



Wolfgang Bartknecht

# Staub- explosionen

Ablauf und Schutzmaßnahmen

Mit einem Beitrag von  
Günther Zwahlen

295 zum Teil farbige Abbildungen  
und 26 Tabellen

Springer-Verlag  
Berlin Heidelberg GmbH

Dr. Wolfgang Bartknecht  
Egerstr. 12  
D-7858 Weil/Rh.

Günther Zwahlen Dipl. Chem. HTL  
Landskronstr. 12  
CH-4143 Dornach

ISBN 978-3-662-10050-9

CIP-Kurztitelaufnahme der Deutschen Bibliothek  
Bartknecht, Wolfgang: Staubexplosionen: Ablauf u. Schutzmaßnahmen / Wolfgang  
Bartknecht. Mit e. Beitr. von Günther Zwahlen.

ISBN 978-3-662-10050-9 ISBN 978-3-662-10049-3 (eBook)  
DOI 10.1007/978-3-662-10049-3

Dieses Werk ist urheberrechtlich geschützt. Die dadurch begründeten Rechte, insbesondere die der Übersetzung, des Nachdrucks, des Vortrags, der Entnahme von Abbildungen und Tabellen, der Funksendung, der Mikroverfilmung oder der Vervielfältigung auf anderen Wegen und der Speicherung in Datenverarbeitungsanlagen, bleiben, auch bei nur auszugsweiser Verwertung, vorbehalten. Eine Vervielfältigung dieses Werkes oder von Teilen dieses Werkes ist auch im Einzelfall nur in den Grenzen der gesetzlichen Bestimmungen des Urheberrechtsgesetzes der Bundesrepublik Deutschland vom 9. September 1965 in der Fassung vom 24. Juni 1985 zulässig. Sie ist grundsätzlich vergütungspflichtig. Zuwiderhandlungen unterliegen den Strafbestimmungen des Urheberrechtsgesetzes.

© Springer-Verlag Berlin Heidelberg 1987  
Ursprünglich erschienen bei Springer-Verlag Berlin Heidelberg New York 1987  
Softcover reprint of the hardcover 1st edition 1987

Die Wiedergabe von Gebrauchsnamen, Handelsnamen, Warenbezeichnungen usw. in diesem Werk berechtigt auch ohne besondere Kennzeichnung nicht zu der Annahme, daß solche Namen im Sinne der Warenzeichen- und Markenschutz-Gesetzgebung als frei zu betrachten wären und daher von jedermann benutzt werden dürften.

Umschlagentwurf: W. Eisenschink,  
Offsetdruck und Bindearbeiten: Kieser, Augsburg  
2154/3145-543210

# Vorwort

Staub ist die gefährlichste Form, in der ein Feststoff sowohl in natürlichen als auch in technischen Prozessen auftreten kann. Staub muß als eigenständige Phase mit sehr spezifischen Eigenschaften betrachtet werden. Man definiert Staub als die disperse Verteilung feinsten Partikeln eines Feststoffes in einem Gas. In Zusammenhang mit Explosionen wird man als Gas stets an Luft mit ihrem Gehalt an Sauerstoff denken. Denn bei einer Explosion erfolgt eine spontane Oxidation des staubförmigen Feststoffes.

Die Vehemenz einer explosiven Oxidation steigt mit zunehmender Feinheit der festen Partikeln, da deren Oberfläche, bezogen auf das Gesamtvolumen des festen Stoffes, der im Gas dispergiert ist, sehr schnell ansteigt. Ein Beispiel möge diese Angaben verdeutlichen. Ausgegangen wird von einem Feststoffvolumen von  $1 \text{ cm}^3$ . Liegt er in Form eines Kubus vor, dann beträgt seine Oberfläche  $6 \text{ cm}^2$ . Denkt man sich dieses Feststoffvolumen in Partikeln aufgeteilt, deren Durchmesser  $1 \mu\text{m}$  ist, so erhält man insgesamt eine Oberfläche von  $6 \cdot 10^4 \text{ cm}^2$ . Die Oberfläche des Staubes ist also zehntausend mal größer als die des Vergleichskubus. Die tatsächlich wirksamen Verhältnisse können aber noch viel größere Werte erreichen, da mit abnehmender Größe der Partikeln ihre innere Oberfläche, die im allgemeinen ein Vielfaches der äußeren beträgt, für den Oxidationsprozeß wirksam wird. Es ist seine Oberfläche, die den Staub zu einem so gefährlichen Stoff werden läßt.

Der Ablauf explosiver Oxidationsprozesse ist von rein wissenschaftlicher Seite bislang nur in Ansätzen untersucht. Ein befriedigender Einblick in Staubexplosionen läßt sich daher nur auf der Grundlage umfassender experimenteller Untersuchungen gewinnen. Wegen der hohen finanziellen Aufwendungen für derartige Versuche ist es notwendig, die Ergebnisse mit großer Sorgfalt zu analysieren und mit Hilfe von Kennwerten zusammenzufassen. Hieraus entstehen dann jene Handlungsanweisungen, die zur Vermeidung von Explosionen oder zumindest zur Einschränkung ihrer Folgen beachtet werden müssen.

Der Autor hat den heutigen Stand der Erkenntnisse über Ursachen, Ablauf und Folgen von Staubexplosionen in hervorragender Weise zusammengefaßt. Explosionen wurden zum Problem, um das herum sich sein Arbeitsleben mit großem Erfolg entwickelte.

## VI Vorwort

Wer immer mit Staub konfrontiert ist, sei es als Betriebsingenieur oder als Wissenschaftler, der wird aus diesem Buch Nutzen ziehen und die Sicherheit des Betriebes, für den er verantwortlich ist, erhöhen.

Heinz Brauer  
o. Professor für Verfahrenstechnik  
Technische Universität Berlin

# Inhaltsverzeichnis

1	<i>Einleitung</i> . . . . .	1
2	<i>Geschichtliches</i> . . . . .	2
2.1	Häufigkeit von Staubexplosionen . . . . .	2
2.2	Was ist eine Staubexplosion? . . . . .	10
2.3	Apparaturen für die Untersuchung des aufgewirbelten Staubes . . . . .	15
3	<i>Staub als disperser Stoff</i> . . . . .	24
4	<i>Sicherheitstechnische Kenngrößen</i> . . . . .	27
4.1	Vorbemerkung . . . . .	27
4.2	Sicherheitstechnische Kenngrößen von abgelagertem Staub (G. Zwalhen) . . . . .	28
4.2.1	Entzündbarkeit . . . . .	28
4.2.2	Brennverhalten . . . . .	29
4.2.2.1	Brennprüfung bei Raumtemperatur . . . . .	29
4.2.2.2	Brennprüfung bei erhöhter Temperatur . . . . .	30
4.2.2.3	Prüfung auf Abbrenngeschwindigkeit . . . . .	31
4.2.3	Deflagration . . . . .	32
4.2.3.1	Screening-Test auf Deflagration . . . . .	32
4.2.3.2	Laborprüfung auf Deflagration . . . . .	33
4.2.4	Glimmtemperatur . . . . .	34
4.2.4.1	Bestimmung der Glimmtemperatur . . . . .	35
4.2.5	Selbstentzündung . . . . .	36
4.2.5.1	Bestimmung der relativen Selbstentzündungstemperatur nach Grewer . . . . .	37
4.2.5.2	Warmlagerprüfung im Drahtkorb . . . . .	39
4.2.6	Exotherme Zersetzung . . . . .	40
4.2.6.1	Prüfung auf exotherme Zersetzung im offenen Gefäß nach Lütolf . . . . .	40
4.2.6.2	Prüfung auf exotherme Zersetzung im Stickstoffstrom im Ofen nach Grewer . . . . .	44
4.2.6.3	Differenzthermoanalyse . . . . .	44
4.2.6.4	Prüfung auf exotherme Zersetzung unter wärmestauenden Bedingungen . . . . .	44
4.2.7	Explosivität . . . . .	47
4.2.7.1	Schlagempfindlichkeit . . . . .	48

## VIII Inhaltsverzeichnis

4.2.7.2	Reibempfindlichkeit . . . . .	49
4.2.7.3	Thermische Sensibilität (Stahlhülsestest) . . . . .	50
4.3	Sicherheitstechnische Kenngrößen von aufgewirbeltem Staub, die das Explosionsverhalten beschreiben . . . . .	51
4.3.1	Brennbare Stäube . . . . .	51
4.3.1.1	Vorbemerkung . . . . .	51
4.3.1.2	Korngrößenverteilung . . . . .	52
4.3.1.3	Explosionsfähigkeit . . . . .	53
4.3.1.4	Explosionsgrenzen . . . . .	54
4.3.1.5	Explosionsdruck/Explosionsheftigkeit . . . . .	55
4.3.2	Flock . . . . .	81
4.3.2.1	Vorbemerkung . . . . .	81
4.3.2.2	Explosionsgrenzen . . . . .	82
4.3.2.3	Explosionsdruck/Explosionsheftigkeit . . . . .	84
4.3.3	Hybride Gemische . . . . .	86
4.3.3.1	Vorbemerkung . . . . .	86
4.3.3.2	Explosionsgrenzen . . . . .	87
4.3.3.3	Explosionsdruck/Explosionsheftigkeit . . . . .	88
4.3.4	Schlußfolgerungen . . . . .	92
4.4	Sicherheitstechnische Kenngrößen von aufgewirbeltem Staub, die das Zündverhalten beschreiben . . . . .	93
4.4.1	Mindestzündenergie . . . . .	93
4.4.1.1	Vorbemerkung . . . . .	93
4.4.1.2	Bestimmungsapparatur . . . . .	93
4.4.1.3	Zündverhalten brennbarer Stäube . . . . .	96
4.4.1.4	Zündverhalten von Flock . . . . .	109
4.4.1.5	Zündverhalten von hybriden Gemischen . . . . .	112
4.4.1.6	Schlußfolgerungen . . . . .	114
4.4.2	Zündtemperatur . . . . .	116
4.4.2.1	Vorbemerkung . . . . .	116
4.4.2.2	Bestimmungsapparatur . . . . .	116
4.4.2.3	Zündwirksamkeit einer Glühwendel . . . . .	117
4.4.2.4	Schlußfolgerungen . . . . .	119
4.5	Sicherheitstechnische Kenngrößen von aufgewirbeltem Staub, die den Explosionsablauf in Rohrleitungen beschreiben . . . . .	119
5	<i>Schutzmaßnahmen gegen das Entstehen und die Auswirkungen von Staubexplosionen . . . . .</i>	126
5.1	Vorbemerkung . . . . .	126
5.2	Verbeugender Explosionsschutz . . . . .	128
5.2.1	Vorbemerkung . . . . .	128
5.2.2	Vermeiden von explosionsfähigen Staub/Luft-Gemischen . . . . .	129

5.2.3	Vermeiden von Staubexplosionen durch Inertisierung . . . . .	130
5.2.3.1	Zumischung von Stickstoff . . . . .	130
5.2.3.1.1	Vorbemerkung . . . . .	130
5.2.3.1.2	Brennbare Stäube . . . . .	132
5.2.3.1.3	Hybride Gemische . . . . .	138
5.2.3.1.4	Anwendung von Vakuum . . . . .	141
5.2.3.1.5	Zugabe von Feststoffen . . . . .	142
5.2.4	Vermeiden von wirksamen Zündquellen . . . . .	146
5.2.4.1	Vorbemerkung . . . . .	146
5.2.4.2	Mechanisch erzeugte Funken . . . . .	146
5.2.5	Heie Oberflächen/Selbstentzündung . . . . .	155
5.2.6	Statische Elektrizität . . . . .	156
5.2.7	Schlufolgerungen . . . . .	160
5.3	Konstruktiver Explosionsschutz . . . . .	162
5.3.1	Vorbemerkung . . . . .	162
5.3.2	Explosionsfeste Bauweise für den maximalen Explosionsdruck . . . . .	164
5.3.2.1	Explosionsdruckfeste Bauweise . . . . .	164
5.3.2.2	Explosionsdruckstofeste Bauweise . . . . .	165
5.3.3	Explosionsfeste Bauweise für den reduzierten maximalen Explosionsdruck in Verbindung mit Explosionsdruckentlastung . . . . .	167
5.3.3.1	Vorbemerkung . . . . .	167
5.3.3.2	Explosionsdruckentlastung von Behaltlern . . . . .	168
5.3.3.3	Explosionsdruckentlastung von langgestreckten Behaltlern (Silos) . . . . .	188
5.3.3.4	Explosionsdruckentlastungen von Rohrleitungen . . . . .	201
5.3.4	Explosionsfeste Bauweise für den reduzierten maximalen Explosionsdruck in Verbindung mit Explosionsunterdruckung . . . . .	204
5.3.5	Explosionstechnische Entkopplung bzw. Explosionsabbruch . . . . .	216
5.3.5.1	Vorbemerkung . . . . .	216
5.3.5.2	Loschmittelsperre . . . . .	217
5.3.5.3	Zellenradschleusen . . . . .	231
5.3.5.4	Schnellschluschieber/Schnellschluklappe . . . . .	234
5.3.5.5	Schnellschluventil . . . . .	243
5.3.5.6	Entlastungsschlot . . . . .	245
5.3.6	Schlufolgerungen . . . . .	247



X	Inhaltsverzeichnis	
6	<i>Schlußwort</i> . . . . .	249
7	<i>Literaturhinweise</i> . . . . .	251
8	<i>Anhang</i> . . . . .	257
8.1	Explosionsdruckentlastung . . . . .	257
8.1.1	Behälter: Flächenberechnung aus Rechenmodell oder Nomogramm . . . . .	257
8.1.2	Langgestreckte Behälter (Silos) . . . . .	258
9	<i>Sachverzeichnis</i> . . . . .	263