

Handbuch des Explosionsschutzes

herausgegeben von Henrikus Steen

 **WILEY-VCH**

Weinheim · NewYork · Chichester · Brisbane · Singapore · Toronto

This Page Intentionally Left Blank

Handbuch des Explosionsschutzes

herausgegeben von H. Steen

 **WILEY-VCH**

This Page Intentionally Left Blank

Handbuch des Explosionsschutzes

herausgegeben von Henrikus Steen

 **WILEY-VCH**

Weinheim · NewYork · Chichester · Brisbane · Singapore · Toronto

Professor Dr.-Ing. Henrikus Steen (Herausgeber)
4 Meadows Road
Willingdon/Eastbourne
East Sussex BN22 0NF
England

Das vorliegende Werk wurde sorgfältig erarbeitet. Dennoch übernehmen Herausgeber, Autoren und Verlag für die Richtigkeit von Angaben, Hinweisen und Ratschlägen sowie für eventuelle Druckfehler keine Haftung.

Umschlag: Prüfung von Stäuben auf Explosionsfähigkeit im Hartmannrohr.
Mit freundlicher Genehmigung der Degussa AG, Frankfurt.

Die Deutsche Bibliothek - CIP-Einheitsaufnahme

Ein Titeldatensatz für diese Publikation ist bei Der Deutschen Bibliothek erhältlich

© WILEY-VCH Verlag GmbH, D-69469 Weinheim (Federal Republic of Germany). 2000 Gedruckt auf säurefreiem und chlorfrei gebleichtem Papier.

Alle Rechte, insbesondere die der Übersetzung in andere Sprachen, vorbehalten. Kein Teil dieses Buches darf ohne schriftliche Genehmigung des Verlages in irgendeiner Form - durch Photokopie, Mikroverfilmung oder irgendein anderes Verfahren - reproduziert oder in eine von Maschinen, insbesondere von Datenverarbeitungsmaschinen, verwendbare Sprache übertragen oder übersetzt werden. Die Wiedergabe von Warenbezeichnungen, Handelsnamen oder sonstigen Kennzeichen in diesem Buch berechtigt nicht zu der Annahme, daß diese von jedermann frei benutzt werden dürfen. Vielmehr kann es sich auch dann um eingetragene Warenzeichen oder sonstige gesetzlich geschützte Kennzeichen handeln, wenn sie nicht eigens als solche markiert sind.

All rights reserved (including those of translation into other languages). No part of this book may be reproduced in any form - by photoprinting, microfilm, or any other means - nor transmitted or translated into a machine language without written permission from the publishers. Registered names, trademarks, etc. used in this book, even when not specifically marked as such, are not to be considered unprotected by law.

Satz: DATA SOURCE SYSTEMS, Timisoara 1900, Romania.
Druck: Betzdruck: D-63291 Darmstadt
Bindung: Osswald&Co., D-67433 Neustadt (Weinstraße)
Printed in the Federal Republik of Germany.

Vorwort des Herausgebers

Dieses Buch ist das Nachfolgewerk des früheren Werkes "Handbuch der Raumexplosionen", herausgegeben von H.-H. Freytag und letztmalig erschienen im Jahr 1963. Dieses seinerzeit ebenfalls von einem Autorenkollegium bearbeitete Sammelwerk über Explosionen von Gemischen aus brennbaren Gasen, Dämpfen, Stäuben und Nebeln mit Luft oder einem anderen Oxidationsmittel sowie deren Initiierung fand aufgrund der Bedeutung für die industrielle und sonstige Praxis einem enormen Widerhall. Bereits damals lag ein lebhaftes Interesse an einem vertieften Verständnis für die Einzelheiten und die Bedeutung der Gefahrenaspekte und der Einflußgrößen zum Explosionsschutz vor. Aufgrund dieser Tatsache und in Anbetracht der technisch-wissenschaftlichen Weiterentwicklung hielt auch der Verlag eine Neuherausgabe für dringend geboten.

Ziel dieser neuen Herausgabe ist es nicht so sehr, mit der detaillierten Beschreibung und Erläuterung der zahlreichen sicherheitstechnischen Vorschriften, Regeln und Normen zum Schutz vor den Gefahren durch derartige Explosionen vertraut zu machen. Ein solches Buch würde sich intensiv mit den vielen technischen und rechtlichen Details dieser Regeln zu befassen haben, der Umfang wäre entsprechend groß und sehr schwer zu überschauen. Es hätte auch den Nachteil, dem Leser nur eine Momentaufnahme des einschlägigen Stands der Technik und damit eines sich schnell verändernden rechtlichen und technischen Entwicklungsprozesses und so nur eine begrenzte Gültigkeitsdauer anbieten zu können. Ziel dieses Buches ist es vielmehr, durch eine Darstellung der Grundlagen des Schutzes gegen derartige Explosionen das Verständnis des Lesers für die technisch-wissenschaftlichen Risiken und Schutzmöglichkeiten sowie deren Grenzen und für die Kompliziertheit der Einzelaspekte zu fördern. Damit wird der Leser dann den technischen und rechtlichen Veränderungen in den einschlägigen Regeln der Sicherheitstechnik leichter folgen können.

Das Buch richtet sich besonders an Naturwissenschaftler und Ingenieure in Industrie, in Forschung und in den für die Sicherheit zuständigen Organen sowie an die Studenten dieser Fachrichtungen.

Die Weiterentwicklung der Kenntnisse, bedingt durch die Erfolge der Forschung, sowie der technische Fortschritt und die Vielschichtigkeit der Themenkomplexe haben es notwendig gemacht, daß nicht alle zum Explosionsschutz gehörenden Einzelaspekte in diesem Buch behandelt werden konnten. Hierzu zählen beispielsweise die Gefahren beim Umgang mit Explosivstoffen (z.B. Sprengstoffen) und die sicherheitstechnisch sehr bedeutsamen Vorgänge der Entstehung und Ausbreitung der explosionsfähigen Gemische disperser Stoffe mit Luft oder anderen gasförmigen Oxidationsmitteln. Diese Vorgänge gehören zu den Voraussetzungen für den Eintritt der Explosionen. Die Komplex-

ität und der jetzige Umfang der wissenschaftlich-technischen Kenntnisse gerade auf den letztgenannten Gebieten würde zu einer erheblichen Umfangssteigerung des Buches führen. Für diese wichtigen Themenbereiche wäre sicherlich eine Darstellung in einem gesonderten Buch wünschenswert.

Die Arbeit in einem Autorenkollegium bringt es mit sich, daß einzelne Punkte, Aspekte und Vorgänge unter verschiedenen Blickwinkeln in mehreren Kapiteln des Buches angesprochen werden. Dies kann für den Leser durchaus vorteilhaft sein, da so sein Verständnis für diese Themenbereiche zusätzlich gefördert werden kann.

Willingdon/England, im Februar 2000

Henrikus Steen

Herausgeber und Autoren

Herausgeber

Prof. Dr. Henrikus Steen
4 Meadows Road
Willingdon / Eastbourne
East Sussex, BN22 0NF
U.K.

Autoren

Dipl.-Ing. Eberhard Behrend
Bundesanstalt für Materialforschung
und -prüfung (BAM)
Unter den Eichen 87
12205 Berlin
(Kapitel 2.4)

Dr. Elisabeth Brandes
Physikalisch-Technische Bundesanstalt (PTB)
Postfach 33 45
38023 Braunschweig
(Kapitel 3.1)

Prof. Dr. Heino Bothe
Physikalisch-Technische Bundesanstalt (PTB)
Postfach 33 45
38023 Braunschweig
(Kapitel 2.3 und 2.6)

Kenneth L. Cashdollar
Pittsburgh Research Center
National Institute for Occupational
Safety and Health
P.O. Box 18070
Pittsburgh, PA 15236-0070
USA
(Kapitel 4)

Dr. Siegmund Dietlen
Bundesanstalt für Materialforschung
und -prüfung (BAM)
Unter den Eichen 87
12205 Berlin
(Kapitel 3.1)

Dr. Hans Förster
Physikalisch-Technische Bundesanstalt (PTB)
Postfach 33 45
38023 Braunschweig
(Kapitel 5.1 und 6.5)

Dr. Markus Gödde
BASF AG
ZAT/ES Geb. L511
67056 Ludwigshafen
(Kapitel 2.3)

Dr. Martin Glor
Schweizerisches Institut zur
Förderung der Sicherheit
K - 32.302
CH-4002 Basel
Schweiz
(Kapitel 2.1 und 2.2 (außer 2.2.6))

Prof. Dr. Martin Hattwig
Bundesanstalt für Materialforschung
und -prüfung (BAM)
Unter den Eichen 87
12205 Berlin
(Kapitel 6.2)

Dr.-Ing. Willi Hensel
Bundesanstalt für Materialforschung
und -prüfung (BAM)
Unter den Eichen 87
12205 Berlin
(Kapitel 2.7 und 4)

Dr. Hartmut Hieronymus
Bundesanstalt für Materialforschung
und -prüfung (BAM)
Unter den Eichen 87
12205 Berlin
(Kapitel 3.1 und 5.2)

Prof. Dr. Karlheinz Hoyer
Institut für Physikalische Chemie
Universität Göttingen
Tammannstr. 6
37077 Göttingen
(Kapitel 3.2)

Prof. Dr. Winfried Karl
Bundesanstalt für Materialforschung
und -prüfung (BAM)
Unter den Eichen 87
12205 Berlin
(Kapitel 2.8)

Prof. Dr. Helmut Krämer †
ehem. Physikalisch-Technische Bundesanstalt (PTB)
Postfach 33 45
38023 Braunschweig
(Kapitel 2.1, 2.2.6, 2.2.7 und 2.2.8)

Dr.-Ing. Ulrich Krause
Bundesanstalt für Materialforschung
und -prüfung (BAM)
Unter den Eichen 87
12205 Berlin
(Kapitel 2.7, 3.1 und 6.2)

Dr. Ulrich Löffler
BASF AG
67056 Ludwigshafen
(Kapitel 2.7)

Dr. Bodo Plewinsky
Bundesanstalt für Materialforschung
und -prüfung (BAM)
Unter den Eichen 87
12205 Berlin
(Kapitel 3.1 und 5.2)

Dr. Christophe Proust
INERIS-Institut national de
l'environnement industriel et des risques
Parc Technologique ALATA
B.P. 2
Rue Taffanael
F-60550 Verneuil-en-Halatte
Frankreich
(Kapitel 6.2)

Dr. Tammo Redeker
IBExU GmbH
Fuchsmühlenweg 7
09599 Freiberg
(Kapitel 3.1)

Dr.-Ing. Klaus Ritter
Ulmenstr. 10
69493 Hirschberg
(Kapitel 2.4)

Dr. Volkmar Schröder
Bundesanstalt für Materialforschung
und -prüfung (BAM)
Unter den Eichen 87
12205 Berlin
(Kapitel 3.1)

Richard Siwek
Fa. Fire Ex
Dinggrabenstrasse 5
CH-4304 Griebenach
Schweiz
(Kapitel 6.3 und 6.4)

Prof. Dr. Henrikus Steen
4 Meadows Road
Willingdon/Eastbourne
East Sussex, BN22 0NF
U.K.
(Kapitel 2.3, 6.1 und 7)

Prof. Dr. H. Gg. Wagner
Institut für Physikalische Chemie
Universität Göttingen
Tammannstr. 6
37077 Göttingen
(Kapitel 1 und 2.5)

Dr. Wolfgang Wiechmann
Bundesanstalt für Materialforschung
und -prüfung (BAM)
Unter den Eichen 87
12205 Berlin
(Kapitel 6.5)

Inhalt

Vorwort des Herausgebers	V
Herausgeber und Autoren	VII
1. Explosionsvorgänge	1
<i>H. Gg. Wagner</i>	
1.1 Einleitung.....	1
1.1.1 Quantitative Beschreibung von Verbrennungsprozessen.....	2
1.1.2 Entzündung.....	5
1.1.3. Wärmezündung.....	6
1.1.4 Kettenexplosion – Kettenreaktion.....	11
1.1.5 Zündtemperaturen.....	14
1.1.6 Zündverzugszeiten.....	14
1.2 Ausbreitung von Verbrennungsvorgängen in der Gasphase.....	16
1.2.1 Flammen in vorgemischten Gasen.....	17
1.2.2 Flammentemperatur.....	25
1.2.3 Reaktionszone.....	26
1.2.4 Wechselwirkung von Flammen mit der Wand.....	28
1.2.5 Beschreibung von Detonationen und Stoßwellen.....	29
1.2.5.1 Detonationen, einige Daten.....	34
1.2.6 Detonationsgrenzen.....	38
1.2.7 Sphärische Detonationen.....	40
1.3 Instationäre Flammenausbreitung – Explosionen.....	42
1.3.1 Flammen in Rohren – offene Systeme.....	43
1.3.2 Flammen in geschlossenen Systemen.....	49
1.3.3 Wirkung von Hindernissen im Flammenweg.....	50
1.3.4 Direkter Übergang zur Detonation.....	60
1.4 Explosionen im Freien.....	62
1.4.1 Abbrand einer Gaswolke – ein idealisiertes Modell.....	63
1.4.2 Wirkung von Hindernissen – Unfallanalysen.....	65
1.5 Literatur.....	68
2. Zündvorgänge	75
2.1 Elektrische Zündquellen.....	75
<i>Helmut Krämer und Martin Glor</i>	

2.1.1	Einführung	75
2.1.2	Entzündungsvorgang in explosionsfähiger Atmosphäre	75
2.1.3	Mindestzündenergie brennbarer Gase und Dämpfe	79
2.1.3.1	Konzept der Mindestzündenergie	79
2.1.3.2	Bestimmungsverfahren	80
2.1.3.3	Mindestzündenergien	83
2.1.3.4	Besonderheiten bei schwerbrennbaren Dämpfen	86
2.1.3.5	Bestimmung der Mindestzündenergie durch Laserdurchbruch	86
2.1.3.6	Energieumsatz im Funken	88
2.1.4	Mindestzündenergie brennbarer Stäube	91
2.1.4.1	Bestimmungsverfahren	91
2.1.4.2	Einfluß einer Induktivität im Entladekreis	95
2.1.5	Öffnungs- und Schließfunken in elektrischen Stromkreisen	97
2.1.5.1	Einführung	97
2.1.5.2	Funkenprüfgerät	98
2.1.5.3	Zündgrenzwerte in kapazitiven, induktiven und ohmschen Stromkreisen	99
2.1.5.4	Explosionsschutz elektrischer Geräte	101
2.1.5.4.1	Explosionsschutzkonzept	101
2.1.5.4.2	Zündschutzarten	102
2.1.5.5	Elektrische Ausgleichsströme (Streuströme) in Anlagen	103
2.1.6	Unbeabsichtigter Empfang von Hochfrequenzstrahlung	105
2.1.6.1	Empfangsfähige Strukturen in Anlagen	105
2.1.6.2	Zündgrenzwerte	107
2.1.6.3	Abschätzung der Zündgefahr und Maßnahmen zu ihrer Vermeidung	109
2.1.6.3.1	Gefährdungsbereiche um Sender	109
2.1.6.3.2	Messungen zur Erfassung einer möglichen Zündgefahr	111
2.2	Zündgefahren infolge elektrostatischer Aufladung	112
2.2.1	Grundlagen	112
	<i>Martin Glor</i>	
2.2.2	Systematisches Vorgehen zur Beurteilung von Zündgefahren infolge elektrostatischer Aufladungen	113
	<i>Martin Glor</i>	
2.2.3	Gasentladungen	117
	<i>Martin Glor</i>	
2.2.4	Unterschiedliche Entladungsformen	119
	<i>Martin Glor</i>	
2.2.4.1	Funkenentladungen	119
2.2.4.2	Coronaentladungen	125
2.2.4.3	Büschelentladungen	126
2.2.4.4	Gleitstielbüschelentladungen	132
2.2.4.5	Schüttkegelentladungen	138
2.2.4.6	Gewitterblitzähnliche Entladungen	141
2.2.5	Aufladung von Feststoffen	143
	<i>Martin Glor</i>	
2.2.6	Aufladung von Flüssigkeiten	144
	<i>Helmut Krämer</i>	

2.2.6.1	Ladungsrelaxation in unpolaren Flüssigkeiten.....	144
2.2.6.1.1	Unpolare Flüssigkeiten	144
2.2.6.1.2	Aufladungsprozeß.....	144
2.2.6.1.3	Ladungsrelaxation in unpolaren Flüssigkeiten, Ruheleitfähigkeit	145
2.2.6.2	Zündgefahren beim Befüllen von Tanks.....	148
2.2.6.2.1	Aufladung von Kraftstoffen in Rohren und Filtern.....	148
2.2.6.2.2	Ladungsansammlung	150
2.2.6.2.3	Feld- und Potentialverteilung.....	151
2.2.6.2.4	Bedingungen für das Auftreten zündfähiger Entladungen	152
2.2.6.2.5	Straßentankwagen.....	155
2.2.6.2.6	Große Lagertanks.....	157
2.2.6.3	Rührvorgänge in Zweiphasensystemen	157
2.2.6.4	Versprühen von Flüssigkeiten, Tankreinigung	159
2.2.6.4.1	Aufladungsprozeß.....	159
2.2.6.4.2	Waschen von Supertankern.....	160
2.2.6.4.3	Tankreinigung mit Hochdruckflüssigkeitsstrahlen	163
2.2.7	Aufladungen beim Umgang mit Gasen.....	164
	<i>Helmut Krämer</i>	
2.2.7.1	Allgemeines	164
2.2.7.2	Feuerlöscher.....	164
2.2.7.3	Inertisieren	164
2.2.7.4	Tankreinigung mit Dampf	165
2.2.7.5	Unbeabsichtigtes Freiwerden von komprimierten Gasen	165
2.2.8	Elektrostatische Sprühverfahren	165
	<i>Helmut Krämer</i>	
2.2.8.1	Die Sprühverfahren zur Beschichtung mit Flüssiglack, Pulver und Flock ...	165
2.2.8.2	Handsprüheräte für brennbare Sprühstoffe	166
2.2.8.3	Stationäre elektrostatische Sprühanlagen für brennbare Sprühstoffe.....	168
2.2.8.4	Elektrostatische Sprühanlagen für nichtbrennbare Sprühstoffe	169
2.2.9	Aufladung von Stäuben und Schüttgütern	170
	<i>Martin Glor</i>	
2.2.9.1	Aufladungsprozeß.....	170
2.2.9.2	Brennbare Stäube und Schüttgüter in Abwesenheit von brennbaren Gasen und Dämpfen.....	171
2.2.9.2.1	Allgemeine Hinweise.....	171
2.2.9.2.2	Befüll- und Entleeroperationen (Behälter, Silos etc.)	172
2.2.9.2.3	Flexible Schüttgutbehälter (FIBC).....	173
2.2.9.2.4	Sieben	174
2.2.9.2.5	Mahlen, Mischen	174
2.2.9.2.6	Pneumatischer Transport	175
2.2.9.2.7	Staubabscheiden	175
2.2.9.3	Brennbare Stäube und Schüttgüter in Gegenwart von brennbaren Gasen und Dämpfen.....	175
2.2.9.3.1	Allgemeine Hinweise.....	175
2.2.9.3.2	Eintragen von Stäuben und Schüttgütern in brennbare Lösemittel	176
2.2.9.3.3	Handhaben von lösemittelfeuchten Stäuben und Schüttgütern.....	176

2.2.9.4	Spezielle Stäube und Schüttgüter.....	176
2.3	Zündung durch heiße Oberflächen	177
	<i>Henrikus Steen, Markus Gödde und Heino Bothe</i>	
2.3.1	Einleitung.....	177
2.3.2	Zündvorgang an heißen Oberflächen.....	177
2.3.3	Wichtigste Einflußparameter	184
2.3.3.1	Brennstoffart und Gemischsystem.....	184
2.3.3.2	Geometrie der Oberfläche und Strömungsverhältnisse.....	190
2.3.3.3	Material der heißen Oberfläche	195
2.3.3.4	Druck	196
2.3.4	Normverfahren zur Bestimmung der Zündtemperatur und sicherheitstechnische Konsequenzen	200
2.4	Mechanisch erzeugte Funken.....	205
	<i>Eberhard Behrend und Klaus Ritter</i>	
2.4.1	Allgemeines zu mechanischen Funken	205
2.4.1.1	Schlagfunken	208
2.4.1.2	Schleiffunken.....	208
2.4.2	Zündmechanismen.....	209
2.4.2.1	Partikelgröße und -form.....	209
2.4.2.2	Partikelstruktur	212
2.4.2.3	Kalorische Parameter.....	214
2.4.3	Zündfähigkeit, Zündwilligkeit und Zündwirksamkeit	218
2.4.4	Zünduntersuchungen.....	221
2.4.5	Schlußbemerkungen.....	227
2.5	Adiabatische Kompression von Stoßwellen	228
	<i>H. Gg. Wagner</i>	
2.5.1	Kompressionsvorgang	228
2.5.2	Kompressionsmaschinen	230
2.5.3	Reaktionsabläufe.....	231
2.5.3.1	Zweistufenzündung.....	231
2.5.3.2	Kalte Flammen und Zwischenstufenzündung	239
2.5.3.3	Niedertemperatur-Kohlenwasserstoff-Oxidation.....	240
2.5.4	Stoßwellen	242
2.5.4.1	Entzündung bei höheren Temperaturen	243
2.6	Absorption optischer Strahlung	250
	<i>Heino Bothe und Helmut Krämer</i>	
2.6.1	Einleitung.....	250
2.6.2	Zündmechanismen.....	250
2.6.2.1	Resonante Absorption der Strahlung im explosionsfähigen Gemisch	251
2.6.2.2	Zündung durch Plasmabildung bei fokussierter Laserstrahlung (Durchbruch).....	252
2.6.2.3	Absorption der Strahlung an einem Festkörper	253
2.6.3	Stand vorhandener Richtlinien und Normen.....	256
2.7	Selbstentzündung fester Stoffe (einschließlich Stäube).....	257
	<i>Willi Hensel, Ulrich Krause und Ulrich Löffler</i>	
2.7.1	Grundlagen	257

2.7.2	Stationäre Theorie der Wärmeexplosion.....	258
2.7.3	Instationäre Berechnung von Temperaturfeldern.....	265
2.7.4	Sonderfall: Adiabatische Induktionszeit	271
2.7.5.	Meßtechnische Praxis	276
2.7.6	Verschiedene Einflußgrößen.....	281
2.7.7	SET und technische Regelwerke	283
2.7.8	Schlußfolgerungen und Ausblick.....	287
2.8	Chemische Reaktionen	289
	<i>Winfried Karl</i>	
2.8.1	Einstoffsysteme.....	290
2.8.1.1	Zersetzung.....	291
2.8.1.2	Polymerisation	293
2.8.1.3	Vorschriften für Umgang und Beförderung	294
2.8.2	Mehrstoffsysteme	295
2.8.2.1	Oxidation mit Luft	296
2.8.2.2	Starke Oxidationsmittel	297
2.8.2.3	Calciumcarbid und Acetylen.....	299
2.8.2.4	Metallphosphide und Phosphin.....	301
2.8.2.5	Pyrit (Eisendisulfid).....	302
2.8.2.6	Direkt reduziertes Eisen (DRI)	304
2.8.2.7	Vorschriften für Umgang und Beförderung.....	304
2.9	Literatur	305
2.9.1	Literatur zu Abschnitt 2.1	305
2.9.2	Literatur zu Abschnitt 2.2	307
2.9.3	Literatur zu Abschnitt 2.3	309
2.9.4	Literatur zu Abschnitt 2.4	312
2.9.5	Literatur zu Abschnitt 2.5	312
2.9.6	Literatur zu Abschnitt 2.6	314
2.9.7	Literatur zu Abschnitt 2.7	316
2.9.8	Literatur zu Abschnitt 2.8	317
3.	Eigenschaften reaktionsfähiger Gase und Dämpfe von Flüssigkeiten (Kenngrößen)	319
3.1	Sicherheitstechnische Kenngrößen von Gasen und Dämpfen von Flüssigkeiten	319
	<i>Elisabeth Brandes, Siegmund Dietlen, Hartmut Hieronymus, Ulrich Krause, Bodo Plewinsky, Tammo Redeker, Volkmar Schröder</i>	
3.1.1	Einleitung.....	319
3.1.1.1	Bestimmung und Anwendung Sicherheitstechnischer Kenngrößen (STK) ..	319
3.1.1.2	Angabe von Werten für STK	320
3.1.1.3	Berechnung bzw. Abschätzung von STK	320
3.1.1.4	Anwendung von STK	321
3.1.2	Einteilung von STK	321
3.1.3	Tabellenwerke und Datenbanken für STK.....	323
3.1.4	STK in Regelwerken und Normen.....	323
3.1.5	STK zur Beurteilung der Explosionsfähigkeit von Stoffen	

	(Stoffgemischen).....	323
3.1.5.1	Explosionsgrenzen.....	324
3.1.5.2	Andere Kenngrößen von Explosionsbereichen.....	331
3.1.5.3	Temperatur- und Druckgrenzen für die Instabilität	336
3.1.5.4	Explosionspunkte.....	342
3.1.5.5	Flammpunkt.....	343
3.1.6	STK zur Beurteilung der Entzündbarkeit von Stoffen (Stoffgemischen).....	347
3.1.6.1	Mindestzündenergie, Mindestzündstrom – Mindestzündstromverhältnis.....	347
3.1.6.2	Zündtemperatur.....	350
3.1.7	STK zur Beurteilung der Reaktionsausbreitung	354
3.1.7.1	Grenze der Detonationsfähigkeit	354
3.1.7.2	Ausbreitungsgeschwindigkeit von Deflagrationen („Flammengeschwindigkeit“).....	357
3.1.7.3	Flammendurchschlagsichere Spaltweite.....	362
3.1.8	STK zur Beurteilung der Wirkung einer Explosion.....	365
3.1.8.1	Explosionsdruck und maximaler Explosionsdruck.....	365
3.1.8.2	Zeitlicher Druckanstieg und maximaler zeitlicher Druckanstieg, „K _G -Wert“.....	370
3.1.8.3	Druckwirkung bei Detonationen.....	374
3.1.9	Andere für die sicherheitstechnische Beurteilung wichtige chemisch-physikalische Stoffkenngrößen.....	374
3.2	Physikalisch – chemische Grundlagen zu den Eigenschaften brennbarer Gase und Dämpfe	375
	<i>Karlheinz Hoyer</i>	
3.2.1	Einleitung.....	375
3.2.2	Zusammenstellung von allgemeinen Grundlagen.....	377
3.2.2.1	Zustandsgleichung von Gasen	377
3.2.2.2	Phasengleichgewicht für Reinstoffe und Gemische.....	378
3.2.2.3	Chemisches Gleichgewicht.....	380
3.2.2.4	Reaktionskinetik	381
3.2.2.5	Transportprozesse	385
3.2.2.6	Literaturübersicht „Verbrennungsvorgänge“.....	387
3.2.3	Flammen: Reaktionen bei hohen Temperaturen	387
3.2.3.1	Vorbemerkungen	387
3.2.3.2	Reaktionsmechanismus und Flammengeschwindigkeit.....	391
3.2.3.3	Inhibitoren / Promotoren.....	398
3.2.3.4	Grenzen der Flammenausbreitung	400
3.2.3.5	Flammengeschwindigkeit und Zündung, Mindestzündenergie, Löschabstand	406
3.2.4	Oxidation bei niedrigen Temperaturen	410
3.2.4.1	Einige experimentelle Befunde.....	410
3.2.4.2	Kettenexplosion	415
3.2.4.3	Wärmeexplosion	426
3.3	Literatur	434
3.3.1	Literatur zu Abschnitt 3.1	434
3.3.2	Literatur zu Abschnitt 3.2	437

4	Eigenschaften brennbarer Staube (Kenngroen)	443
	<i>Willi Hensel, Kenneth L. Cashdollar</i>	
4.1	Einleitung.....	443
4.2	Abgelagerte Staube (Brandkenngroen).....	445
4.2.1	Brennverhalten.....	445
4.2.2	Mindestzundtemperatur einer Staubschicht auf einer heißen Oberflache (Glimmtemperatur)	446
4.2.3	Selbstentzundungsverhalten von Staubschuttungen	448
4.2.4	Deflagrationsfahigkeit	452
4.2.5	Schlagempfindlichkeit	452
4.2.6	Kenngroen von Schwelgasen aus thermisch belasteten Staubschuttungen	453
4.3	Aufgewirbelte Staub-Luft-Gemische (Explosionskenngroen).....	456
4.3.1	Maximaler Explosionsdruck und maximaler zeitlicher Druckanstieg von Staubexplosionen	457
4.3.1.1	Einfluß unterschiedlicher Startbedingungen	463
4.3.1.2	Probleme mit der Übertragbarkeit auf praktische, betriebliche Verhaltnisse	467
4.3.1.3	Laminare Verbrennungsgeschwindigkeit	468
4.3.2	Untere Explosionsgrenze	472
4.3.3	Sauerstoffgrenzkonzentration	476
4.3.4	Die Mindestzundtemperatur einer Staubwolke in einem heißen Ofen (Zundtemperatur).....	479
4.3.5	Mindestzundenergie einer Staubwolke	483
4.4	Literatur	486
5	Eigenschaften brennbarer Nebel und Schaume	489
5.1	Brennbare Nebel und Spruhstrahlen	489
	<i>Hans Forster</i>	
5.1.1	Einleitung.....	489
5.1.1.1	Begriffsbildungen	489
5.1.1.2	Gefahrdungen in der Praxis	490
5.1.2.	Erzeugung von Nebeln und Spruhstrahlen.....	491
5.1.2.1	Physikalische Besonderheiten.....	491
5.1.2.2	Erzeugungsmethoden in der Praxis.....	492
5.1.3.	Charakterisierung von Nebeln und Spruhstrahlen	493
5.1.3.1	Dispersionsgrad	494
5.1.3.2	Massenkonzentration	495
5.1.3.3	Relativbewegung der Phasen	496
5.1.4.	Verbrennung in Nebeln und Spruhstrahlen.....	497
5.1.4.1	Grundlagen	497
5.1.4.2	Untere Explosionsgrenze	500
5.1.4.3	Flammgeschwindigkeiten	504
5.1.4.4	Detonationsvorgange	505

5.1.4.5	Wirksamkeit von Zündquellen.....	506
5.1.4.5.1	Elektrische Funken	506
5.1.4.5.2	Mechanische Funken	509
5.1.4.5.3	Heiße Oberflächen	509
5.1.4.6	Maximaler Explosionsdruck	511
5.1.4.7	Explosionsdruck-Anstiegsrate	513
5.1.4.8	Brandtechnische Klassifizierung	515
5.1.4.9	Sichere Grenzspaltweiten	515
5.1.5.	Schutzmaßnahmen	516
5.1.5.1	Vermeiden explosionsfähiger Tröpfchensuspensionen.....	516
5.1.5.2	Vermeiden von Zündquellen.....	516
5.1.5.3	Minderung der Auswirkungen von Bränden und Explosionen.....	517
5.2	Heterogene Systeme aus organischen Flüssigkeiten und Sauerstoff.....	518
	<i>Bodo Plewinsky, Hartmut Hieronymus</i>	
5.2.1	Einleitung.....	518
5.2.2	Dochtdetonationen	520
5.2.3	Blasenexplosionen	524
5.2.3.1	Blasenexplosionen durch Stoßwellen- bzw. Detonationswellenzündung.....	524
5.2.3.2	Blasenexplosionen durch Glühdrahtzündung	525
5.2.4	Schaumdetonationen	528
5.2.4.1	Modellschaumdetonationen	529
5.2.4.2	Detonationsbereiche in Modellschäumen	529
5.2.4.3	Detonationsgeschwindigkeit von Modellschaumdetonationen.....	530
5.2.4.4	Detonationsanlaufstrecken in Modellschäumen	534
5.2.4.5	Detonationsdrücke in Modellschäumen.....	534
5.2.4.6	Semi-empirische Modellierung der Schaumdetonationen	535
5.2.4.7	Reale Schäume am Beispiel von Cyclohexanschäumen	536
5.2.5	Oberflächendetonationen	538
5.2.5.1	Eindimensionale Oberflächendetonationen	539
5.2.5.2	Zweidimensionale Oberflächendetonationen.....	546
5.2.6	Schlußbetrachtung	555
5.2.6.1	Sicherheitskonzept.....	555
5.2.6.2	Sicherheitstechnische Kenngrößen	556
5.3	Literatur	557
5.3.1	Literatur zu Abschnitt 5.1	557
5.3.2	Literatur zu Abschnitt 5.2	559
6	Maßnahmen gegen Explosionsvorgänge.....	563
6.1	Der Explosionsdruckverlauf in Behältern für deren Auslegung	563
	<i>Henrikus Steen</i>	
6.1.1	Deflagrationen im geschlossenen Raum.....	564
6.1.1.1	Zeitlicher Druckverlauf.....	564
6.1.1.2	Maximaler zeitlicher Druckanstieg von Deflagrationen	568
6.1.1.3	Maximaler Enddruck von Deflagrationen.....	569
6.1.2	Detonationen.....	572

6.1.3	Belastungen der Raumwand durch Gasexplosionen	575
6.2	Explosionsdruckentlastung	577
	<i>Martin Hattwig, Ulrich Krause und Christophe Proust</i>	
6.2.1	Einführung	577
6.2.1.1	Vorbemerkung	577
6.2.1.2	Prinzip der Schutzmaßnahme	578
6.2.1.3	Bedeutung der Schutzmaßnahme	579
6.2.2	Methoden zur Bestimmung der erforderlichen Entlastungsfläche	581
6.2.2.1	Einleitung	581
6.2.2.2	Einstufige Methoden	581
6.2.2.3	Grundannahmen und Voraussetzungen der einstufigen Methoden	584
6.2.2.4	Nachteile der einstufigen Methoden	585
6.2.2.5	Methoden auf der Basis von Modellen	586
6.2.3	Physikalische Grundlagen	587
6.2.3.1	Zeitlicher Druckverlauf	587
6.2.3.1.1	Charakteristische Kenngrößen (p_{red} , $(dp/dt)_{red}$, A_{DE} , $A_{DE}/V^{2/3}$)	587
6.2.3.1.2	Zeitlicher Druckverlauf von druckentlasteten Explosionen als Folge der Vorgänge Energieakkumulation (chemische Reaktion) und Energieabfuhr (mit austretendem Massenstrom)	589
6.2.3.2	Einflußgrößen auf p_{red} und $(dp/dt)_{red}$	592
6.2.3.2.1	Konzentrationsverteilung	592
6.2.3.2.2	Geometrie	594
6.2.3.2.3	Lage der Zündquelle	596
6.2.3.2.4	Turbulenz	597
6.2.3.2.5	Ausblaskanäle	599
6.2.3.2.6	Druckentlastung verbundener Behälter	600
6.2.3.3	Effekte im Außenraum	602
6.2.3.4	Rückstoß	605
6.2.3.5	Rohrleitungen	605
6.2.4	Bauarten von Druckentlastungseinrichtungen	606
6.2.4.1	Einleitung	606
6.2.4.2	Einrichtungen mit nicht wieder verwendbaren Elementen	607
6.2.4.3	Einrichtungen mit wieder verwendbaren Elementen	610
6.2.4.4	Sonderformen	611
6.2.5	Vorschriften	613
6.2.5.1	VDI-Richtlinie 3673	613
6.2.5.2	NFPA-Richtlinie 68	614
6.2.5.3	AFNOR-Norm U 54-540	614
6.2.5.4	Entwurf einer europäischen Norm über die Auslegung von Druckentlastungssystemen für Staubexplosionen	615
6.2.5.5	Entwurf einer europäischen Norm über Anforderungen zur technischen Beschaffenheit von Druckentlastungseinrichtungen	615
6.2.6	Zukünftige Entwicklungen	616
6.2.6.1	Dünnwandige Umschließungen	616
6.2.6.2	Druckentlastung von Gasexplosionen	616
6.2.6.3	Druckentlastung bei Strömungshindernissen	617

6.2.6.4	Druckentlastung verbundener Behälter.....	617
6.2.6.5	Schlußbemerkung	617
6.3	Explosionsunterdrückung	618
	<i>Richard Siwek</i>	
6.3.1	Einleitung.....	618
6.3.2	Definition.....	618
6.3.3	Beschreibung des Unterdrückungssystems.....	619
6.3.3.1	Detektoren/Sensoren.....	619
6.3.3.2	HRD-Löscher.....	622
6.3.3.3	Löschpulver	629
6.3.3.4	Kontroll- und Anzeigeeinheit (CIE)	631
6.3.4	Wirkungsmechanismen.....	633
6.3.5	Dimensionierung von Explosionsunterdrückungssystemen.....	634
6.3.5.1	Allgemeines	634
6.3.5.2	Definition der Gefährdung.....	635
6.3.5.3	Auslegung für Behälter mit $L/D < 2$ (kompakte Behälter)	637
6.3.5.4	Auslegung für Behälter mit $2 \leq L/D \leq 10$ (langgestreckte Behälter)	638
6.3.5.5	Computerunterstützte Auslegung.....	639
6.3.6	Anwendungsgrenzen der Unterdrückungssysteme	640
6.3.7	Anwendungsbeispiele	641
6.3.8	Schlußbetrachtung	644
6.4	Explosionsentkopplung	647
	<i>Richard Siwek</i>	
6.4.1	Einleitung.....	647
6.4.2	Entkopplungssysteme	648
6.4.2.1	Zellenradschleuse	649
6.4.2.2	Löschmittelsperre	650
6.4.2.3	Explosionsschutzschieber/Explosionsschutzklappe.....	652
6.4.2.4	Explosionsschutzventil	653
6.4.2.4.1	Selbstbetätigtes Explosionsschutzventil	653
6.4.2.4.2	Fremdbetätigtes Explosionsschutzventil.....	654
6.4.2.5	Entlastungsschlot	655
6.4.2.6	Doppelschiebersystem	657
6.4.2.7	Produktvorlage.....	657
6.4.2.8	Schneckenförderer	658
6.4.2.9	Löschmittelsperre in Kombination mit Entlastungsschlot	658
6.4.3	Dimensionierungsgrundlagen	659
6.4.3.1	Basisparameter.....	659
6.4.3.2	Detektor-/Sensorwahl	661
6.4.3.3	Einbaudistanzen	662
6.4.3.3.1	Löschmittelsperre	662
6.4.3.3.2	Explosionsschutzschieber, -klappe, -ventil.....	663
6.4.3.4	Löschpulvermenge M_s für Löschmittelsperren.....	664
6.4.3.4.1	Brennbare Stäube.....	664
6.4.3.4.2	Brenngase	666
6.4.3.5	Entlastungsschlot	666

6.4.4	Anwendungsbeispiele	667
6.4.5	Schlußbetrachtung	672
6.5	Flammendurchschlagsicherungen	673
	<i>Hans Förster, Wolfgang Wiechmann</i>	
6.5.1	Einleitung	673
6.5.2.	Grundsätzliche Wirkungsweisen	674
6.5.2.1	Flammenlöschen in engen Spalten.....	674
6.5.2.2	Aufhalten von Flammen durch Tauchvorlagen.....	676
6.5.2.3	Aufhalten von Flammen durch hohe Ausströmgeschwindigkeit	677
6.5.2.4	Flammenlöschen durch Flüssigkeitsvorlagen	678
6.5.3.	Spezifische Belastungsarten und Klassifizierungen.....	678
6.5.3.1	Deflagrationen	679
6.5.3.2	Detonationen.....	679
6.5.3.3	Stabilisiertes Brennen	683
6.5.4.	Beispiele zum konstruktiven Aufbau der wesentlichen Grundtypen von Flammendurchschlagsicherungen.....	683
6.5.4.1	Statische Flammendurchschlagsicherungen	684
6.5.4.2	Flammendurchschlagsicherungen mit nasser Flammensperre.....	688
6.5.4.3	Flammendurchschlagsicherungen mit hoher Ausströmgeschwindigkeit	690
6.5.5	Verfahrenstechnische Einrichtungen	691
6.5.5.1	Erfassung stabilisierter Flammen.....	691
6.5.5.2	Einrichtungen zur Dauerbrandsicherheit	692
6.5.5.3	Meß- und Regeleinrichtungen an Tauchsicherungen.....	692
6.5.5.4	Meßeinrichtungen an rückzündsicheren Brennereinführungen	693
6.5.5.5	Maßnahmen zur Funktionssicherung	693
6.5.6	Prüfungen.....	694
6.5.6.1	Mechanische Stabilität.....	694
6.5.6.2	Dichtheit	695
6.5.6.3	Strömungsdruckverlust	695
6.5.6.4	Flammensperrende Wirkung.....	695
6.5.7	Einsatzbedingungen	698
6.5.7.1	Explosionsgruppe der Gase und Dämpfe.....	699
6.5.7.2	Druck und Temperatur der Gemische.....	699
6.5.7.3	Rohrgeometrien	700
6.5.7.4	Spezielle Aspekte zur Funktionssicherheit	701
6.5.8	Einsatzbeispiele	701
6.5.8.1	Absicherung eines Lagertanks für brennbare Flüssigkeiten	701
6.5.8.2	Absicherung in einer thermischen Nachverbrennungsanlage	702
6.6	Literatur	704
6.6.1	Literatur zu Abschnitt 6.1	704
6.6.2	Literatur zu Abschnitt 6.2	705
6.6.3	Literatur zu Abschnitt 6.3	707
6.6.4	Literatur zu Abschnitt 6.4	709
6.6.5	Literatur zu Abschnitt 6.5	710

7	Grundsätze der Erfassung und Bewertung von Explosionsrisiken	713
	<i>Henrikus Steen</i>	
7.1.	Grundlegende Begriffe der Sicherheitstechnik	714
7.2	Explosionsrisiken.....	720
7.2.1	Wahrscheinlichkeitsprinzip als Grundlage	720
7.2.2	Primärer Explosionsschutz	723
7.2.2.1	Allgemeines	723
7.2.2.2	Be- und Entlüftung.....	724
7.2.2.3	Inertisierung.....	728
7.2.2.4	Gaswarneinrichtungen	730
7.2.3	Sekundärer Explosionsschutz	731
7.2.3.1	Grundsätze	731
7.2.3.2	Art und Größe der explosionsgefährdeten Bereiche (Zonen)	734
7.2.3.3	Maßnahmen gegen Zündgefahren.....	737
7.2.4.	Schutz gegen Explosionswirkungen in den explosionsgefährdeten Bereichen	739
7.2.5	Vorschriften für den Explosionsschutz in den explosionsgefährdeten Bereichen	741
7.2.6	Schutz gegen Explosionswirkungen in Fernbereichen.....	743
7.2.7	Verfahren zur Ermittlung und Beschreibung von Explosionsrisiken.....	744
7.3	Literatur	745
8	Stichwortverzeichnis.....	751

1 Explosionsvorgänge

H. Gg. Wagner

1.1 Einleitung

Die Entwicklung der menschlichen Kultur ist sehr eng verbunden mit dem Gebrauch und der Nutzenanwendung des Feuers durch den Menschen [1]. Noch heute kommen z. B. über 90% der bereitgestellten Energie aus Verbrennungsprozessen, wobei sich die Zahl der – auch für andere Zwecke – angewandten Verbrennungsverfahren in den letzten Jahrzehnten eher etwas reduziert hat. Bemerkenswert an dieser über Tausende von Generationen gehenden Entwicklung ist das hohe Maß an „Betriebssicherheit“, das der Mensch im Umgang mit Verbrennungsprozessen seit langem zu erreichen und zu halten in der Lage war und ist. Natürlich gibt es keine hundertprozentige Sicherheit, und wir hören gelegentlich von Schadensfeuern oder von Explosionsunglücken, von Verbrennungsprozessen, die außer Kontrolle geraten sind, von Vorgängen, die unerwartet und immer unerwünscht auftreten. Auch wenn deren Anteil am „Gesamtumsatz“ in Verbrennungsprozessen sehr klein ist, so kann doch die lokale Auswirkung verheerend sein. Es ist somit eine wirklich lohnenswerte Aufgabe, dafür zu sorgen, daß solche Ereignisse vermieden werden. Diese Abhandlung soll zur Verhütung von Explosionsunglücken beitragen.

Explosionen können bei der exothermen chemischen Umsetzung eines gasförmigen Brennstoff-Luft-Gemischs entstehen, ebenso können Mischungen aus Staub oder Brennstofftröpfchen mit Luft zu Explosionen führen. Dies sind Gemische, wie sie in technischen Verbrennungsanlagen, in Feuerungen, Brennkammern oder Motoren benutzt werden. Weiter gibt es auch exotherme Verbindungen, die ohne Beisein eines Oxidationsmittels in der Gasphase explodieren können. Als Beispiele seien hier Ozon, Azetylen und Azomethan genannt. Auch andere Oxidationsmittel als Luft, etwa reiner Sauerstoff, Halogene wie Fluor oder Chlor sowie Stickoxide u. a. können, gemischt mit Brennstoff, Anlaß zu sehr heftigen Explosionen sein. Man kann davon ausgehen, daß jeder Stoff oder jede Stoffkombination, die zu (hinreichend) exothermer Reaktion befähigt ist, unter geeigneten Bedingungen auch eine Explosion hervorrufen kann.

Für technische Verbrennungsprozesse bedient man sich zweier verschiedener Arten von Flammen, der vorgemischten Flammen und der Diffusionsflammen. In Brennkammern, in Heizungsbrennern, bei Gas- oder Ölbrennern wird ebenso wie in einer Kerzenflamme mit Diffusionsflammen gearbeitet; Brennstoff und Luft werden getrennt zugeführt. Den Umsatz bestimmt die Mischung beider Komponenten. Der Verbrennungsprozeß läßt sich relativ leicht regeln und stabil halten.

Vorgemischte Flammen sind z. B. vom Bunsenbrenner her bekannt: Brennstoff und

Oxidationsmittel treten vorgemischt in die auf dem Brenner bei geeigneter Strömungsgeschwindigkeit des Gemisches stabilisierte Flammenzone ein. Vorgemischte Flammen werden bei Schweißbrennern oder instationär in Gas- und Benzinmotoren verwendet. Es ist unmittelbar einleuchtend, daß eine vorgemischte Flamme schwerer unter Kontrolle zu halten ist als eine Diffusionsflamme. Anders als bei Diffusionsflammen können viele instationäre Prozesse in Verbindung mit der Ausbreitung „vorgemischter Flammen“ bei vorgegebenen Anfangs- und Randbedingungen auftreten.

Damit eine Flamme entstehen kann, muß erfolgreich Entzündung stattgefunden haben. Für die Entzündung eines brennbaren Systems gibt es viele verschiedene Möglichkeiten, die im folgenden aufgeführt werden.

Eine durch erfolgreiche Zündung erzeugte Flamme kann, wie bereits erwähnt, unter entsprechenden Umständen stationär brennen, etwa eine Kerzenflamme oder eine Bunsenbrennerflamme. Unter bestimmten Bedingungen kann sich die Flamme in einem vorliegenden Gemisch räumlich ausbreiten, sie kann bei geeigneten Anfangs- und Randbedingungen in eine Explosion oder eine Detonation übergehen. Die treibende Kraft ist dabei die chemische Reaktion und die durch sie pro Zeit- und Volumeneinheit freigesetzte Energie, die durch geeignete Bedingungen wie Verdämmung, Turbulenz, Strömungshindernisse und viele andere Effekte beeinflußt und erhöht werden kann. Es sind diese Effekte, die in Verbindung mit dem Explosionsschutz besondere Aufmerksamkeit verdienen, besonders immer dann, wenn man den alten Grundsatz des Explosionsschutzes – „Zündquellen unter allen Umständen vermeiden“ – nicht sicher einhalten kann.

Für eine eingehende Behandlung von Verbrennungsvorgängen und für die Darstellung vieler Verbrennungsphänomene, die hier nicht oder nur kurz angesprochen werden können, sei verwiesen auf die regelmäßig erscheinenden Bände des Symposium (International) on Combustion, The Combustion Institute, Pittsburgh und natürlich auf die Unterlagen der der Sicherheitstechnik gewidmeten Tagungen. Weiter gibt es Spezialzeitschriften etwa Combustion and Flame, Combustion Science and Technology, Journal of hazardous Materials u. a., sowie Bücher, die der Verbrennung gewidmet sind, darunter die älteren wie W. Jost, Explosions- und Verbrennungsvorgänge in Gasen [2], W.A. Bone und D.T.A. Townend, Flame and Combustion in Gases [3] und neuere Darstellungen wie B. Lewis und G. von Elbe, Combustion Flames and Explosions in Gases [4], J. Warnatz, U. Maas, R.W. Dibble, Combustion [5], K. Görner, Technische Verbrennungssysteme [6] und andere, die z. T. in der Literaturliste [6] aufgeführt sind, sowie R.M. Fristrom, Flame Structure and Processes [7] und die Bücher von Gaydon [8].

1.1.1 Quantitative Beschreibung von Verbrennungsprozessen

Für die quantitative Beschreibung von Verbrennungsprozessen geht man von den Navier-Stokes-Gleichungen aus. Zusätzlich wird die Wirkung der chemischen Reaktion als Wärmequelle und als Senke bzw. Quelle von Atomen, Molekülen und Radikalen unter Wahrung der Atomerhaltung berücksichtigt. Diese Gleichungen wurden nach Vorarbeiten u. a. von Jouguet von Damköhler aufgestellt [9]; und sie sollen hier kurz in der klassischen Form angegeben und erläutert werden.

Dazu wollen wir ein stark vereinfachtes eindimensionales System betrachten, in dem eine ebene Flamme in ein von links nach rechts strömendes brennbares Gas läuft (Abb. 1-1).

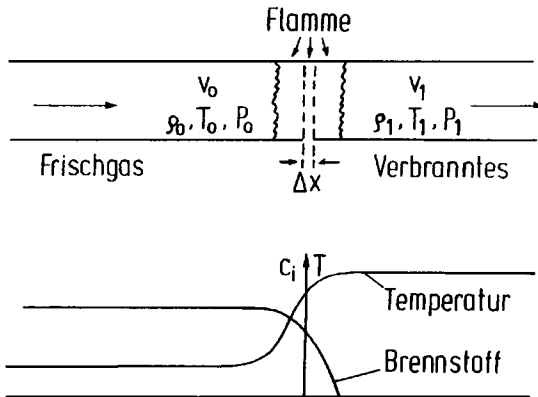


Abb. 1-1. Stationäre Flamme: Das Frischgas strömt mit der Geschwindigkeit v_0 , der Dichte ρ_0 , der Temperatur T_0 bei dem Druck P_0 von links in die Flamme und mit der Geschwindigkeit v_1 (entsprechend ρ_1 , T_1 und P_1) nach rechts aus der Flamme ab. Δx bezeichnet ein Element der Dicke Δx der Flammenzone. Darunter ist schematisch der zugehörige Verlauf der Brennstoffkonzentration und der Temperatur aufgetragen.

Dabei sind v_0 , ρ_0 , T_0 , P_0 die Strömungsgeschwindigkeit, Dichte, Temperatur und der Druck des unverbrannten Gases v_1 , ρ_1 , T_1 , und P_1 die entsprechenden Größen im verbrannten Gas. Wird im Modell v_0 so gewählt, daß die Flamme an einem festen Ort bleibt und ist die Strömung laminar, dann entspricht v_0 genau der mit Λ_0 bezeichneten sog. laminaren Flammengeschwindigkeit, der Geschwindigkeit, mit der sich die Flamme relativ zum Frischgas bewegt und die eine charakteristische Eigenschaft des Gemisches ist. Es gilt dann $\rho_0 v_0 = \rho_0 \Lambda_0 = \rho_1 v_1$. Da ρ_1 im verbrannten Gas kleiner ist als die Dichte im unverbrannten Gas, bei Kohlenwasserstoff-Luft-Mischungen etwa um den Faktor 6 bis 8, ist v_1 entsprechend größer als v_0 bzw. Λ_0 .

Für ein stationäres System, bei dem, wie angenommen, die Flamme an einem festen Ort bleibt, müssen dann die zeitlichen Ableitungen wie $\partial T/\partial t$ oder $\partial c_i/\partial t$ an jeder Stelle gleich 0 sein (c_i ist die Konzentration der Komponente i). Die gesamte zeitliche Änderung der Temperatur T (und der Konzentrationen) an einer Stelle setzt sich zusammen aus

- dem Leitungsanteil wie Wärmeleitung (der Wärmestrom ist $j = -\lambda(\partial T/\partial x)$, $\lambda =$ Wärmeleitfähigkeit) bzw. Diffusion $j = -D(\partial c_i/\partial x)$, $D =$ Diffusionskoeffizient
- dem Strömungsanteil – das Ausgangsgemisch ändert in der Reaktionszone seine Geschwindigkeit,
- dem Einfluß der chemischen Reaktion als Quelle für Wärme sowie als Quelle und Senke für Teilchen.

Man kann damit die Gleichungen für T und c_i aufstellen, indem man ein Element der Dicke Δx aus der Flamme herausgreift (s. Abb. 1-1) und die Änderung z. B. von T inner-

halb dieses Bereichs durch die genannten drei Effekte bestimmt. Für den Einfluß der Wärmeleitung ergibt das z. B.:

$$j_x(T) - j_{x+\Delta x}(T) = -\lambda \left(\frac{\partial T}{\partial x} \right)_x - \left(-\lambda \left(\frac{\partial T}{\partial x} \right)_x - \frac{\partial}{\partial x} \lambda \left(\frac{\partial T}{\partial x} \right) \Delta x \right) = \frac{\partial}{\partial x} \lambda \frac{\partial T}{\partial x} \Delta x$$

Diese Ableitung sei hier nur angedeutet. Für eine genaue Herleitung sei auf die Literatur [2, 5, 6, 9, 10] verwiesen. Man erhält damit als Gleichung für das Temperaturprofil in der Flamme

$$\left(\frac{\partial (\rho c_p T)}{\partial t} \right) = \frac{\partial}{\partial x} \lambda \frac{\partial T}{\partial x} - \frac{\partial}{\partial x} (c_p \rho v T) + \Delta_R H \cdot K_T \quad (1-1)$$

und im stationären System ist diese Gl. 1-1 (sowie 1-2) gleich 0.

Hier ist c_p die spezifische Wärme, v die Strömungsgeschwindigkeit, $\Delta_R H$ die Reaktionsenthalpie und K_T die Reaktionsgeschwindigkeit. Genau die gleichen Überlegungen muß man jetzt auch für jede im System auftretende Teilchenart wie Brennstoff, Oxidationsmittel, Zwischen- und Endprodukte anstellen, wobei die chemische Reaktion jetzt Quelle und Senke für Teilchen ist. Der der Wärmeleitung entsprechende Transportvorgang für Teilchen ist die Diffusion. Dabei darf nicht übersehen werden, daß mit dem Transport von Teilchen auch Enthalpietransport verbunden ist. Die entsprechende, vereinfacht dargestellte Gleichung für den Konzentrationsverlauf der Teilchensorte i lautet dann

$$\left(\frac{\partial c_i}{\partial t} \right) = \frac{\partial}{\partial x} D_i \frac{\partial c_i}{\partial x} - \frac{\partial (v \cdot c_i)}{\partial x} - v_i K_i = 0 \quad (1-2)$$

Hier ist c_i die Konzentration der Teilchensorte i , v_i stöchiometrischer Koeffizient, v Strömungsgeschwindigkeit und K_i die Bildungsgeschwindigkeit der Teilchensorte i .

Für eine Erweiterung dieser Gleichungen auf drei Dimensionen, die sich leicht realisieren läßt, sei auf die Literatur [2, 5, 10] verwiesen, ebenso für die genauere Berücksichtigung weiterer auftretender Effekte wie Thermodiffusion, Diffusionsthermoeffekt etc., die für unsere Betrachtungen meist keine große Rolle spielen. Eine andere Form der Gleichungen, die sich für Rechnungen und für die Berücksichtigung der genannten weiteren Effekte als zweckmäßig erweist, ist ebenfalls in der Literatur [5, 10] gegeben.

Wenn nicht stationäre, sondern zeitabhängige Verbrennungsprozesse beschrieben werden sollen, dann sind diese Gleichungen durch die zeitlichen Ableitungen zu ergänzen, wie sie oben in Klammer angefügt sind (s. Gl. 1-1, 1-2). Mit diesen Gleichungen sowie der Massen- und Impulserhaltung lassen sich dann nicht nur stationäre Flammen, sondern praktisch alle Verbrennungsprozesse zumindest prinzipiell beschreiben. Die Verfügbarkeit leistungsfähiger Computer und sehr viel bessere Kenntnisse über die Reaktionsabläufe, die zunehmend verfügbar werden, bietet jetzt auch reelle Chancen, Lösungen für diese Systeme meist hochgradig nichtlinearer Gleichungen zu berechnen, auf

die noch einzugehen sein wird (s. dazu z. B. 25th, 26th, 27th und 28th Symposium on Combustion).

Einige nützliche Beziehungen lassen sich aber schon aus Dimensionsbetrachtungen erhalten. Für die laminare Flammengeschwindigkeit Λ_0 gilt, wenn δ die Dicke der Reaktionszone und τ die effektive Reaktionszeit in der Flamme ist, $\Lambda_0 \sim \delta/\tau$. Mit der Temperaturleitfähigkeit $\kappa = \lambda/\rho c_p$ (cm²/s) (λ ist die Wärmeleitfähigkeit) erhält man aus der Gleichung für $\Lambda_0 \sim \sqrt{\kappa/\tau}$. Aus den Gleichungen für die Konzentrationsprofile folgt analog [2, 4]

$$\Lambda_0 \sim \sqrt{D/\tau} \sim D/\delta \sim \sqrt{\kappa/\tau} \sim \delta/\tau \quad (1-3)$$

Man sieht daraus z. B., daß eine Erhöhung der Ausgangstemperatur, durch die κ bzw. D_i etwa proportional $T^{1,75}$ ansteigt und τ meist verkleinert wird, den Wert von Λ_0 ansteigen läßt. Wird der Transport durch Temperaturleitung bzw. Diffusion erhöht, wie das z. B. durch Turbulenz bewirkt wird, dann steigt ebenfalls die Flammengeschwindigkeit an [7, 11]. Auch für Lösch- und Entzündungsvorgänge lassen sich entsprechende Zusammenhänge ableiten.

1.1.2 Entzündung

Die Entzündung eines Gemischs kann auf mannigfache Weise ausgelöst werden: durch eine Zündflamme, einen Funken, durch geeignete Katalysatoren, in manchen Fällen durch Licht, durch eine heiße Wand, durch Kompression des Gemischs usw. Damit ein Gemisch entzündet werden kann, also eine Explosion eingeleitet wird, müssen bestimmte Bedingungen sowohl bezüglich der Versuchsanordnung als auch bezüglich des Gemischs selbst erfüllt sein. Als Energiequelle für Verbrennungsvorgänge dienen exotherme, d. h. wärmeliefernde, chemische Reaktionen (endotherme Reaktionen können keine Explosion erzeugen). Damit eine chemische Reaktion explosionsartig verläuft, ist es erforderlich, daß die Geschwindigkeit, mit der die Reaktion abläuft, hinreichend groß werden kann [2, 4–6].

Es ist bekannt, daß im allgemeinen die Geschwindigkeit chemischer Reaktionen mit steigender Temperatur T stark zunimmt. Weiter ist bekannt, daß die Geschwindigkeit der chemischen Reaktion von den Konzentrationen c_i der Reaktanden abhängt. Ferner können während einer Reaktion Zwischenprodukte (Radikale, aktive Teilchen im Gegensatz zu stabilen Produkten) auftreten, die eine chemische Umsetzung erheblich beschleunigen können [11–14]. Die Reaktionsgeschwindigkeit (RG) läßt sich damit als Funktion von Temperatur und Konzentration beschreiben.

$$RG = RG(T, c_i, \dots) \quad (1-4)$$

Für wirkliche Systeme kann dieser Ausdruck recht kompliziert sein; oft ist er nur unvollständig bekannt.

In einem Konzentrations- und Temperaturbereich, der für die Selbstzündung eines

Gemischs interessiert, wächst die Reaktionsgeschwindigkeit stärker als linear mit der Temperatur bzw. der Konzentration der aktiven Teilchen. Die Werte von c_i und T in einer bestimmten Phase der chemischen Reaktion hängen von der Vorgeschichte ab und sind meist nicht unabhängig voneinander. Das erschwert eine theoretische Behandlung des Problems. Es lassen sich zwei Grenzfälle herauschälen:

- **Wärmezündung oder Wärmeexplosion:** In diesem Fall ist für die Zündung im wesentlichen die Abhängigkeit der Reaktionsgeschwindigkeit von der Temperatur von Bedeutung [15–19]. Ausgangspunkt für die Beschreibung ist Gl. 1-1.
- **„Kettenexplosion“:** Hier erfolgt die Reaktionsbeschleunigung die zur Zündung führt durch aktive Teilchen, durch Radikale und deren Vermehrung [2, 4, 17–19]. Ausgangspunkt für die Beschreibung ist Gl. 1-2.

1.1.3 Wärmezündung

Die Erfahrung hat gezeigt, daß sich die Abhängigkeit der Reaktionsgeschwindigkeit von der Temperatur in dem interessierenden Bereich häufig durch einen Ausdruck der Form [14]

$$RG \sim \exp\left(-\frac{E}{RT}\right) \quad (1-5)$$

(E = scheinbare Aktivierungsenergie, R = Gaskonstante) annähern läßt, d. h., die Reaktionsgeschwindigkeit steigt mit wachsender Temperatur stark an. Wir wollen fragen, wie das die Wärmeproduktion in einem vorgegebenen Volumen V beeinflusst. Dazu betrachten wir die einfache Reaktion



(A, B Reaktanden, C, D Produkte; $\Delta_R H$ Reaktionsenthalpie).

Pro Formelumsatz wird die Reaktionsenthalpie $\Delta_R H$ frei, damit wird die Geschwindigkeit der Wärmeproduktion \dot{q}_R im Volumen V

$$\dot{q}_R = \frac{dq_R}{dt} = V \cdot \Delta_r H \frac{dc_c}{dt} \quad (1-7)$$

wobei dc_c/dt , die Bildungsgeschwindigkeit von c_c , gegeben sei durch

$$\frac{dc_c}{dt} = k \cdot c_A \cdot c_B \cdot e^{-\frac{E}{RT}} \quad (1-8)$$

($k \cdot \exp -\frac{E}{RT}$ = Geschwindigkeitskonstante, c_A, c_B Konzentrationen von A und B).