

Inhaltsverzeichnis

Geleitwort *V*

Danksagung *XV*

Liste der Autoren *XVII*

Vorbemerkungen *XXI*

- 1 Grundwissen zu Brand und Explosion, Gefahreinschätzung** *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 Gerätekategorien *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*

VIII | *Inhaltsverzeichnis*

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 Durchschlagsspannung 104
- 3.12 Spannungsmessung mit statischen Voltmetern 104
- 3.13 Messung der elektrischen Feldstärke 105
 - 3.13.1 Influenz-Elektrofeldmeter 106
 - 3.13.2 Weitere Anwendungen für Influenz-Elektrofeldmeter 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

X | *Inhaltsverzeichnis*

- 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

XII | *Inhaltsverzeichnis*

- 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 Rührwerkessel 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 Rührwerkessels 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 *n*-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 Nutzenwendungen 349
- 8.2 Beispiele kreativer Umsetzung zu Nutzenwendungen 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

XIV | *Inhaltsverzeichnis*

- 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