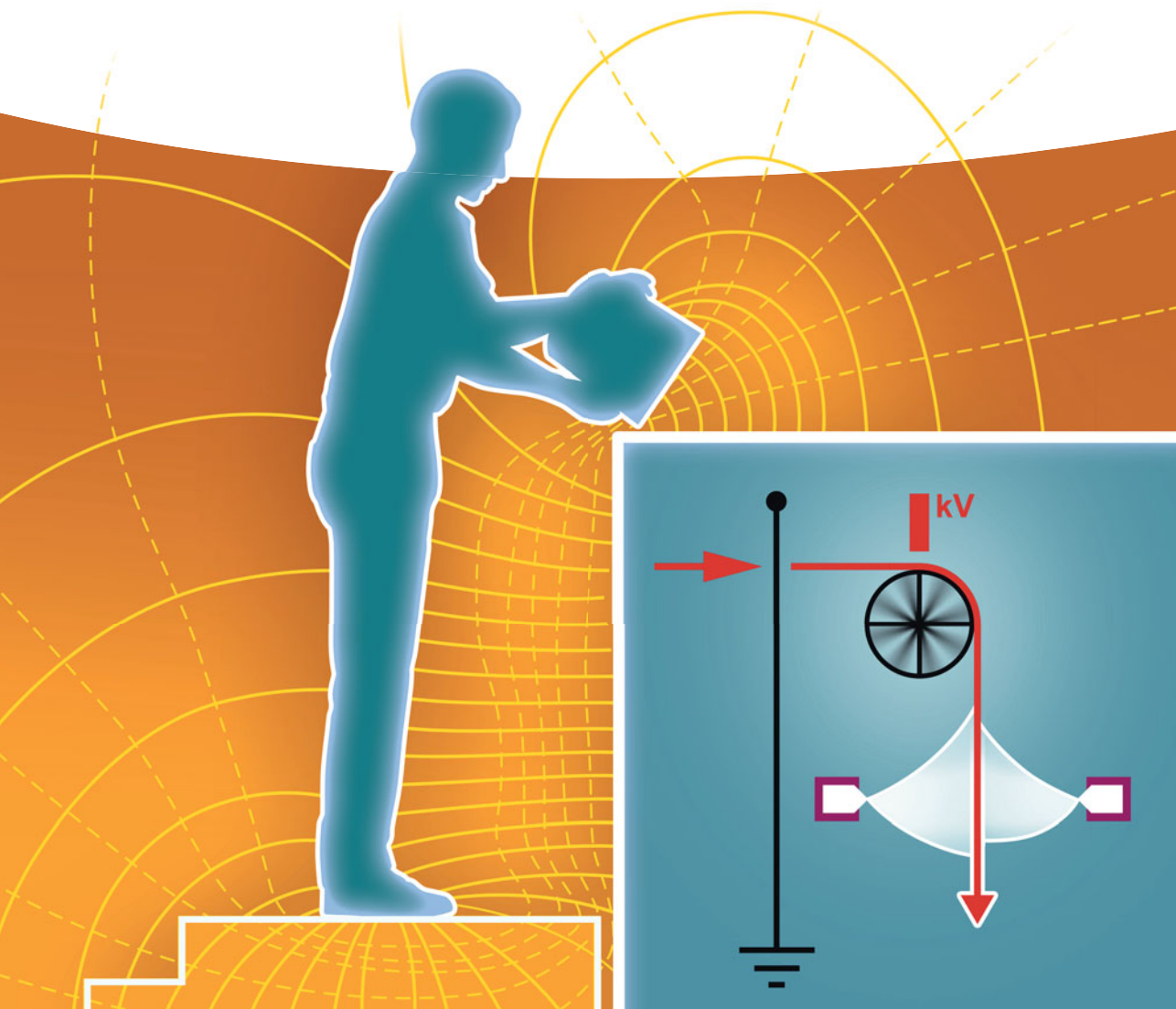


Günter Lüttgens, Wolfgang Schubert,
Sylvia Lüttgens, Ulrich von Pidoll und Stefan Emde

Statische Elektrizität

Durchschauen – Überwachen – Anwenden



Statische Elektrizität

Statische Elektrizität

Durchschauen – Kontrollieren – Einsetzen

*Günter Lüttgens, Wolfgang Schubert, Sylvia Lüttgens,
Ulrich von Pidoll und Stefan Emde*

Autoren

Günter Lüttgens

Research and Consulting
Am Berg 27
51519 Odenthal
Deutschland

Wolfgang Schubert

Schubert GMD – Industrial Consultant
Weidenweg 15
04425 Taucha
Deutschland

Sylvia Lüttgens

Research and Consulting
Am Berg 27
51519 Odenthal
Deutschland

Ulrich von Pidoll

Elektrostatikexperte
An den Wiesen 17
38112 Braunschweig
Deutschland

Stefan Emde

DKE/VDE
Stresemannallee
60596 Frankfurt
Deutschland

■ Alle Bücher von Wiley-VCH werden sorgfältig erarbeitet. Dennoch übernehmen Autoren, Herausgeber und Verlag in keinem Fall, einschließlich des vorliegenden Werkes, für die Richtigkeit von Angaben, Hinweisen und Ratschlägen sowie für eventuelle Druckfehler irgendeine Haftung.

Bibliografische Information der Deutschen Nationalbibliothek

Die Deutsche Nationalbibliothek verzeichnet diese Publikation in der Deutschen Nationalbibliografie; detaillierte bibliografische Daten sind im Internet über <http://dnb.d-nb.de> abrufbar.

© 2020 WILEY-VCH Verlag GmbH & Co. KGaA, Boschstr. 12, 69469 Weinheim, Germany

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.

Print ISBN 978-3-527-41372-0

ePDF ISBN 978-3-527-82150-1

ePub ISBN 978-3-527-82151-8

oBook ISBN 978-3-527-82152-5

Umschlaggestaltung Formgeber, Mannheim
Satz le-tex publishing services GmbH, Leipzig
Druck und Bindung Markono Print Media Pte Ltd, Singapore

Gedruckt auf säurefreiem Papier.

10 9 8 7 6 5 4 3 2 1

Geleitwort

Warum ein neues Fachbuch über statische Elektrizität? Gehört die Elektrostatik doch zu den ältesten bekannten Phänomenen der Physik. Ihr Ursprung war mit den seltsamen Eigenschaften des Bernsteins verknüpft. Mit der Entdeckung des Coulomb-Gesetzes als mathematisches Fundament entwickelte sie sich im 18. Jahrhundert zu einem eigenständigen Zweig der klassischen Physik. Für mehr als 100 Jahre war statische Elektrizität ein Feld naturwissenschaftlicher Forschung mit interessanten Phänomenen, die in den Salons der damaligen Zeit zur Belustigung der Gäste vorgeführt wurden.

Der Einzug in die Technik erfolgte in der Mitte des letzten Jahrhunderts, als die Elektrostatik bei Anwendungen wie Lackieranlagen und Fotokopierern zum Einsatz kam. Doch schon viele Jahrzehnte davor wurde ihre gefährliche Seite sichtbar. Immer öfters kam es während der zunehmenden Industrialisierung zu heftigen Explosionen, deren Ursache die Freisetzung elektrostatischer Energie war. Bereits in den ersten Jahrzehnten des 20. Jahrhunderts entstanden Broschüren und Merkblätter mit Abhandlungen über die Gefahren der statischen Elektrizität.

Inzwischen ist fast ein ganzes Jahrhundert vergangen, aber die Themen blieben unverändert. Allerdings hat sich der Fokus der Industrie gewandelt. Heute finden sich die Anwendungen der Elektrostatik verstärkt in der Abfallbehandlung und der Trennung von Rohstoffen wieder. Die Möglichkeiten numerischer Modellierungen ergänzen die Erforschung der elektrostatischen Phänomene. Doch die Vermeidung elektrostatischer Entladungen als Ursache von Explosionen ist nach wie vor aktuell, wie immer wieder auftretende Explosionsereignisse in der Industrie beweisen.

So besteht noch immer ein großer Bedarf, angehende Ingenieure und Techniker auf dem Gebiet der Elektrostatik auszubilden. Das vorliegende Buch stellt dafür ein wunderbares Kompendium dar. Es deckt alle Aspekte der elektrostatischen Aufladung ab und auch der damit einhergehenden Entladungen. Es ist in zehn didaktisch hervorragend ausgearbeitete Kapitel unterteilt, die jeweils detailliert einen Gesichtspunkt in sich geschlossen behandeln.

Beginnend beim Basiswissen zum Brand- und Explosionsverhalten, mit allen Aspekten einer Risikoanalyse, geht es im nächsten Kapitel weiter zu den Grundlagen der Elektrostatik. Der ausführlichen Beschreibung der Messtechnik wurde ein separates Kapitel gewidmet. In dem darauf folgenden Abschnitt werden die verschiedenen Formen der elektrostatischen Entladungen vorgestellt,

um anschließend die Maßnahmen zu beschreiben, mit denen diese Entladungen verhindert werden können.

Vervollständigt wird das Buch durch eine Sammlung von Experimenten, mit deren Hilfe Schulungen zum Thema Elektrostatik eindrücklich untermauert werden können. Es folgen Fallstudien über Ereignisse in der Industrie, ausgelöst durch elektrostatische Entladungen. Hinweise, wie diese Ereignisse hätten vermieden werden können, fehlen dabei nicht. In einem weiteren Kapitel wird auf die technischen Möglichkeiten eingegangen, wie elektrostatische Kräfte industriell genutzt werden können. Es fehlt auch nicht ein Kapitel über die vielfältigen Normen und Regelwerke auf nationaler, europäischer und internationaler Ebene. Abgerundet wird das Lehrbuch mit einem Anhang, der das Rüstzeug enthält, um die Elektrostatik mathematisch zu beschreiben.

Die Autoren Sylvia und Günter Lüttgens sowie Wolfgang Schubert, Ulrich von Pidoll und Stefan Emde sind ausgewiesene Experten auf dem Gebiet der statischen Elektrizität. Ihr Wissen basiert auf den Erfahrungen, die sie in vielen Jahren industrieller Tätigkeit und bei zahllosen Untersuchungen und Forschungsprojekten sammelten. Ganz besonders eindrücklich zeigt sich dies in der umfangreichen Sammlung an Fallstudien. Die didaktische Umsetzung des komplexen Themas haben sie bei ihren vielen Vortragsveranstaltungen und Seminaren immer weiter verfeinert, bis es nun in diesem Buch eine perfekte Umsetzung gefunden hat.

Das vorliegende Werk ist deswegen nicht einfach nur ein neues Fachbuch über statische Elektrizität. Es ist viel mehr. Es ist die Zusammenfassung eines sehr umfangreichen Erfahrungsschatzes, so aufgearbeitet, dass es für Neueinsteiger die Basis der eigenen Erfahrungen darstellen kann. Für jeden Experten ist es ein wertvolles Werkzeug zur Erweiterung und Repetition des eigenen Fachwissens.

Es macht mich ein klein wenig stolz, Sie in dieses Lehrbuch einführen zu dürfen. Ich wünsche Ihnen viel Freude bei der Lektüre und viel Erfolg bei der Umsetzung des darin enthaltenen Wissens.

Basel, April 2019

Klaus Schwenzfeuer

Inhaltsverzeichnis

Geleitwort *V*

Danksagung *XV*

Liste der Autoren *XVII*

Vorbemerkungen *XXI*

1	Grundwissen zu Brand und Explosion, Gefahren einschätzung	1
1.1	Grundlegendes zu Brand- und Explosionsvorgängen	1
1.2	Explosionsgrenzen	6
1.2.1	Explosionsgrenze bei Gasen	6
1.2.2	Flammpunkt	6
1.2.3	Mindestzündenergie	10
1.2.4	Explosionsgrenze bei Stäuben	12
1.2.5	Einteilung in Explosionsgruppen	13
1.3	Zündgefahren infolge elektrostatischer Aufladungen	13
1.3.1	Zündgefahr durch Büschelentladungen	14
1.3.2	Hybridgemische	14
1.4	Perspektive zur Gefahrenbeurteilung	15
1.5	Sicherheitstechnische Bewertung in Bezug auf elektrostatische Zündgefahren	17
1.5.1	Anforderungen an Arbeitsmittel (Auszug aus BetrSichV [6])	17
1.5.2	Einteilung explosionsgefährdeter Bereiche in Gefahrenzonen	17
1.6	Geräteschutzniveau (EPL)	19
1.6.1	Geräte kategorien	20
1.6.2	Zusammenfassung	21
1.7	Explosionsgefahren in den Griff bekommen	21
1.7.1	Primärer Explosionsschutz	21
1.7.2	Sekundärer Explosionsschutz	22
1.7.3	Tertiärer (konstruktiver) Explosionsschutz	22
1.8	Zündquellenarten	23

2	Entstehung elektrostatischer Aufladungen	27
2.1	Ursprung	27
2.2	Kraftwirkungen im elektrischen Feld	29
2.3	Aufladung infolge Kontakt und Trennung	30
2.4	Doppelschichtladung	30
2.5	Wovon hängt die Höhe der Aufladung ab?	33
2.6	Versuch einer Systematik	35
2.7	Aufladung strömender Flüssigkeiten	38
2.7.1	Aufladung von Flüssigkeiten beim Zerstäuben (Atomisieren)	39
2.8	Aufladung strömender Gase	40
2.9	Aufladung disperser Systeme	42
2.10	Reduzierung der Aufladungstendenz	43
2.10.1	Verringerung des elektrischen Widerstandes	43
2.10.2	Leitfähigkeit und Aufladung bei Flüssigkeiten	44
2.10.3	Einfluss der Oberflächenstruktur bei festen Stoffen	46
2.11	Elektrisches Feld	46
2.11.1	Feldlinien	46
2.11.2	Äquipotentiallinien und -flächen	48
2.11.3	Feldstärke	50
2.11.4	Gefahren durch elektrostatische Felder?	50
2.12	Influenz (auch „elektrostatische Induktion“ genannt)	50
2.12.1	Aufladung einer Person durch Influenz	53
2.12.2	Bildladung (auch Spiegelladung genannt)	54
2.12.3	Influenzmaschine	55
2.12.4	Kelvin'scher Wassertropfengenerator	56
2.13	Kapazität und Kondensator	57
2.14	Aufladungsphänomene an Materialbahnen	58
2.14.1	Entstehungsmechanismen	58
2.15	Elektrete	65
3	Messtechnik	69
3.1	Einleitende Überlegungen zu elektrostatischen Messungen	69
3.2	Gegenüberstellung: Elektrostatik – Elektrotechnik	72
3.3	Elektrostatische Messungen soweit es Sicherheitsaspekte betrifft	73
3.4	Widerstand versus Leitfähigkeit	74
3.5	Oberflächenwiderstand und Volumenwiderstand	74
3.5.1	Widerstand im Materialinnern oder an der Oberfläche?	75
3.5.2	Messung des elektrischen Widerstandes an festen Objekten	77
3.5.3	Messspannungen – Messelektroden	78
3.5.4	Oberflächenwiderstand, Elektroden und Messschaltung	81
3.5.5	Volumenwiderstand, Elektroden und Messschaltung	83
3.5.6	Erdableitwiderstand	84
3.5.7	Elektroden zur Widerstandsmessung an Pulvern (Stäuben, Schüttgütern)	85
3.6	Beziehung zwischen Widerstandswerten und Aufladungseigenschaften	86

3.6.1	Reib-Trenn-Apparatur zur Erzeugung reproduzierbarer Aufladungen	86
3.6.2	Übertragene Ladung	87
3.7	Leitfähigkeit von Flüssigkeiten	95
3.7.1	Widerstand von Schüttgütern	97
3.7.2	Ladungsrelaxation bei Flüssigkeiten und Pulvern (Schüttgüter)	98
3.8	Messung von Kapazitäten	98
3.8.1	Messung der Kapazität (Aufladeverfahren)	100
3.8.2	Messung der Permittivitätszahl	101
3.9	Faraday-Becher und -Käfig	101
3.9.1	Faraday-Becher bzw. -Zylinder	101
3.9.2	Faraday-Käfig	101
3.10	Messung der Aufladung fallender Tropfen	102
3.11	Durchschlagspannung	104
3.12	Spannungsmessung mit statischen Voltmetern	104
3.13	Messung der elektrischen Feldstärke	105
3.13.1	Influenz-Elektrofelmeter	106
3.13.2	Weitere Anwendungen für Influenz-Elektrofelmeter	115
3.14	Weitere messtechnische Anwendungen	118
3.14.1	Oberflächenladungsmessung an bewegten Bahnen	118
3.14.2	Prüfung elektrostatisch ableitfähiger Schutzkleidung	119
3.14.3	Prüfverfahren zur Bestimmung der Ableitfähigkeit	121
3.14.4	Aufladung pulverförmiger Schüttgüter	123
3.14.5	Aufladung bei Flüssigkeiten	124
3.14.6	Ermittlung der Staubaufladung beim Versprühen	124
3.15	Ladungserfallmessung (Relaxationszeit)	126
3.16	Einflussgrößen	129
3.16.1	Temperatur	130
3.16.2	Feuchtigkeit	131
3.16.3	Elektrostatische Störgrößen	135
3.17	Ermittlung der Mindestzündenergie für brennbare Stäube	136
3.18	Ladungsverteilung sichtbar machen	138
3.19	Bild-Nachweise	141
4	Elektrostatische Gasentladungen und von ihnen ausgehende Gefahren	143
4.1	Gasentladungen in der Elektrostatik	144
4.1.1	Entladungsmechanismus	144
4.1.2	Verlauf einer elektrostatischen Gasentladung	145
4.2	Gasentladungsarten	148
4.2.1	Funkenentladungen	149
4.2.2	Gasentladungen, ausgehend von einer Elektrode	151
4.2.3	Gleitentladung	156
4.2.4	Gewitterblitzentladung	164
4.3	Auswirkungen von Gasentladungen	171
4.3.1	Auflistung der von Gasentladungen verursachten Spuren	171
4.3.2	Zusammenfassung	172

4.4	Wie lassen sich zündfähige Gasentladungen vermeiden?	172
4.4.1	Funkenentladungen	172
4.4.2	Coronaentladungen	173
4.4.3	Büschelentladungen	173
4.4.4	Schüttkegelentladungen	173
4.4.5	Gleitstielbüschelentladungen	173
4.5	Beurteilung der von Gasentladungen ausgehenden Zündgefahren	174
4.5.1	Übersicht zu auf Erfahrungen beruhenden Schutzmaßnahmen	176
4.5.2	Wechselbeziehungen zwischen Materialien und Gasentladungen	176
4.5.3	Bewertung mithilfe von Regelwerken	176
4.6	Aus Gasentladungen resultierende Schäden	176
4.6.1	Schäden durch Ozon	178
4.6.2	Anschmutzung	178
4.6.3	Schmelzspuren auf Polymeren	179
4.6.4	Schmelzspuren auf Metallen	179
4.6.5	Perforationen an Polymeren	179
4.6.6	Poren an emaillierten Behältern	179
4.6.7	Vorbelichtung fotografischen Materials	180
4.6.8	Schäden an Lagerungen von Wellen	181
4.7	Auswirkungen der Elektrizität auf den menschlichen Organismus	181
4.7.1	Gefährdung durch Netzwechselstrom	182
4.7.2	Gefährdung durch statische Elektrizität	182
4.8	Mechanisch erzeugte Funken	183
4.8.1	Begriffsbestimmung	184
4.8.2	Experimentelle Vorgehensweise	185
4.8.3	Kohlenstoffexplosionen	186
4.8.4	Bürgerliche Nutzenanwendung	187
4.8.5	Abgrenzung der Zündgefahr	187
4.8.6	Aluminothermische Reaktion	188
4.8.7	Regeln für explosionsgefährdete Bereiche	188
4.8.8	Ausblick	189
5	Beseitigung störender Aufladungen	193
5.1	Ladungsverteilung	193
5.2	Passive Entladung	195
5.2.1	Untersuchungen zur Coroneinsatzspannung in Abhängigkeit von Abstand und Art der passiven Entladeelektrode	198
5.2.2	Messaufbau zur Messung der Coroneinsatzspannung in Abhängigkeit von Abstand und Art der passiven Entladeelektrode	205
5.2.3	Ergebnisse der Messungen an passiven Entladeelektroden	205
5.3	Aktive Entladung	211
5.3.1	Hochspannungsversorgung für aktive Entladeelektroden	211
5.3.2	Funktionsweise aktiver Entladeelektroden	212
5.4	Entladung störend aufgeladener Oberflächen	215
5.4.1	Entladung an Materialbahnen	215

5.4.2	Entladung an bogenförmigen Materialien	227
5.4.3	Entladung von sonstigen Objekten	229
5.4.4	Entladung von Granulat und Vergleichbarem	231
5.5	Mögliche Gefahren durch Entladeelektroden	234
5.6	Entladung in Unterdruckverhältnissen	236
6	Beschreibung von Demonstrationsexperimenten	241
6.1	Vorbemerkungen	243
6.2	Erforderliche Geräte	244
6.2.1	Statisches Voltmeter	244
6.2.2	Feldstärkemessgerät	245
6.2.3	Bandgenerator	245
6.2.4	Knallrohr	246
6.3	Elektrostatische Kraftwirkungen	247
6.3.1	Rollende Röhren	248
6.3.2	Schwebende Röhren	249
6.3.3	Elektroskop	250
6.3.4	Darstellung elektrischer Feldlinien auf klassische Weise	250
6.4	Trennaufladung	252
6.5	Aufladung von Partikeln	253
6.5.1	Aufladung einzelner Partikel	253
6.5.2	Aufladung vieler Partikel (Granulat)	255
6.6	Influenz	256
6.6.1	Grundlegender Versuch	256
6.6.2	Elektrostatisches Glockenspiel	257
6.6.3	Praxisversuche zur Influenz	258
6.7	Ableitfähigkeit	259
6.8	Experimente mit dem Knallrohr	261
6.8.1	Personenaufladung	261
6.8.2	Zündspannung	262
6.9	Gasentladungen	263
6.9.1	Funkenentladung	264
6.9.2	Coronaentladung	264
6.9.3	Büschelentladung	265
6.9.4	Zündung durch Büschelentladungen (Modellexperiment)	266
6.9.5	Nachweis des Ionenwindes	267
6.9.6	Superbüschelentladung	267
6.9.7	Gleitstielbüschelentladung	268
6.10	Brand- und Explosionsgefahren	271
6.10.1	Flammpunkt	271
6.10.2	Effekte bei großen Oberflächen	272
6.10.3	Fettes Gemisch	273
6.10.4	Fortschreitende Flammenfront	274
6.10.5	„Umgießen“ von Benzindämpfen	275
6.10.6	Sauerstoffbedarf	276
6.10.7	Löschen mit Wasser	277
6.10.8	Brennendes Baumwolltuch verbrennt nicht	278
6.10.9	Entflammen fester Brennstoffe	278

7	Fallstudien zu elektrostatisch bedingten Unfällen – Untersuchungsstrategien	281
7.1	Gut zu wissen	281
7.1.1	Erdung	282
7.1.2	Erdung kleiner Objekte	283
7.1.3	Erdung eigensicherer Stromkreise	284
7.2	Untersuchungsstrategie	284
7.2.1	Zündquellenarten	284
7.2.2	Vorgehensweise	286
7.2.3	Voreilige Konsequenz	287
7.3	Zündungen infolge von Büschelentladungen (siehe Abschn. 4.2.2.2)	288
7.3.1	Eintragen von schuppenförmigem Schüttgut in einen Rührwerkskessel	288
7.3.2	PE-Innensack rutscht aus Papiersack	289
7.3.3	Antistatischer PE-Sack verursacht Zündung	290
7.3.4	Leerschütteln eines PE-Sackes	292
7.3.5	Abpumpen von verunreinigtem Toluol	294
7.3.6	Imprägnierung von Glasfasern	296
7.3.7	Stichflamme beim Beschicken eines Rührwerkskessels	297
7.3.8	Zwei Explosionen in großen Lagertanks	298
7.3.9	Explosion eines geschlossenen Kunststofffasses	301
7.4	Zündungen infolge von Gleitstielbüschelentladungen (siehe Abschn. 4.2.3.1)	302
7.4.1	Explosion in Bahnkesselwagen	302
7.4.2	Metallfass mit Innensack	305
7.4.3	Kunststofffass mit Innensack	306
7.4.4	Kunststoffleitung in einem pneumatischen Fördersystem	307
7.4.5	Brand in Sprühtrocknungsanlage	309
7.5	Zündungen infolge von Funkenentladungen (siehe Abschn. 4.2.1)	312
7.5.1	Einschütten von Pulver in einen Rührwerkbehälter	312
7.5.2	Staubzündung in einem Trockner	313
7.5.3	Zündung an einer Tauchbeschichtung	316
7.5.4	Entleerung eines Trockners	317
7.5.5	PVC-Schlauch von Wasser durchströmt	319
7.5.6	Explosion beim Entleeren eines Metallfasses	320
7.5.7	Schlauchfilter mit Stützkorb	322
7.5.8	Zündung beim Betanken eines Automobils	323
7.5.9	Brände beim Schließen von Gefrierschränken	324
7.5.10	Filtermaterial mit flammfester Ausrüstung	326
7.5.11	Fundsache im Silo	328
7.5.12	Isolierende „Leiterschuhe“ leiten Personenaufladung nicht ab	329
7.5.13	Erdung mit Verspätung	330
7.5.14	Qualm an Tankstellen	331
7.5.15	Bewusstlos im Supermarkt	332
7.5.16	Funken an einem Drosselventil	333
7.5.17	Abfüllen von <i>n</i> -Hexan in Metallfässer	334

7.5.18	Zündung durch eine infolge Influenz aufgeladene Metallplatte	335
7.6	Zündung infolge von Schüttkegelentladungen (siehe Abschn. 4.2.2.4)	337
7.7	Zweifel an elektrostatischer Zündung	338
7.7.1	Brand in Lösemittelreinigungsanlage	338
7.7.2	Brand im PE-Fass	341
7.7.3	Brand im Rührwerkbehälter	343
7.7.4	Zerknall eines Glasrohres	344
7.8	Merkwürdigkeit an einem Metallrohr beim Ausfließen einer Flüssigkeit	345
8	Gezielter Einsatz von Aufladungen	349
8.1	Nutzanwendungen	349
8.2	Beispiele kreativer Umsetzung zu Nutzenanwendungen	351
8.2.1	Anhaftung – Verblockung	351
8.2.2	Anhaften einer Beilage auf einer variablen Unterlage	352
8.2.3	Verblockung mehrerer Papier- oder Folienbahnen zu einem Strang	354
8.2.4	Haften einer Schmelzfahne auf der Kühlwalze	356
8.2.5	Teleskopierfreies Wickeln von Folien	356
8.2.6	In-Mould-Labeling (IML) bzw. In-Mould-Decoration (IMD)	356
8.2.7	Beölen von Metallblechen	359
8.2.8	Applikation von flüssigen Medien auf schnell bewegte Bahnen	360
8.2.9	Trocknung von schnell bewegten Substraten	363
8.2.10	Tiefdruck- und Beschichtungswerke	363
8.2.11	Reduzierung von Partikelnebel im Beschichtungsprozess	368
8.2.12	Nutzung der Aufladung für messtechnische Prozesse	371
8.2.13	Separieren von Stoffgemischen	372
8.2.14	Oberflächenbehandlung mit Coronaanlagen	374
8.3	Zusammenfassung	378
9	Normung im Fachgebiet Elektrostatik, National, Europäisch und International	381
9.1	Was ist Normung? – Warum brauchen wir Normung?	381
9.2	Wer macht Normung?	383
9.2.1	Das Deutsche Institut für Normung (DIN)	384
9.2.2	Deutsche Kommission Elektrotechnik Elektronik Informationstechnik in DIN und VDE	384
9.2.3	Der Verband der Elektrotechnik Elektronik Informationstechnik e. V.	385
9.2.4	Die Internationale Elektrotechnische Kommission und die Internationale Organisation für Normung	386
9.2.5	Die europäischen Normungsorganisationen	386
9.2.6	Zusammenarbeit der Organisationen in der Gegenüberstellung – Europäisch und International	387
9.2.7	Normungsarbeit der DKE National – Europäisch – International	389
9.3	Bedeutung von Normen	390

9.4	Normung in der Elektrostatik	392
9.4.1	Erlebter Ablauf eines Normungsprojektes	394
9.4.2	Verzeichnis einschlägiger Normen (Stand 2018)	396
9.5	Liste der gängigsten Abkürzungen im Normungsumfeld der IEC	406
9.6	Auffinden von Normen und Literatur	412
9.7	Anmerkung	415

M Mathematischer Werkzeugkasten 417

M.1	Permittivität ε	421
M.1.1	Bestimmung der Permittivitätszahl eines Materials ε_r	421
M.2	Ladung Q	421
M.2.1	Coulomb'sches Gesetz	422
M.3	Spannung U	423
M.4	Homogenes Feld zwischen ebenen Platten	423
M.5	Kapazität C	423
M.5.1	Energie W gespeichert im Kondensator	423
M.5.2	Aufladespannung $U_a(t)$ und Entladespannung $U_e(t)$ am Kondensator	424
M.5.3	Zeitkonstante τ (allgemein)	425
M.5.4	Konfiguration einiger Kapazitäten	426
M.6	Widerstand – Leitfähigkeit	428
M.6.1	Widerstände	428
M.6.2	Leitfähigkeit κ	430
M.7	Feldkonstanten (Vakuum)	431

Anhang A Permittivitätszahlen ε_r 433

Anhang B Brennbare Gase, Dämpfe und Stäube 435

B.1	Daten brennbarer Gase und Dämpfe	435
B.2	Stäube	437

Anhang C Daten gängiger Kunststoffe 453

Stichwortverzeichnis 457

Danksagung

Wenn sich ein Quintett aus Fachleuten zusammenfindet, um Texte für ein Buch über statische Elektrizität zu schreiben, so ist das eine Sache, doch bis daraus ein leserfreundliches Werk wird, eine andere.

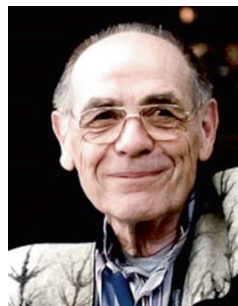
Dazu müssen neben der allfälligen Fehlerkorrektur die Querverweise kontrolliert, die Bilder und Tabellen mit ihren Nummern den Texten zugeordnet und noch viele kleine und größere Differenzen mit den Autoren abgestimmt werden.

Für diese von Beate Schubert äußerst sorgfältig durchgeführte Arbeit sagt das Autorenquintett ein ganz herzliches Dankeschön!

Unser weiterer Dank gilt ebenso Hermann Künzig (Entladung, Aufladung, Messtechnik), Jürgen Brunner und Christian Vogel (Messtechnik), Thomas Gradl Kunststoffe) und Rainer Köhnlechner (Materialtrennung).

Liste der Autoren

Günter Lüttgens wurde 1933 in Berlin geboren. Er hat Elektromaschinenbau studiert. Nach dem Studium arbeitete er vorwiegend in der chemischen Industrie im Bereich elektrostatischer Aufladungen. Er leitete das Forschungslabor für Elektrostatik und war verantwortlich für die Anlagensicherheit im Hinblick auf Elektrostatikgefahren. 1998 wurde er von der International Electrotechnical Commission (IEC) als Experte für elektrostatische Prüfmethoden benannt und war von 2001–2012 Obmann des entsprechenden Arbeitskreises bei der Deutschen Kommission Elektrotechnik Elektronik Informationstechnik (DKE). Über etwa 25 Jahre hinweg führte er gemeinsam mit seiner Ehefrau Sylvia Seminare zur Vermeidung von Gefahren infolge elektrostatischer Aufladungen durch. Daneben veröffentlichten sie gemeinsam eine Reihe von Fachartikeln und mehrere Fachbücher in deutscher und englischer Sprache. 2013 wurde ihm von der European Working Party (EFCE) im Bereich „Statische Elektrizität in der Industrie“ der internationale Fellow Award für Forschung und Lehre zugesprochen.



Wolfgang Schubert wurde 1952 in Leipzig geboren. Er ist gelernter Buchdrucker und hat in Leipzig Polygrafie studiert. Nach verschiedenen leitenden Funktionen in der Druckindustrie und im Vertrieb von Bogen- und Hybriddruckmaschinen hat er sich 1997 selbstständig gemacht und ist seitdem zusätzlich auf dem speziellen Gebiet der Elektrostatik tätig. Neben einer Reihe von Fachartikeln ist er Mitautor von zwei Fachbüchern zur Elektrostatik. Im Mai 2016 wurde er von der IHK Leipzig für die Sachgebiete Druckverfahren und Druckmaschinen, Be- und Verdrückbarkeit und Verpackungsdruck als Sachverständiger öffentlich bestellt und vereidigt. Außerdem ist er als unabhängiger Sachverständiger für Elektrostatik europaweit aktiv (www.schubert-gmd.de).



Sylvia Lüttgens wurde 1946 in Geroda geboren. Sie studierte für das Lehramt Englisch und Musik. Danach befasste sie sich mit statischer Elektrizität als möglicher Zündquelle für Feuer und Explosionen. Ihre pädagogischen Erfahrungen brachte sie in die von ihrem Ehemann Günter durchgeführten Elektrostatikseminare ein. Sie übernahm dabei die Experimentalvorträge zur Veranschaulichung der nicht immer leicht verständlichen Theorien zur Elektrostatik. Daneben veröffentlichte sie gemeinsam mit Günter eine Reihe von Fachartikeln und mehrere Fachbücher in deutscher und englischer Sprache.



Ulrich von Pidoll wurde 1956 in Köln geboren. Er studierte physikalische Chemie an der TU Darmstadt und schloss sein Studium 1984 mit dem Grad eines Dr.-Ing. ab. Anschließend war er fünf Jahre wissenschaftlicher Referent bei der Feldmühle AG. Von 1990–2018 arbeitete er in der Physikalisch-Technischen Bundesanstalt, Braunschweig, als Experte für elektrostatische Aufladungen. 1995 wurde er durch das Fernsehen bekannt, als er Brände beim Betanken von Pkws aufklärte. In der Folgezeit klärte er weitere elektrostatisch bedingte Brände auf. 1999 wurde er unter die 500 besten Wissenschaftler weltweit gewählt und mit der Leitung von sieben elektrostatischen Gremien betraut. In dieser Eigenschaft hat er als Convener maßgeblich zur Verfassung des CENELEC TR50404 und der IEC 60079-32 Teil 1 und 2 beigetragen. Als Anerkennung für sein Lebenswerk (über 100 wissenschaftliche Publikationen) erhielt er 2013 den internationalen Helmut Krämer Award und 2016 den IEC 1906 Award.



Stefan Emde wurde 1960 in Frankfurt am Main geboren. Nach dem Abitur folgte ein Studium der Elektrotechnik mit Abschluss als Diplomingenieur an der Technischen Universität in Darmstadt. In den folgenden Jahren beschäftigte er sich mit der Planung, Auslegung und Ausführung von elektrotechnischen Anlagen und Kommunikationsanlagen, zuletzt viele Jahre im Bereich der Mobilfunknetze. Angeregt durch den dabei immer intensiven Kontakt mit Normen begann er 2003 mit der hauptberuflichen Normungsarbeit bei der Deutschen Kommission Elektrotechnik Elektronik Informationstechnik (DKE) in DIN und VDE. Dort zuständig, unter anderem für das Referat der Anforderungen und Prüfverfahren für Werkstoffe der Elektrotechnik, war der Kontakt mit dem Deutschen Komitee für Elektrostatik hergestellt.



Bis heute ist er der Normung treu geblieben und engagiert sich neben seiner Arbeit mit den nationalen Normenkomitees auch international bei der International Electrotechnical Commission (IEC) und auf europäischer Ebene beim Europäischen Komitee für elektrotechnische Normung (CENELEC) in der Erarbeitung von Regelwerken für die elektrotechnische Normung.

Vorbemerkungen

Zu diesem Fachbuch sind nachfolgende Videos und PowerPoint-Präsentationen verfügbar. Auf einige davon wird im Buch verwiesen.

Die Videos sind mit „V“ gekennzeichnet und am Ende der jeweiligen Kapitel aufgeführt und können unter www.wiley-vch.de/ISBN9783527413720 heruntergeladen werden. Zum besseren Verständnis werden an verschiedenen Stellen animierte PowerPoint-Präsentationen mit dem Symbol [📺] bezeichnet. Der Buchstabe T steht für Theorie und P für die Praxis.

Diese und weitere Präsentationen können bei nachfolgenden Autoren angefordert werden.

G. & S. Luettgens: elektrostatik@elstatik.de

W. Schubert: ws@schubert-gmd.de

Video

Bezeichnung orientiert sich an den Kapitelnummer

- [V5.1] Staubexplosion von 1,5 kg Maisstärke
- [V7.1] Funken an einem Drosselventil
- [V7.2] Funken in isolierender Flüssigkeit
- [V8.1] Wiederbefeuchtung
- [V8.2] Abrakeln einer Grenzschicht
- [V8.3] ESA-Modell
- [V8.4] VTT Ink-Lifting V-Cell
- [V8.5] VTT Ink-Lifting U-Cell

PowerPoint

Serie T: Theorie Elektrostatik (mit Experimenten verdeutlicht)

- [T1] Brand- und Explosionsgefahren
- [T2] Entstehung elektrostatischer Aufladung
- [T3] Influenz – eine weitere Ursache elektrostatischer Aufladung
- [T4] Elektrischer Widerstand und Höhe der Aufladung

- [T5] Gasentladungen infolge elektrostatischer Aufladungen
- [T6] Die Bedeutung von Gefahrenzonen und Gerätekategorien
- [T7] Messverfahren
- [T8] Gefahren durch strömende Flüssigkeiten
- [T9] RIBC „Befüllen – Entleeren – Rühren“
- [T10] Optimierung Ladungsneutralisation an Folienbahnen
- [T11] Zündung infolge Büschelentladung
- [T12] Reinigung von Kunststofffässern

Serie P: Praxis mit „Freddy“ (Elektrostatik-Gefahren im Betrieb)

- [P1] Schuttschuhe
- [P2] Umfüllen entflammbarer Flüssigkeiten
- [P3] Entleeren von Kanistern
- [P4] Verwenden von Trichtern im Ex-Betrieb
- [P5] Sauberer Fußboden
- [P6] Plastiksack entleeren
- [P7] Hybrid-Gemische
- [P8] Ableitfähige Schläuche (Flüssigkeit)
- [P9] Oft gestellte Fragen zur Elektrostatik
- [P10] Plastikfass anstelle eines erdungsfähigen Metallfasses
- [P11] Schläuche für Stäube
- [P12] Zündung infolge Influenz
- [P13] Brandgefahr beim Abfüllen von Toluol
- [P14] Sicherheit ist messbar

1

Grundwissen zu Brand und Explosion, Gefahrenereinschätzung

Falls statische Elektrizität – wie man ihrem Namen nach annehmen könnte – wirklich statisch wäre, könnte man sie weitgehend ignorieren. Doch wenn sie sich mehr von ihrer dynamischen Seite zeigt, wird sie uns bewusst. Wir nehmen sie wahr als harmlose elektrische Schläge, z. B. beim Aussteigen aus einem Auto, aber auch als tödliche Blitzschläge bei Gewittern (siehe Kapitel 4, Gasentladungen).

Die Absicht dieses Buches ist, darzulegen, dass offensichtlich schwache Entladungserscheinungen durchaus in der Lage sind, brennbare Materialien zu entzünden und somit Schadenfeuer und sogar Personenschaden herbeizuführen. Das führt in manchen Fällen – in denen es an einer plausiblen Erklärung für eine Störung oder auch ein Unfallgeschehen mangelt – sogar dazu, dass die Elektrostatik für Schadensereignisse verantwortlich gemacht wird, die nicht von ihr verursacht wurden.

Die gefahrbringenden Erscheinungen der statischen Elektrizität erstrecken sich über einen weiten Energiebereich:

- In Gewitterblitzen werden Energiebeträge im Bereich von Megajoule freigesetzt.
- Gleitstielbüschelentladungen können einige Joule hervorbringen.
- Büschelentladungen bringen Energien im Bereich von Mikro- bis Millijoule auf.

Dieses Buch soll dazu beitragen, elektrostatische Aufladung besser einzuschätzen, um so zu einer richtigen Beurteilung der von ihr ausgehenden Gefahren zu gelangen. Dazu gehören zunächst Grundkenntnisse über die bei Verbrennungsvorgängen (Bränden und Explosionen) bestehenden Zusammenhänge.

1.1 Grundlegendes zu Brand- und Explosionsvorgängen

Worin unterscheiden sich Brand und Explosion voneinander [☐ T1]?

Gemeinsam ist beiden das Erscheinungsbild der Flamme, die stets eine schnelle Verbrennung in der Gasphase (Brennstoff-Luft-Gemisch) anzeigt. Die dabei ablaufende chemische Reaktion führt entsprechend der Verbrennungswärme zu einem Anstieg der Temperatur.

Bei einem Brand ist die Flamme „quasi stationär“, z. B. bei einer brennenden Kerze. Dabei überträgt sich die Reaktionswärme ohne Druckanstieg in die Umgebung.

Falls jedoch in einem Raumvolumen eine brennbare Atmosphäre vorliegt (z. B. im Zylinder eines Verbrennungsmotors), kommt es zu einer Explosion, wobei sich eine von der Zündquelle ausgehende Flammenfront durch das gesamte Volumen bewegt. Bei einem stöchiometrischen (siehe Abb. 1.7) Brenngas-Luft-Gemisch breitet sich unter atmosphärischen Bedingungen die Flammenfront mit einer Geschwindigkeit von etwa 10 m/s aus. Befindet sich die brennbare Atmosphäre in einem abgeschlossenen Volumen, so führt die Ausdehnung des durch die Reaktionswärme erhitzten Gases (exotherme Reaktion) zu einem kurzzeitigen Druckanstieg auf etwa 10 bar, der nach Abkühlung wieder zurückgeht und sogar einen Unterdruck herbeiführt.

Entscheidend ist, dass dieser kurzzeitige Druckanstieg ein zerstörendes Ausmaß annehmen kann, wenn er unkontrolliert stattfindet (z. B. bei einer Gasexplosion in einem Wohnhaus). Die Flammenerscheinung beweist eine exotherme Reaktion (Oxidation der Brennstoffmoleküle) in der Gasphase. Daraus folgt, dass fester oder flüssiger Brennstoff im Allgemeinen erst in die Gasphase überführt werden muss, damit es zu einer Reaktion kommen kann. Bei entzündbaren Flüssigkeiten liegt eine solche molekulare Brennstoff-Sauerstoff-Mischung bereits durch Verdampfung vor. Bei festen oder staubförmigen organischen Brennstoffen wird ein wesentlicher Teil der Zündenergie dafür benötigt, durch Verdampfen, Schmelzen oder Aufspalten (Cracken) gasförmige Kohlenwasserstoffe zu bilden, deren Menge so groß sein muss, dass nach der Zündung des Gemisches in Luft die freigesetzte Wärmeenergie in der Lage ist, die weitere thermische Aufbereitung des Feststoffs zu sichern. Entsprechendes gilt für die Nebel entzündbarer Flüssigkeiten mit hohem Flammpunkt (siehe Abschn. 1.2.2). Bei anorganischen Stäuben einschließlich Metallstäuben muss zur Initiierung der Verbrennung eine meist nicht unerhebliche Aktivierungsenergie für die Verbrennungsreaktion durch die Zündquelle aufgebracht werden. So erklärt sich, weshalb brennbare Gase und Dämpfe eine wesentlich geringere Zündenergie benötigen als flüssige oder feste Brennstoffe.

Wie oft in der Realität gibt es auch hier eine Ausnahme zu beachten: Metallstäube können unmittelbar mit dem Luftsauerstoff heftig reagieren: Es kommt zur Oxidation (Verbrennung) an der Oberfläche z. B. bei Leichtmetallstäuben, wie Aluminium oder auch bei Stahlwolle usw.

Die in einer Flamme freigesetzte Wärme führt sowohl wegen der neu entstehenden Abgase als auch wegen der entstehenden Aufheizung zu einer Volumengrößervermehrung (aus einem Volumen Propan und fünf Volumen Sauerstoff werden z. B. drei Volumen Kohlendioxid und vier Volumen Wasserdampf). Hierbei kann eine Verpuffung, eine Explosion oder sogar eine Detonation entstehen. Bei einer Verpuffung führt die Verbrennungsreaktion lediglich zu einer Volumenerweiterung, nicht aber zu einem relevanten Druckaufbau. Die Verbrennungsgeschwindigkeit (Geschwindigkeit der Flammenfront) beträgt weniger als 1 m/s. Entsprechend gering sind auch Druckanstieg und Geräusch.

Beispielhaft sind Verpuffungen in Feuerungsanlagen, in denen nach einer fehlerhaften Zündung eine explosionsfähige Atmosphäre aus nicht gezündetem

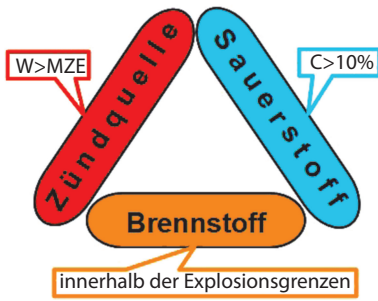


Abb. 1.1 Gefahrendreieck.

Brennstoff auftreten kann. Wird diese Atmosphäre bei wiederholtem Starten des Brenners durchgezündet, entsteht eine Druckwelle, die zum Kamin hin entspannt wird.

Ereignet sich der Verbrennungsvorgang unter atmosphärischen Bedingungen in einem abgeschlossenen Volumen, so entwickelt sich daraus eine Explosion. In rohrförmigen Gebilden kann eine Explosion zu einer Verdichtung des Gasgemisches in der fortschreitenden Reaktionszone führen mit der Folge, dass die Verbrennungsgeschwindigkeit immer höher wird und in den Bereich der Überschallgeschwindigkeit (einige km/s) gelangen kann. Die Explosion geht in eine Detonation über. Hierbei können Druckanstiege bis zum Hundertfachen des Ausgangsdruckes erreicht werden. Verheerende Zerstörungen können die Folge sein.

Im Prinzip kommt es zu einem Brand oder einer Explosion, wenn die folgenden Komponenten

- Brennstoff
- Sauerstoff
- Zündquelle

zeitlich und räumlich zusammentreffen, wie es das Gefahrendreieck (Abb. 1.1) anschaulich darstellt. Es wird weltweit verwendet, insbesondere um aufzuzeigen, dass stets diese drei Komponenten erforderlich sind, ein Feuer herbeizuführen, und, falls nur eine davon ausfällt, es nicht zu einer Verbrennung kommt. Ausnahme bilden Zerfallsreaktionen z. B. von Acetylen, oder die Reaktion von Chlor mit Wasserstoff.

Doch darüber hinaus müssen die genannten Komponenten zusätzliche Anforderungen erfüllen:

- Brennstoff

Der Brennstoff steht in diesem Zusammenhang für das Material, das eine explosionsfähige Atmosphäre bildet. Es ist zwar erforderlich, zwischen gasförmigen, flüssigen und festen Brennstoffen zu unterscheiden, doch eine Gemeinsamkeit besteht darin, dass es nur innerhalb eines bestimmten Konzentrationsbereiches von Brennstoff in Luft (siehe Abschn. M.5.1.1) zu Verbrennungen kommen kann. Für brennbare Flüssigkeiten ist die untere Explosionsgrenze durch den „Flammpunkt“ in guter Näherung charakterisiert (siehe Abb. 1.2). Zwischen dieser unteren und der oberen Explosionsgrenze herrscht stets eine explosionsfähige Atmosphäre.

- **Zündquelle**
Die Zündquelle steht in diesem Zusammenhang für die thermische oder elektrische Energie, die nötig ist, eine Zündung des Brennstoffs herbeizuführen.
- **Sauerstoff**
Die minimale für eine Verbrennung notwendige Sauerstoffkonzentration in der Atmosphäre ist vom Brennstoff abhängig. Im Allgemeinen gilt, dass es bei einer Sauerstoffkonzentration unter etwa 10 % nicht mehr zu Verbrennungsvorgängen kommt.
- **Zündquelle ↔ Sauerstoff**
Es wird darauf hingewiesen, dass ein Zusammenhang zwischen Sauerstoffkonzentration und Zündenergie besteht: Je höher die Sauerstoffkonzentration umso geringer ist der Bedarf an Zündenergie und umgekehrt.

Voraussetzung für den raschen Ablauf der Verbrennungsreaktion ist stets eine fein verteilte Form des Brennstoffs im Gemisch mit Luft. Das erfolgt bei flüssigen Brennstoffen weitgehend selbstständig durch Verdampfen. Dabei ist zu beachten, dass alle Dämpfe entzündbarer Flüssigkeiten eine höhere Dichte aufweisen als Luft. Deshalb ist die Dampfkonzentration am Boden eines Behälters stets höher als im oberen Bereich. Ist aber einmal ein homogenes Dampf-Luft-Gemisch, z. B. durch Umdrehen eines Gefäßes, herbeigeführt worden, so verhindert die Brown'sche Molekularbewegung ein erneutes Absinken der Dampfphase, das Gemisch bleibt homogen (siehe Abschn. 6.8).

Feste Brennstoffe (z. B. Kaminholz) lassen sich in kompaktem Zustand nur schwer entzünden, sie gelten aber als feuergefährlich. Zur Entzündung müssen sie zuvor zerkleinert (pulverisiert) werden, um so eine hinreichend große Oberfläche aufzuweisen, die sich dem Luftsauerstoff zur Reaktion darbietet. Zu welcher enormen Oberflächenzunahme die Zerkleinerung eines Feststoffes führt, zeigt die Übersicht in Tab. 1.1.

Analog zu kompakten, festen Brennstoffen kann Staub im abgelagerten Zustand zwar abbrennen, ist aber nicht explosionsfähig. Zur Explosionsgefahr kommt es erst durch Aufwirbeln des Staubes, z. B. infolge einer Gleitstielbüschelentladung (siehe Abschn. 6.9.7.1).

Wie bereits dargelegt, benötigen Nebel und Stäube zu ihrer Entzündung Energiebeträge, die um Größenordnungen höher liegen, als die für Gase und Dämpfe.

Die zur Entzündung eines zündwilligsten Gemisches aus Brennstoff (Gas oder Staub) und Luft unter atmosphärischen Bedingungen erforderliche Energie (siehe Abschn. M.5.1.1) wird als Mindestzündenergie (MZE) definiert (siehe

Tab. 1.1 Oberflächenzunahme bei Zerkleinerung.

Anzahl Würfel	Kantenlänge	Oberfläche
1	10 mm	0,0006 m ²
10 ³	1 mm	0,006 m ²
10 ⁶	100 µm	0,06 m ²
10 ⁹	10 µm	0,6 m ²
10 ¹²	1 µm	6 m ²

Tab. 1.2 Einteilung brennbarer Gase und Dämpfe in Temperaturklassen, Explosionsgruppen und Grenzspaltweiten.

Temperatur- klasse		T1	T2	T3	T4	T6
Zündtemperatur [°C]		> 450	> 300	> 200	> 135	> 85
Explosions- gruppe	Grenzspalt- weite MESG					
I (Bergbau)		Methan				
II A MZE $\geq 0,2$ mJ	> 0,9 mm	Ammoniak Aceton Propan Benzol	Cyclohexan <i>n</i> -Butan <i>n</i> -Hexan	Benzine Dieselkraft- stoff Kerosine Heizöle	Acetaldehyd	–
II B MZE < 0,2 mJ MZE > 0,02 mJ	0,5 mm $\leq$ MESG $\leq$ 0,9 mm	Stadtgas Acrylnitril	Ethanol ^{a)} Ethylen Ethylenoxid	Ethylenglykol Schwefel- wasserstoff	Ethylether	–
II C MZE $\leq 0,02$ mJ	< 0,5 mm	Wasserstoff	Acetylen	–	–	Schwefel- kohlenstoff

a) Ethanol wird jedoch aus pragmatischen Gründen wie Flüssigkeiten der Explosionsgruppe IIA behandelt (siehe auch IEC/TS 60079-32-1, Abschnitt C 6, Minimum Ignition Energies [1]).

Abschn. 1.2.3). Sie ist für Gase rein stoffspezifisch, bei Stäuben hingegen maßgeblich von deren Teilchengröße abhängig.

Die Mindestzündenergiewerte für Gase sind bereits weitgehend bekannt und dementsprechend in Explosionsgruppen eingeteilt. Diese Ordnung hat sich inzwischen international etabliert (Tab. 1.2, CENELEC – IEC – NEC 505). Ein weiteres Merkmal für die Entzündung von Gasen ist die zu ihrer Zündung erforderliche Temperatur, eingeteilt in die Temperaturklassen T1 bis T6 (siehe Tab. 1.2). Sie sind für eine Beurteilung elektrostatischer Zündgefahren ohne Bedeutung, da sie in keiner Beziehung zur Zündenergie stehen und werden hier nur der Vollständigkeit halber erwähnt (für T5 sind derzeit keine Stoffe bekannt.).

Hingegen ist eine Einteilung in Explosionsgruppen zur Beurteilung elektrostatischer Zündgefahren außerordentlich nützlich. In elektrostatischen Gasentladungen (siehe Kapitel 4) werden Ladungen transferiert, deren Höhe eine Abschätzung der freigesetzten Energie und damit deren Zündpotential ermöglicht.

In einem gewissen Verhältnis zur Explosionsgruppe steht eine sogenannte experimentell ermittelte Grenzspaltweite (maximum experimental safe gap, MESG), die bei der „druckfesten Kapselung“ elektrotechnischer Geräte (EN 60079-1 [2]) angewendet wird.

Die Betrachtungsweise beruht darauf, dass bei einer erfolgten Zündung in einem druckfesten Gehäuse durch einen Spalt nur eine geringe Energiemenge nach außen durchtreten kann. Diese austretende Energie, begrenzt durch die

Spaltweite, liegt unterhalb der MZE der das Gehäuse umgebenden gefährlichen explosionsfähigen Atmosphäre. Die Grenzspaltweite ist auch für die Dimensionierung von Flammensperren von Bedeutung.

1.2 Explosionsgrenzen

Bereits in Abschn. 1.1 wurde ausgeführt, dass sich in Gemischen brennbarer Gase und Stäube mit Luft eine selbstständige Verbrennung nur innerhalb bestimmter Brennstoffkonzentrationen fortpflanzen kann. Die Grenzkonzentrationen, bei denen das gerade noch möglich ist, sind als obere und untere Explosionsgrenze definiert: Unterhalb der unteren Explosionsgrenze enthält das Gemisch zu wenig Brennstoff, es ist zu „mager“, oberhalb der oberen Explosionsgrenze mangelt es an Sauerstoff, das Gemisch ist zu „fett“.

Die Explosionsgrenzen werden gemeinhin als Volumenanteil des brennbaren Gases, bezogen auf das Gesamtvolumen des Gemisches in Prozent angegeben und sind normalerweise auf Raumtemperatur und Atmosphärendruck bezogen. Eine Erhöhung des Anfangsdruckes und/oder der Anfangstemperatur führt generell zu einer Erweiterung der Explosionsgrenzen. Falls der Sauerstoffgehalt von dem der atmosphärischen Luft abweicht, so beeinflusst das die untere Explosionsgrenze nur marginal. Demgegenüber wird die obere Explosionsgrenze zu wesentlich höheren Werten hin verlagert. Grund dafür ist, dass an der oberen Explosionsgrenze Sauerstoffmangel herrscht und so der Ersatz von Stickstoff durch Sauerstoff eine Verschiebung zu höheren Brennstoffkonzentrationen bewirkt.

1.2.1 Explosionsgrenze bei Gasen

Über jeder Flüssigkeitsoberfläche bildet sich nach Maßgabe ihres Dampfdruckes und der Temperatur eine bestimmte Dampfkonzentration aus. Abbildung 1.2 zeigt die Dampfdruckkurve mit den darin eingetragenen Gemischbereichen. Demnach besteht Explosionsfähigkeit nur innerhalb des Explosionsbereiches, der durch die untere (bei 12 °C) und die obere Explosionstemperatur (bei 37 °C) begrenzt ist.

Anstelle dieser Explosionstemperaturwerte (früher Explosionspunkte genannt) können auch die daraus resultierenden Explosionsgrenzen zur Kennzeichnung des Explosionsbereiches herangezogen werden. Im explosionsfähigen Bereich setzt sich eine Flamme nach erfolgter Zündung ohne weitere Energiezufuhr und ohne weiteren Brenngas- oder Luftzutritt im gesamten Volumen fort. Zu beachten ist aber, dass innerhalb des Explosionsbereiches sowohl der Bedarf an Zündenergie als auch die erreichte Flammengeschwindigkeit von der jeweils herrschenden Konzentration abhängen.

1.2.2 Flammpunkt

Es hat sich als zweckmäßig erwiesen, die untere Explosionstemperatur durch den nahezu identischen Flammpunkt zu kennzeichnen, der meist knapp darüber liegt. Der Flammpunkt (°C) ist die unter Normalbedingung in einer definierten