

Inhaltsverzeichnis

Geleitwort

Vorbemerkung

1	Basiswissen zu Brand und Explosion – Gefahren einschätzung	1
1.1	Grundlegendes zu Brand- und Explosionsvorgängen □T1	1
1.2	Explosionsgrenzen	5
1.2.1	Explosionsgrenze bei Gasen	5
1.2.2	Flammpunkt	6
1.2.2.1	Kennzeichnung brennbarer Flüssigkeiten	6
1.2.2.2	Neue Systematiken	7
1.2.3	Mindestzündenergie	9
1.2.4	Explosionsgrenze bei Stäuben	10
1.3	Zündgefahren infolge elektrostatischer Aufladungen	11
1.3.1	Zündgefahr durch Büschelentladungen	11
1.3.2	Hybrid-Gemische □P7	11
1.4	Bemerkung zur Gefahrenbeurteilung	12
1.5	Einteilung explosionsgefährdeter Bereiche in Gefahrenzonen □T6	14
1.6	Schutzmaßnahmen in Bezug auf statische Elektrizität □P9	16
1.7	Methode zur Bestimmung der Zündfähigkeit von Gasentladungen	16
1.8	Vermeiden von Explosionsgefahren	18
1.8.1	Konzentrationsbegrenzung	18
1.8.2	Inertisierung	18
1.9	Konstruktiver Explosionsschutz	18
2	Entstehung elektrostatischer Aufladung	20
2.1	Doppelschichtladung □T2	24
2.2	Wovon hängt die Höhe der Aufladung ab?	25
2.3	Aufladung strömender Flüssigkeiten	27
2.4	Versuch einer Systematik	28
2.5	Aufladung strömender Gase	30
2.6	Aufladung disperter Systeme	30
2.7	Herabsetzen der Aufladungsneigung	31
2.7.1	Verringerung des elektrischen Widerstandes	31
2.7.2	Oberflächenwiderstand und Aufladungshöhe bei Feststoffen □T4	32
2.7.3	Leitfähigkeit und Aufladung bei Flüssigkeiten	33
2.7.4	Einfluss der Oberflächenstruktur	34
2.8	Elektrisches Feld	34
2.8.1	Feldlinien	35
2.8.2	Äquipotentiallinien und -flächen	35
2.8.3	Feldstärke	37
2.8.4	Gefahren durch elektrostatische Felder?	38

2.8.4.1	Grenzwerte	38
2.8.4.2	Natürliche elektrische Felder	38
2.9	Influenz (auch »elektrostatische Induktion« genannt) □T3	39
2.9.1	Aufladung einer Person durch Influenz	43
2.9.2	Bildladung* (auch Spiegelladung genannt)	43
2.9.3	Influenzmaschine	44
2.9.4	Messung der Aufladung von Tropfen	45
2.9.5	Kelvingenerator	46
3	Messtechnik	49
3.1	Erläuterungen zu elektrostatischen Messungen	49
3.2	Gegenüberstellung: Elektrostatik – Elektrotechnik	52
3.3	Spannungsmessung mit statischen Voltmetern	53
3.4	Messung der elektrischen Feldstärke	55
3.4.1	Influenz-Elektrofeldmeter	55
3.4.2	Fehler bei Feldstärkemessungen	56
3.4.3	Weitere Anwendungen für Influenz-Elektrofeldmeter	60
3.4.3.1	Statisches Voltmeter	61
3.4.3.2	Coulombmeter*	61
3.4.4	Bewertung der Aufladung von Gegenständen	63
3.5	Messung des elektrischen Widerstandes von Isolierstoffen	64
3.5.1	Messspannungen	64
3.5.2	Widerstand im Materialinnern oder an der Oberfläche?	65
3.5.3	Volumenwiderstand (Durchgangswiderstand*)	66
3.5.3.1	Schutzzingschaltung bei Messung des Volumenwiderstandes	67
3.5.4	Oberflächenwiderstand*	67
3.5.4.1	Schutzzingschaltung bei Messung des Oberflächenwiderstandes	68
3.6	Weitere messtechnische Anwendungen [15]	68
3.6.1	Oberflächen-Ladungsmessung an bewegten Bahnen	68
3.6.2	Prüfung textiler Schutzkleidung (Arbeitskleidung*)	69
3.6.3	Prüfverfahren zur Bestimmung der Ableitfähigkeit (Charged Plate Monitor)	71
3.6.4	Papier-Prüfverfahren	72
3.6.5	Aufladung pulverförmiger Schüttgüter	74
3.6.6	Aufladung bei Flüssigkeiten	75
3.6.7	Aufladungen in der chemischen Produktion	76
3.7	Kapazität	77
3.7.1	Messung der Kapazität (Aufladeverfahren)	78
3.7.2	Messung der Permittivitätszahl	79
3.7.3	Ladungszerfall-Messung (Relaxationszeit)	79
3.8	Einflussfaktoren	80
3.8.1	Temperatur	80
3.8.2	Feuchtigkeit	81
3.8.2.1	Luftfeuchtigkeit*	81
3.8.2.2	Feuchtigkeit im Material (Wasseraktivität)	84
3.8.3	Elektrische Störgrößen	85
3.8.3.1	Elektrostatische Störgrößen	86
3.8.3.2	Elektromagnetische Störgrößen	86
3.8.3.3	Elektrische Kopplungen zu Fremdgeräten	87

3.9	Nachweis von Gasentladungen*	88
3.9.1	Abstrahlung von Hochfrequenzschwingungen {→ 4.1}.....	88
3.9.2	Gerätetechnik zum Nachweis von Gasentladungen	89
3.9.3	Signalauswertung	89
4	Gasentladungen und von ihnen ausgehende Zündgefahren	91
4.1	Gasentladungen in der Elektrostatik □T5.....	91
4.1.1	Entladungsmechanismus.....	91
4.2	Gasentladungsarten	94
4.2.1	Funkenentladung*	95
4.2.2	Gasentladungen an gekrümmten Elektroden.....	96
4.2.2.1	Coronaentladung*	97
4.2.2.2	Büschelentladung*	98
4.2.2.3	Schüttkegelentladung*	99
4.2.3	Gleitbüschelentladung*	100
4.2.3.1	Gleitbüschelentladung am abgeschilderten System	101
4.2.3.2	Gleitbüschelentladung am freitragenden System	102
4.2.3.3	Gleitbüschelentladung am isolierenden Packmittel.....	103
4.2.3.4	Gleitbüschelentladung beim Wickeln aufgeladener Folien.....	104
4.2.4	Gewitterblitzentladung	104
4.2.4.1	Wolkendipol	104
4.3	Auswirkungen von Gasentladungen	107
4.4	Wie lassen sich Gasentladungen vermeiden?	108
4.4.1	Funkenentladungen	109
4.4.2	Corona- und Büschelentladungen	109
4.4.3	Schüttkegelentladungen	109
4.4.4	Gleitbüschelentladungen	109
4.5	Beurteilung der von Gasentladungen ausgehenden Zündgefahren □P9 110	
4.5.1	Bewertung mit Hilfe von Regelwerken	112
4.6	Aus Gasentladungen resultierende Schäden.....	114
4.6.1	Schäden durch Ozon	114
4.6.2	Anschmutzung	114
4.6.3	Schmelzspuren auf Polymeren	114
4.6.4	Schmelzspuren auf Metallen.....	114
4.6.5	Perforationen an Polymeren	115
4.6.6	Poren an emailierten Behältern.....	115
4.6.7	Vorbelichtung fotografischen Materials	115
4.7	Auswirkungen der Elektrizität auf den menschlichen Organismus.....	117
4.7.1	Gefährdung durch Netzwechselstrom.....	117
4.7.2	Gefährdung durch statische Elektrizität	117
5	Beseitigung störender Aufladungen [1]	119
5.1	Elektrostatik – Last und Lust.....	119
5.2	Entladung störend aufgeladener Oberflächen	122
5.2.1	Entladung an Materialbahnen	122
5.2.2	Entladung an bogenförmigen Materialien	128
5.2.3	Entladung von sonstigen Objekten	129
5.2.4	Entladung von Granulat und Vergleichbarem	132
5.3	Mögliche Gefahren durch Entladeelektroden.....	134

6	Beschreibung von Demonstrationsexperimenten.....	137
6.1	Elektrostatische Kraftwirkungen.....	141
6.1.1	Rollende Röhren.....	141
6.1.2	Schwebende Röhren	142
6.1.3	Elektroskop	143
6.2	Trennaufladung.....	144
6.3	Aufladung von Partikeln	145
6.3.1	Aufladung einzelner Partikel	145
6.3.2	Aufladung vieler Partikel (Granulat)	147
6.4	Influenz	147
6.4.1	Grundlegender Versuch.....	147
6.4.2	Glockenspiel	149
6.4.3	Kunststoffbehälter mit Abschirmung	150
6.5	Abiteifähigkeit	151
6.6	Experimente mit dem Knallrohr.....	152
6.6.1	Personenaufladung	153
6.6.2	Zündspannung	154
6.6.3	Trennaufladung.....	155
6.7	Gasentladungen	155
6.7.1	Funkenentladung	156
6.7.2	Coronaentladung	156
6.7.3	Büscheleentladung	157
6.7.4	Modellversuch: Zündung durch Büscheleentladung	158
6.7.5	Nachweis des Ionenwindes	158
6.7.6	Superbüscheleentladung	159
6.7.7	Gleitbüscheleentladung	159
6.7.7.1	Staubzündung.....	160
6.7.7.2	Kurzschluss einer Bildung*	161
6.8	Brand- und Explosionsgefahren	162
6.8.1	Flammpunkt	162
6.8.2	Effekte bei großen Oberflächen	162
6.8.3	Fettes Gemisch	163
6.8.4	Fortschreitende Flammenfront	164
6.8.5	»Umgießen« von Benzindämpfen	165
6.8.6	Sauerstoffbedarf	166
6.8.7	Löschen mit Wasser	166
6.8.8	Brennendes Fazelet verbrennt nicht	167
6.8.9	Entflammen fester Brennstoffe	168
6.8.9.1	Vergasen von Holz	168
6.8.9.2	Entflammen eines Staubhaufens	169
7	Fallstudien	170
7.1	Untersuchungsstrategie	170
7.1.1	Zündquellenarten	171
7.1.2	Vorgehensweise	171
7.1.3	Voreilige Konsequenz	172
7.2	Zündungen infolge von Büscheleentladungen	173
7.2.1	Eintragen von schuppenförmigem Schüttgut in einen Rührwerkskessel (RWK)	173

7.2.2	PE-Innensack rutscht aus Papiersack	174
7.2.3	Antistatischer PE-Sack verursacht Zündung.....	175
7.2.4	Leerschütteln eines PE-Sackes □P6	176
7.2.5	Abpumpen von verunreinigtem Toluol □P10.....	177
7.2.6	Imprägnierung von Glasfasern.....	179
7.2.7	Stichflamme beim Beschicken eines Rührwerkessels □P6.....	181
7.2.8	Explosionen in Großtanks.....	182
7.2.8.1	Explosion mit anschließendem Brand an Schwimmdachtank mit Toluol (2014)	183
7.2.8.2	Explosionskatastrophe bei Bitburg (1954) an Erdtank mit Flugbenzin (nach Mitteilungen der PTB)	183
7.3	Zündungen infolge von Gleitbüschelentladungen	185
7.3.1	Explosion in Bahn-Behälterwagen	185
7.3.2	Metallfass mit Innensack.....	187
7.3.3	Kunststofffass mit Innensack	188
7.3.4	Kunststoffleitung in einem pneumatischen Fördersystem	189
7.3.5	Brand in Sprühwärmungsanlage.....	191
7.4	Zündungen infolge von Funkenentladungen.....	193
7.4.1	Einschütten von Pulver in einen Rührwerkbehälter □P1, P4, P5	193
7.4.2	Staubzündung in einem Trockner	195
7.4.3	Zündung an einer Tauchbeschichtung.....	197
7.4.4	Entleerung eines Taumeltrockners	198
7.4.5	PVC-Schlauch von Wasser durchströmt	199
7.4.6	Explosion beim Entleeren eines Metallfasses □P2	201
7.4.7	Schlauchfilter mit Stützkorb	202
7.4.8	Zündung beim Betanken eines Automobils □P1, P5	204
7.4.9	Glasvorlage mit Toluol/Wasser-Gemisch.....	204
7.4.10	Filtermaterial mit flammfester Ausrüstung.....	205
7.4.11	Fundsachen	207
7.4.12	Isolierende »Leiterschuhe« leiten Personenaufladung nicht ab	209
7.4.13	Erdung mit Verspätung	210
7.4.14	Qualm an Tankstellen	210
7.5	Zündung infolge von Schüttkegelentladungen	211
7.6	Zweifel an elektrostatischer Zündung	212
7.6.1	Brand in Lösemittel-Reinigungsanlage	212
7.6.2	Brand im Polyethylenfass	215
7.6.3	Brand im Rührwerkbehälter	217
7.7	Handeln aus Erfahrung	218
7.7.1	Basisinformationen zur Entstehung elektrostatischer Aufladung:	218
7.7.2	Ladungsableitung durch Erdung	218
7.7.3	Messung des Erdableitwiderstandes	219
7.7.4	Bestimmung der Zündfähigkeit von Büschelentladungen	220
8	Gezielter Einsatz von Aufladungen.....	222
8.1	Nutzanwendungen [1]	222
8.2	Beispiele kreativer Umsetzung zu Nutzanwendungen	224
8.2.1	Anhaftung – Verblockung.....	224
8.2.2	Anhaften einer Beilage auf einer variablen Unterlage	227
8.2.3	Verblockung mehrerer Papier- oder Folienbahnen zu einem Strang	228
8.2.4	Haften einer Schmelzfahne auf der Kühlwalze	229

8.2.5	Teleskopierfreies Wickeln von Folien	231
8.2.6	In-Mould-Labelling (IML) – In-Mould-Decoration (IMD).....	231
8.2.7	Beölen von Metallblechen	233
8.2.8	Applikation von flüssigen Medien auf schnell bewegte Bahnen.....	233
8.2.9	Trocknung von schnell bewegten Substraten	235
8.2.10	Tiefdruck- und Beschichtungswerke	236
8.2.11	Nutzung der Aufladung für messtechnische Prozesse	241
8.2.12	Separieren von Stoffgemischen.....	242
8.2.13	Oberflächenbehandlung mit Corona-Anlagen.....	243
8.3	Zusammenfassung	245
9	Regelwerke zum Explosionsschutz – Zoneneinteilung	247
9.1	IEC 60079-32.....	247
9.2	Europäische Richtlinien	248
9.2.1	Richtlinie 1999/92/EG	249
9.2.2	Richtlinie 94/9/EG	249
9.2.2.1	Konformitätsbewertungsverfahren	252
9.2.2.2	Prüfnormen zur Umsetzung der Richtlinie 94/9/EG	254
9.2.3	Überarbeitung der Richtlinie 94/9/EG	254
9.3	Betriebssicherheitsverordnung (BetrSichV)	254
9.4	Technischen Regeln zur Betriebssicherheitsverordnung (TRBS)	256
9.4.1	TRBS 2152/BGR 104 „Explosionsschutz-Regeln (EX-RL)“	257
9.4.2	TRBS 2153/T033 Vermeidung von Zündgefahren infolge elektrostatischer Aufladungen.....	258
9.4.3	Merkblatt „Elektrostatik – Antworten auf häufig gestellte Fragen“ der BG RCI	259
9.5	Aktuelle Ergänzung.....	259
10	Internationale, Europäische und Nationale Normen – Normung im Fachgebiet Elektrostatik	261
10.1	Was ist Normung? – Warum brauchen wir Normung?.....	261
10.2	Wer macht Normung?	262
10.2.1	Das Deutsche Institut für Normung (DIN)	263
10.2.2	Die deutsche elektrotechnische Kommission (DKE).....	265
10.2.3	Der VDE „Verband der Elektrotechnik Elektronik Informationstechnik“	267
10.2.4	Die Internationale elektrotechnische Kommission und die Internationale Organisation für Normung	268
10.2.5	Die europäischen Normungsorganisationen	269
10.3	Normung in der Elektrostatik.....	270
10.3.1	Verzeichnis einschlägiger Normen (Stand Dezember 2013)	272
10.3.1.1	Größen und Einheiten.....	273
10.3.1.2	Widerstand und Leitwert	273
10.3.1.3	Aufladung und Entladung	275
10.3.1.4	Normen des Komitees 185 „Elektrostatik“ der DKE	279
10.3.1.5	Publikationen von IEC TC 101 „Electrostatics“	281
10.3.1.6	Aktuelle Arbeiten bei IEC TC 101 „Electrostatics“	282
10.3.1.7	Liste der gängigsten Abkürzungen im Normungsumfeld der IEC	283
10.3.1.8	Nützliche Adressen für die weitere Recherche	287

M	Mathematischer Werkzeugkasten Größen, Einheiten, Formeln.....	291
M 1	Energie des Kondensators (Formelzeichen: W)	293
M 1.1	Mindestzündenergie W_{MZE}	293
M 1.2	Leistung P	293
M 1.3	Wirkungsgrad η eines Verbrauchers	293
M 2	Feldstärke E ; Feldstärkevektor \vec{E}	294
M 2.1	Wirbelfreies Feld	294
M 2.2	Differentialgleichung einer Feldlinie	294
M 2.3	Homogenes Feld zwischen ebenen Platten.....	294
M 2.4	Feld um eine Punktladung	294
M 2.4.1	Permittivität ϵ	295
M 2.4.2	Elektrische Suszeptibilität χ_e	295
M 2.5	Feld um eine Linienladung.....	295
M 3	Flussdichte früher elektrische Verschiebung)	295
M 3.1	Elektrischer Fluss	296
M 4	Frequenz f.....	296
M 4.1	Wellenlänge λ	296
M 4.2	Kreisfrequenz ω	297
M 5	Induktivität L	297
M 5.1	Induktivität L_s einer Luft-Spule	297
M 6	Kapazität C	297
M 6.1	Draht (Einfachleiter) über einer leitfähigen Fläche.....	298
M 6.2	Koaxial-Kabel / Zylinderkapazität.....	298
M 6.3	Kugel im Raum	298
M 6.4	Kugel über einer leitfähigen Fläche	299
M 6.5	Parallel-Schaltung von Einzelkapazitäten.....	299
M 6.6	Plattenkondensator.....	299
M 6.7	Reihen-Schaltung von Einzelkapazitäten (Hintereinander).	299
M 6.7.1	Reihen-Schaltung von 2 Einzelkapazitäten.....	300
M 7	Kraft-Vektor \bar{F} , Kraft F	300
M 7.1	Kraft zwischen 2 Punktladungen (Coulomb'sches Gesetz)	300
M 8	Ladung Q	301
M 8.1	Bewegte Ladung Q_i	301
M 8.2	Elektronenstrahl-Ladung Q_e	301
M 8.3	Ladungsbedeckung σ	301
M 8.4	Ladungsbelag q_L	302
M 8.5	Spezifische Ladung Q_{spez}	302
M 8.6	Raumladung p	302
M 8.6.1	Homogene Raumladung p im Volumen V	302
M 9	Potential ϕ	302
M 9.1	Laplacesche-Differentialgleichung (keine Raumladung)	303
M 9.2	Poissonsche-Differentialgleichung (mit Raumladung)	303
M 9.3	Potential einer Punktladung	303
M 10	Spannung U	303
M 10.1	Im elektrischen Feld.....	303

M 10.2	Im homogenen elektrischen Feld.....	304
M 10.3	Aufladespannung $U_a(t)$ am Kondensator.....	304
M 10.4	Entladespannung $U_e(t)$ am Kondensator.....	304
M 10.5	Zeitkonstante τ (RC-Kombination)	304
M 10.6	Maschenregel (Kirchhoffsche Regel).....	305
M 10.7	Knotenregel (Kirchhoffsche Regel)	305
M 10.8	Zündspannung U_z einer Entladungsstrecke (Paschengesetz)	305
M 11	Widerstand R eines Material / Gegenstandes.....	305
M 11.1	Ableitwiderstand R_A eines Gegenstandes	305
M 11.2	Leitfähigkeit γ	306
M 11.2.1	Conductivity Unit cu	306
M 11.3	Leitwert G	306
M 11.4	Oberflächenwiderstand R_o eines Gegenstandes	306
M 11.5	Parallel-Schaltung (aus Einzelwiderständen).....	306
M 11.5.1	Parallel-Schaltung von 2 Einzelwiderständen	307
M 11.6	Reihen -Schaltung aus Einzelwiderständen (Hintereinander).....	307
M 11.7	Spezifischer Widerstand ρ_v eines metallischen Leiters (Draht).....	307
M 11.8	Spezifischer Oberflächenwiderstand ρ_s eines Materials.....	308
M 11.9	Spezifischer Volumenwiderstand ρ_V eines Materials	308
M 11.10	Temperaturabhängigkeit vom Widerstand $R(\vartheta)$,.....	308
M 11.11	Volumenwiderstand R_V eines Gegenstandes	309
M 11.12	Wechselstromwiderstand R_L einer Induktivität	309
M 11.13	Wechselstromwiderstand R_C einer Kapazität.....	309
M 11.14	Widerstandsrauschen P_r (Nyquist-Formel)	309
M 11.15	Rauschspannung U_R des Widerstandes R:.....	309
M 12	Wirkung des Stromes (Elektrolyse) 1. Faradaysches Gesetz	310
M 12.1	Erwärmung eines Leiters	310
Anhang A	SI-Basisgrößen.....	311
Anhang B	Abgeleitete SI-Größen.....	311
Anhang C	Allgemein anwendbare Größen	312
Anhang D	Dezimale Teile und Vielfache	312
Anhang E	Formelzeichen	313
Anhang F	Permittivitätszahl ϵ_r.....	314
Stichwortverzeichnis.....		315
Die Autoren		319