

Inhaltsverzeichnis

Geleitwort V

Danksagung XV

Liste der Autoren XVII

Vorbemerkungen XXI

1	Grundwissen zu Brand und Explosion, Gefahreneinschätzung	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 Durchschlagsspannung 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 Ladungszerfallmessung (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 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 Kunststoffasses	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