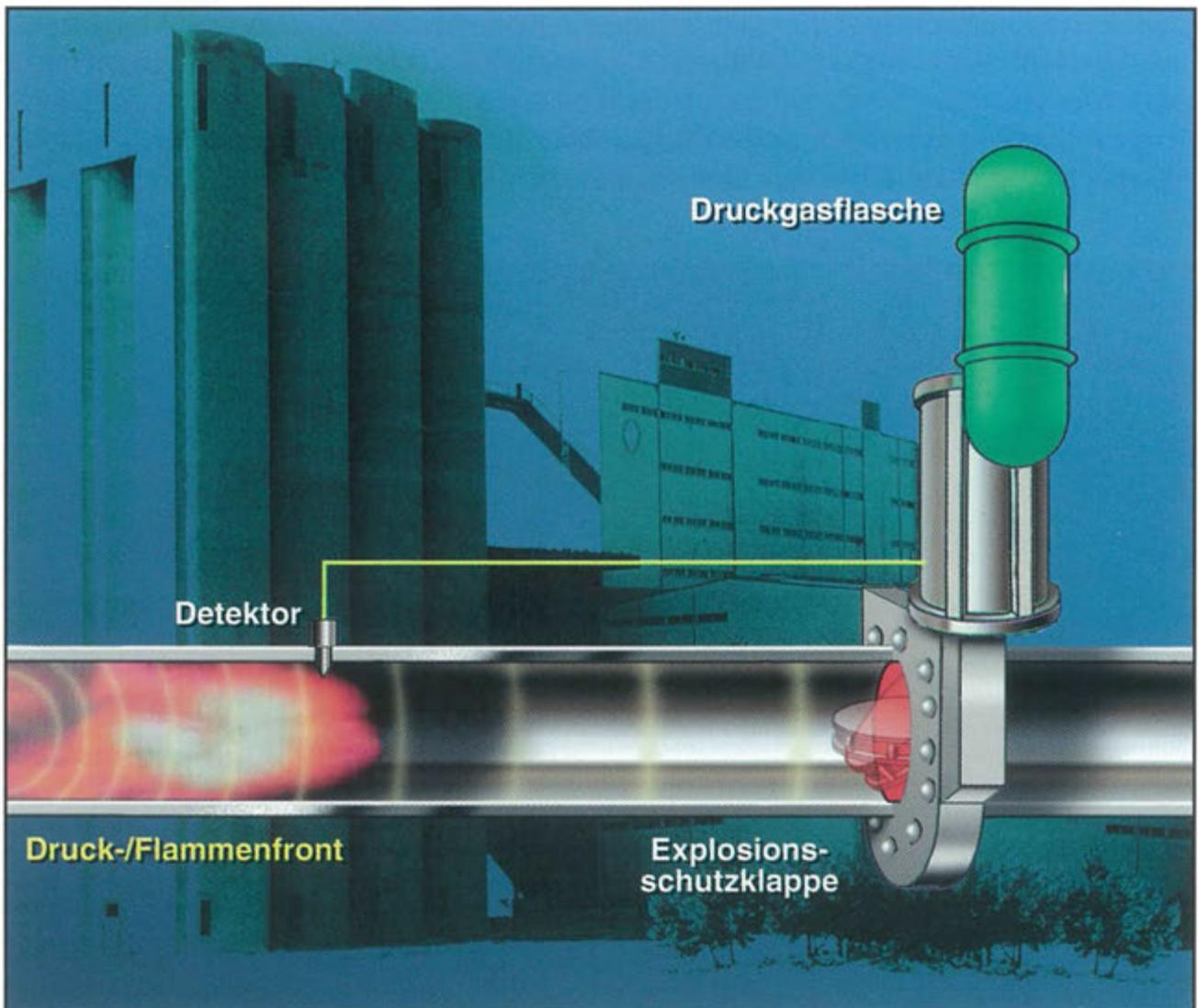


Abb. 22: Explosionsschutzklappe

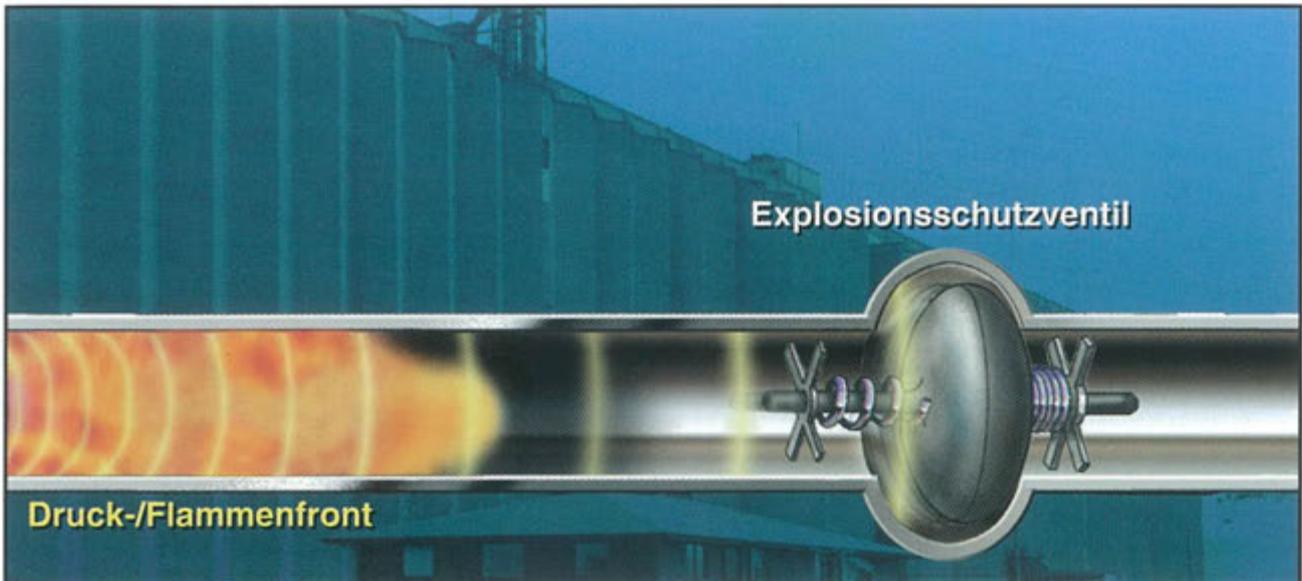


Abb. 23: Explosionsschutzventil

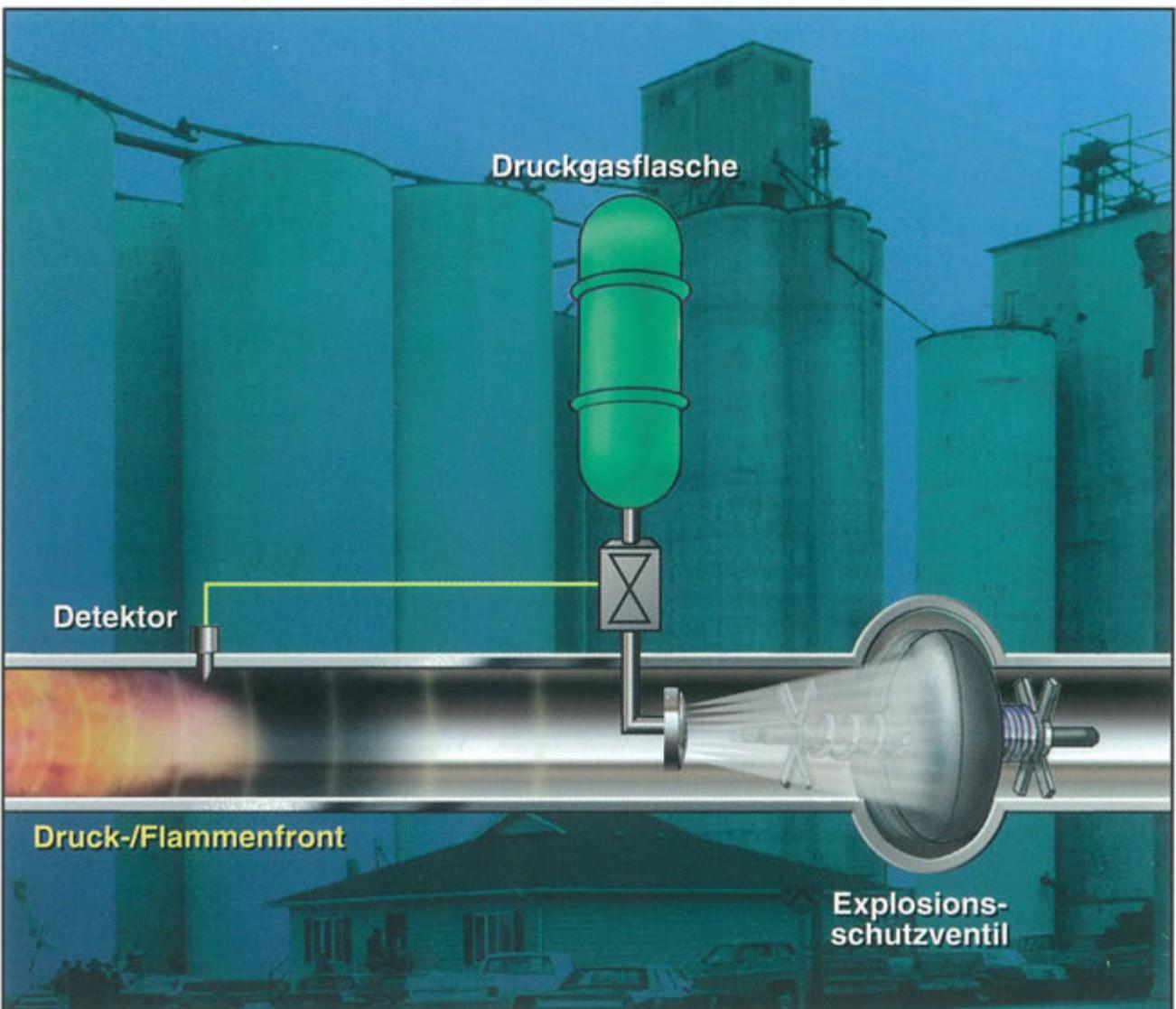


Abb. 24: Explosionsschutzventil, fremdbetätigt

3.4.5 Entlastungsschlot

Ein Entlastungsschlot besteht aus Leitungsteilen, die durch ein spezielles Rohrstück miteinander verbunden sind (Abb. 25). Den Abschluss gegen die Atmosphäre bildet eine Abdeckplatte oder Berstscheibe (Ansprechüberdruck < 0,1 bar). Eine Explosionsübertragung soll durch Änderung der Strömungsrichtung um 180° bei gleichzeitiger Entlastung verhindert werden.

Die Wirksamkeit des Entlastungsschlotes ist abhängig vom jeweiligen Explosionsverlauf (Heftigkeit, Richtung usw.). Eine sichere Entkopplung ist beispielsweise bei einer Objektabsaugung gewährleistet, wenn

- an der Absaugstelle und im Rohrleitungssystem betriebsmässig keine explosionsfähigen Staubkonzentrationen vorliegen

und

- nur eine Explosionsübertragung aus dem Saugfilter in das Rohrleitungssystem verhindert werden soll [17].

Das Wegfliegen von Teilen muss verhindert werden, z.B. durch einen Schutzkorb beim Verwenden einer Abdeckplatte. Die Entlastung muss so erfolgen, dass durch austretende Flammen oder durch Druck keine Gefährdungen entstehen.

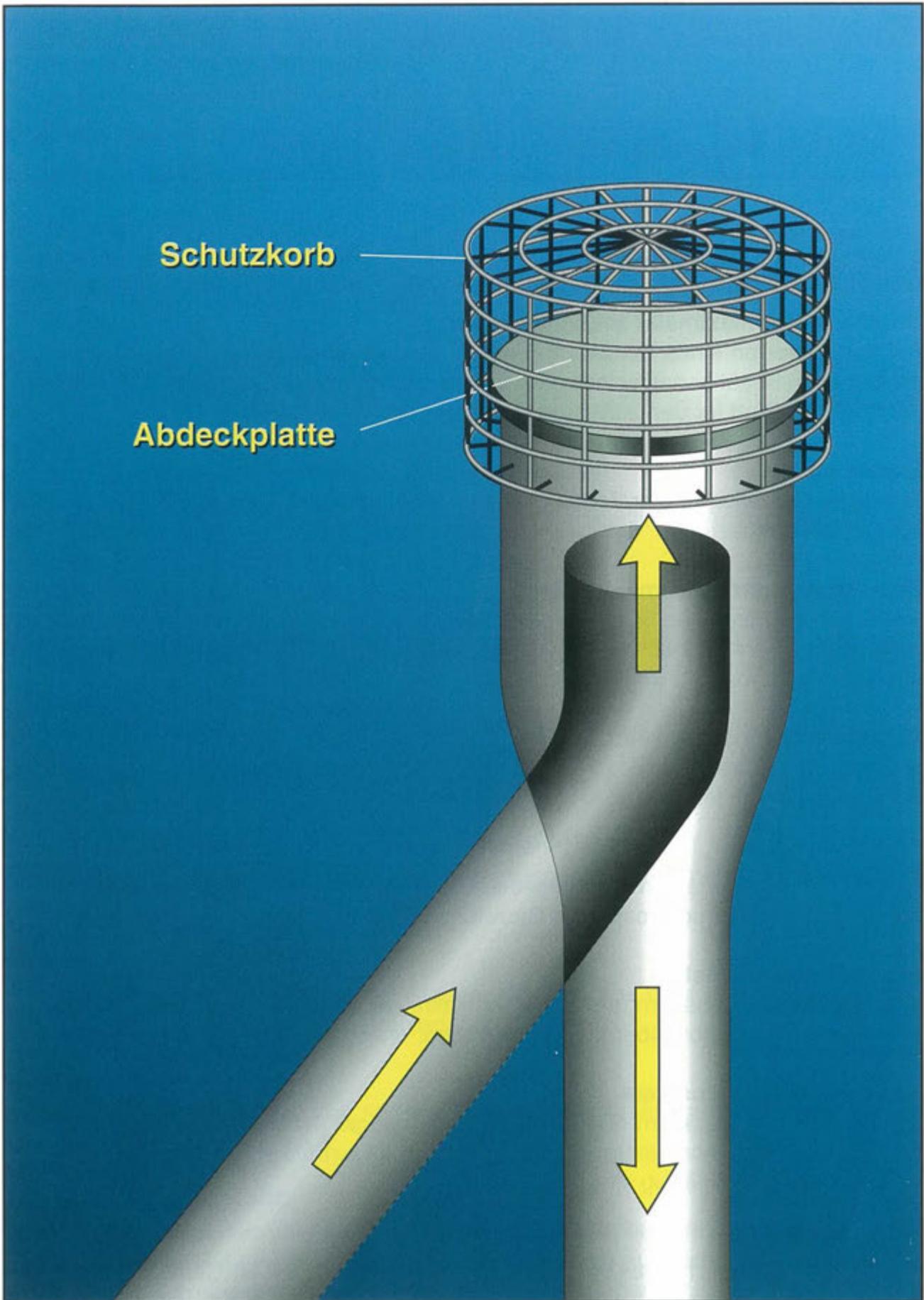


Abb. 25: Entlastungsschlot mit Abdeckplatte

4.1 Begriffe, Definitionen und Abkürzungen

„Deflagration“

Siehe „spontane Zersetzung“.

Druckanstieg, maximaler zeitlicher $(dp/dt)_{\max}$

Bei der Explosion eines Staub/Luft-Gemisches optimaler Konzentration in einem geschlossenen Behälter nach einem vereinbarten Verfahren (ISO 6184-Part 1) auftretender höchster Wert für den zeitlichen Druckanstieg.

Explosion

Plötzliche Oxidations- oder Zerfallsreaktion mit Anstieg der Temperatur, des Druckes oder beider gleichzeitig.

Explosionsüberdruck, maximaler p_{\max}

Bei der Explosion eines Staub/Luft-Gemisches optimaler Konzentration in einem geschlossenen Behälter nach einem vereinbarten Verfahren (ISO 6184-Part 1) ermittelter höchster Druckwert.

Explosionsüberdruck, reduzierter p_{red}

In einem durch Explosionsdruckentlastung oder Explosionsunterdrückung geschützten Behälter auftretender Explosionsüberdruck.

Explosionsfest

Eigenschaft von Behältern und Betriebsmitteln, die entweder in explosionsdruckfester oder in explosionsdruckstossfester Bauweise ausgeführt sind.

Explosionsdruckfest

Eigenschaft von Behältern und Betriebsmitteln, die so gebaut sind, dass sie dem zu erwartenden Explosionsüberdruck standhalten, ohne sich bleibend zu verformen.

Explosionsdruckstossfest

Eigenschaft von Behältern und Betriebsmitteln, die so gebaut sind, dass sie dem zu erwartenden Explosionsüberdruck standhalten ohne zu bersten, wobei jedoch bleibende Verformungen zulässig sind.

Explosionsbereich

Konzentrationsbereich eines Staubes in Luft, in dem im Staub/Luft-Gemisch bei Entzündung eine selbständige, mit einer messbaren Druckentwicklung verbundene Flammenfortpflanzung (Explosion) stattfinden kann.

Explosionsgrenzen

Untere Explosionsgrenze UEG

Untere Grenze des Explosionsbereiches.

Obere Explosionsgrenze OEG

Obere Grenze des Explosionsbereiches.

Glimmnest

Glimmende, d.h. flammenlos oxidierende Teilmenge eines abgelagerten brennbaren Staubes. Glimmester können durch Selbsterhitzung oder durch äussere Zündquellen entstehen.

Glimmtemperatur GT

Als Glimmtemperatur wird die Mindestzündtemperatur einer 5-mm-Staubschicht bezeichnet.

Hybride Gemische

Gemische von Luft und brennbaren Stoffen in unterschiedlichen Aggregatzuständen, z.B. Gemische aus Kohlenstaub, Methan und Luft.

Ausgangsdruck p_o

Druck, der vor der Explosion herrscht.

„Kubisches Gesetz“

Volumenabhängigkeit des maximalen zeitlichen Druckanstieges.

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

Wegen des Zusammenhanges zwischen Volumen V und $(dp/dt)_{\max}$ sind Angaben für den maximalen zeitlichen Druckanstieg ohne gleichzeitige Volumenangabe nicht ausreichend.

K_{St}

Volumenabhängige Kenngrösse für Stäube, die sich aus dem „Kubischen Gesetz“ errechnet. Sie ist brennstoff- und prüfverfahrensspezifisch.

Medianwert M

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

Mindestzündenergie MZE

Unter vorgeschriebenen Versuchsbedingungen ermittelte, kleinste, in einem Kondensator gespeicherte elektrische Energie, die bei Entladung ausreicht, das zündwilligste Gemisch einer explosionsfähigen Atmosphäre zu entzünden.

Mindestzündtemperatur MZT

einer Staubschicht

Die unter vorgeschriebenen Versuchsbedingungen ermittelte niedrigste Temperatur einer heissen Oberfläche, bei der eine Staubschicht entzündet wird.

einer Staubwolke

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

Rückstosskraft

Kraft, die bei der Explosionsdruckentlastung entgegen der Abströmrichtung wirkt.

Sauerstoffgrenzkonzentration SGK

Maximale Sauerstoffkonzentration in einem Gemisch eines brennbaren Staubes mit Luft und inertem Gas, in dem eine Explosion nicht auftritt, bestimmt unter festgelegten Versuchsbedingungen.

Spontane Zersetzung¹⁾ („Deflagration“)

Eine lokal durch Fremdzündung ausgelöste Zersetzungsreaktion, die sich im Gegensatz zur Verbrennung auch unter Ausschluss von Luftsauerstoff selbständig fortpflanzt.

Statische Elektrizität

Siehe IVSS-Broschüre *Statische Elektrizität - Zündgefahren und Schutzmassnahmen* [11].

¹⁾ In Anlehnung an die englische Definition „spontaneous“ decomposition.

4.2 Literatur

- [1] EN (Europäische Norm), *Explosionsfähige Atmosphäre - Explosionsschutz - Teil 1: Grundlagen und Methodik*, EN 1127-1, August 1997.
- [2] Bartknecht W., *Explosionsschutz, Grundlagen und Anwendung*, Springer Verlag, D-10969 Berlin, 1993.
- [3] VDI (Verein Deutscher Ingenieure), *Staubbrände und Staubexplosionen; Gefahren-Beurteilung - Schutzmassnahmen*, VDI-Richtlinie 2263, VDI Verlag, D-40239 Düsseldorf, 1992.
- [4] IVSS (Internationale Vereinigung für soziale Sicherheit), *Schutz vor Staubexplosionen*, Internationale Sektion der IVSS für die Verhütung von Arbeitsunfällen und Berufskrankheiten in der chemischen Industrie, D-69115 Heidelberg, 1998.
- [5] VDI, *Untersuchungsmethoden zur Ermittlung von sicherheitstechnischen Kenngrößen von Stäuben*, VDI-Richtlinie 2263 - Blatt 1, VDI Verlag, D-40239 Düsseldorf, 1990.
- [6] IVSS, *Bestimmen der Brenn- und Explosionskenngrößen von Stäuben*, Internationale Sektion der IVSS für Maschinensicherheit, D-68165 Mannheim, 1995.
- [7] ESCIS (Expertenkommission für Sicherheit in der chemischen Industrie der Schweiz), *Sicherheitstests für Chemikalien*, ESCIS-Heft 1, Suva Bereich Chemie, CH-6002 Luzern, 1998.
- [8] HVBG (Hauptverband der gewerblichen Berufsgenossenschaften), *Brenn- und Explosionskenngrößen von Stäuben*, BIA-Report 12/97, HVBG, D-53757 Sankt Augustin, 1997.
- [9] VDI, *Inertisierung*, VDI-Richtlinie 2263 - Blatt 2, VDI Verlag, D-40239 Düsseldorf, 1992.
- [10] ESCIS, *Inertisierung*, ESCIS-Heft 3, Suva Bereich Chemie, CH-6002 Luzern, 1995.
- [11] IVSS, *Statische Elektrizität - Zündgefahren und Schutzmassnahmen*, Internationale Sektion der IVSS für Verhütung von Arbeitsunfällen und Berufskrankheiten in der chemischen Industrie, D-69115 Heidelberg, 1995.
- [12] ESCIS, *Statische Elektrizität - Regeln für die betriebliche Sicherheit*, ESCIS-Heft 2 Suva Bereich Chemie, CH-6002 Luzern, 1997.
- [13] VDI, *Explosionsdruckstoßfeste Behälter und Apparate - Berechnung, Bau und Prüfung*, VDI-Richtlinie 2263 - Blatt 3, VDI Verlag, D-40239 Düsseldorf, 1980.

- [14] VDI, *Druckentlastung von Staubexplosionen*, VDI-Richtlinie 3673 - Blatt 1, VDI Verlag, D-40239 Düsseldorf, 1995.
- [15] VDI, *Unterdrückung von Staubexplosionen*, VDI-Richtlinie 2263 - Blatt 4, VDI Verlag, D-40239 Düsseldorf, 1992.
- [16] IVSS, *Explosionsunterdrückung*, Internationale Sektion der IVSS für Maschinensicherheit, D-68165 Mannheim, 1990.
- [17] IVSS, *Explosionstechnische Entkopplung*, Internationale Sektion der IVSS für Maschinensicherheit, D-68165 Mannheim, 1998.

5 Schriftenreihe der IVSS (Explosionsschutz)

IVSS Sektion Maschinensicherheit
Arbeitskreis „Staubexplosionen“

Staubexplosionsschutz an Maschinen und Apparaten

- Grundlagen (dt./engl.)
(1998)
- Beispielsammlung (dt./engl./fr.)
(1990)

Explosionsunterdrückung (dt./engl./fr.)
(1990)

Bestimmen der Brenn- und Explosionskenngrößen von Stäuben (dt./engl.)
(1995)

Explosionstechnische Entkopplung (dt./engl.)
(1998)

Bestelladresse: IVSS Sektion Maschinensicherheit
Dynamostr. 7-11
D-68165 Mannheim
Deutschland

IVSS Sektion für die chemische Industrie
Arbeitsgruppe „Explosionsschutz“

Liste der Vorschriften über Explosionsschutz (dt.)
(1987)

Schutz vor Staubexplosionen (dt./engl./fr./it./span.) (1987)

Schutz vor Explosionen durch brennbare Gase, Dämpfe oder Nebel im Gemisch mit Luft
(dt./engl./fr./it.)
(1998)

Dokumentation Flüssiggas (dt.)
(1988)

Sicherheit von Flüssiggasanlagen - Propan und Butan (dt./engl./fr./it./span.)
(1992)

Statische Elektrizität - Zündgefahren und Schutzmassnahmen (dt./engl./fr./it.)
(1996)

Bestelladresse: IVSS Sektion Chemie
Postfach 10 14 80
D-69004 Heidelberg
Deutschland

DIE IVSS UND DIE VERHÜTUNG VON ARBEITSUNFÄLLEN UND BERUFSSKRANKHEITEN

Der Ständige Fachausschuss der IVSS für die Verhütung von Arbeitsunfällen und Berufskrankheiten bringt Arbeitsschutzspezialisten aus aller Welt zusammen. Er fördert das internationale Vorgehen in diesem Bereich und unternimmt Sonderstudien über Themen wie die Rolle von Presse, Rundfunk und Fernsehen im Arbeitsschutz und integrierte Sicherheitsstrategien für den Arbeitsplatz, den Strassenverkehr und den häuslichen Bereich. Er koordiniert ferner die Tätigkeiten der acht Internationalen Sektionen für die Verhütung von Arbeitsunfällen und Berufskrankheiten, die in verschiedenen Industrien und in der Wirtschaft tätig sind und ihre Sekretariate in verschiedenen Ländern haben. Drei weitere Sektionen befassen sich mit Informationstechniken im Bereich des Arbeitsschutzes, der einschlägigen Forschung und der Erziehung und Ausbildung zur Verhütung von Arbeitsunfällen und Berufskrankheiten.

Die Tätigkeiten der internationalen Sektionen der IVSS bestehen aus

- dem Austausch von Informationen zwischen den an der Verhütung von Berufsgefahren interessierten Gremien,
- der Organisation der Tagungen von Fachausschüssen und Arbeitsgruppen, Rundtischgesprächen und Kolloquien auf internationaler Ebene,
- der Durchführung von Erhebungen und Untersuchungen,
- der Förderung der Forschungsarbeit
- der Veröffentlichung einschlägiger Informationen.

Weitere Informationen über diese Tätigkeiten und die allgemeine Arbeit der IVSS auf dem Gebiet des Arbeitsschutzes finden Sie in dem Faltblatt „Sicherheit Weltweit“. Es ist in deutscher, englischer, französischer und spanischer Fassung beim Generalsekretariat der IVSS erhältlich.

DIE MITGLIEDER DER INTERNATIONALEN SEKTIONEN

Jede internationale Sektion der IVSS hat drei Kategorien von Mitgliedern:

- Vollmitglied:
Vollmitglieder und assoziierte Mitglieder der IVSS, Genf, und andere Organisationen ohne Gewinnstreben können die Aufnahme als Vollmitglied beantragen.
- Assoziiertes Mitglied:
Andere Organisationen und gewerbliche Unternehmen können assoziierte Mitglieder einer Sektion werden, wenn sie über Sachkenntnisse im Aufgabenbereich der Sektion verfügen.
- Korrespondent:
Individuelle Experten können korrespondierende Mitglieder einer Sektion werden.

Weitere Informationen und Aufnahmeformulare sind direkt beim Sekretariat der einzelnen Sektionen erhältlich.

**MINDESTENS EINE DIESER ARBEITSSCHUTZSEKTIONEN DER IVSS
ENTSPRICHT AUCH IHREM EIGENEN FACHBEREICH: ZÖGERN SIE NICHT,
MIT IHR KONTAKT AUFZUNEHMEN**



INTERNATIONALE SEKTION DER IVSS
für die LANDWIRTSCHAFT
Bundesverband der landwirtschaftlichen
Berufsgenossenschaften
Weissensteinstrasse 72
D-34131 KASSEL-WILHELMSHÖHE
Deutschland



INTERNATIONALE SEKTION DER IVSS
für MASCHINENSICHERHEIT
Berufsgenossenschaft Nahrungsmittel und
Gaststätten
Dynamostr. 7-11
D-68165 MANNHEIM
Deutschland



INTERNATIONALE SEKTION DER IVSS
für die CHEMISCHE INDUSTRIE
Berufsgenossenschaft
der chemischen Industrie
Kurfürsten Anlage 62
D-69115 HEIDELBERG
Deutschland



INTERNATIONALE SEKTION DER IVSS
für den BERGBAU
OKD - Rozvoj a projektování
(Steinkohlegruben von Ostrava - Karviná
Entwicklung und Projektierung)
Havlickovo nábr. 38
CS-730 16 OSTRAVA 1
Tschechien



INTERNATIONALE SEKTION DER IVSS
für den HOCH- UND TIEFBAU
Organisme professionnel de prévention du
bâtiment et des travaux publics (OPPBT)
Tour Amboise
204, Rond-Point du Pont-de-Sèvres
F-92516 BOULOGNE-BILLANCOURT
Frankreich



INTERNATIONALE SEKTION DER IVSS für
FORSCHUNG
Institut National de Recherche et de Sécurité
(INRS)
30, rue Olivier - Noyer
F-75680 PARIS CEDEX 14
Frankreich



INTERNATIONALE SEKTION DER IVSS
für ELEKTRIZITÄT
Berufsgenossenschaft der Feinmechanik und
Elektrotechnik
Gustav Heinemann Ufer 130
D-50968 KÖLN
Deutschland



INTERNATIONALE SEKTION DER IVSS
für ERZIEHUNG und AUSBILDUNG
Caisse Régionale d'Assurance Maladie
d'Île de France
17-19, Place de l'Argonne
F - 75019 Paris
Frankreich



INTERNATIONALE SEKTION DER IVSS
für INFORMATION
Association nationale pour la prévention
des accidents du travail (ANPAT)
88, rue Gachard, Boîte 4
B-1050 BRUXELLES
Belgien



INTERNATIONALE SEKTION DER IVSS
für das GESUNDHEITSWESEN
Berufsgenossenschaft für
Gesundheitsdienst und Wohlfahrtspflege
Pappelallee 35-37
D-22089 Hamburg
Deutschland



INTERNATIONALE SEKTION DER IVSS für
die EISEN UND METALLINDUSTRIE
Allgemeine Unfallversicherungsanstalt
Adalbert-Stifter-Strasse 65
A-1200 WIEN XX
Österreich