

Inhaltsverzeichnis

Geleitwort

Vorbemerkung

1	Basiswissen zu Brand und Explosion – Gefahreneinschätzung	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 disperser 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) \square 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	Schutzringschaltung bei Messung des Volumenwiderstandes	67
3.5.4	Oberflächenwiderstand*	67
3.5.4.1	Schutzringschaltung 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	Ladungszерfall-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 \square 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 abgeschirmten 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 \square 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 emaillierten 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	Ableitfähigkeit.....	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	Büschelentladung.....	157
6.7.4	Modellversuch: Zündung durch Büschelentladung.....	158
6.7.5	Nachweis des Ionenwindes.....	158
6.7.6	Superbüschelentladung.....	159
6.7.7	Gleitbüschelentladung.....	159
6.7.7.1	Staubzündung.....	160
6.7.7.2	Kurzschluss einer Bilanzung*.....	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 Büschelentladungen.....	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 Sprühtrocknungsanlage	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 Nutzenanwendungen	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-Labeling (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 94/9EG	254
9.2.3	Überarbeitung der Richtlinie 94/9EG	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	Flusssdichte 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 \vec{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 Ql	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 Kondensators	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 $R(\theta)$,	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