

Inhalt

Vorwort	V
Inhalt	IX
Symbole und Abkürzungen	XIX
1 EINFÜHRUNG.....	1
1.1 Aufgabe der Hochspannungstechnik.....	1
1.2 Anwendungen der Hochspannungstechnik	1
1.3 Perspektiven der Hochspannungstechnik.....	2
1.4 Übersicht	3
2 ELEKTRISCHE BEANSPRUCHUNGEN.....	5
2.1 Grundlagen des elektrischen Feldes	5
2.1.1 Feldgrößen	6
2.1.2 Äquipotentialfläche, Potential, Spannung und Kapazität	7
2.1.3 Die Maxwellschen Feldgleichungen	9
2.1.3.1 Die Maxwellschen Hauptgleichungen (Feldgleichungen)	10
2.1.3.2 Die Maxwellschen Nebengleichungen (Kontinuitätsgleichungen)	10
2.1.3.3 Die Stoffgleichungen	12
2.1.4 Einteilung der Felder.....	13
2.1.4.1 Statische und stationäre Felder	14
2.1.4.2 Quasistationäre (induktive) Felder in Leitern	15
2.1.4.3 Quasistationäre (kapazitive) Felder in Isolierstoffen	17
2.1.4.4 Nichtstationäre Felder (elektromagnetische Wellen)	20
2.2 Technische Beanspruchungen	22
2.2.1 Beanspruchung mit Gleichspannung	22
2.2.2 Beanspruchung mit Wechselspannung	23
2.2.3 Beanspruchung mit Schaltstoßspannung („Innere Überspannungen“)	25
2.2.4 Beanspruchung mit Blitzstoßspannung („Äußere Überspannungen“)	25
2.2.5 Beanspruchung mit sehr schnell ansteigenden Impulsen („Fast Transients“)	26
2.2.6 Mischfeldbeanspruchungen	28
2.3 Statische, stationäre und quasistationäre Felder in homogenen Dielektrika	29
2.3.1 Analytische Auswertung der Kontinuitätsgleichung	30
2.3.1.1 Grundsätzlicher Berechnungsweg	30

2.3.1.2 Kugelsymmetrische Felder	31
2.3.1.3 Zylindersymmetrische Felder	33
2.3.1.4 Homogene Felder	37
2.3.1.5 Feldverzerrungen durch Raumladungen	38
2.3.2 Analytische Auswertung der Potentialgleichung	39
2.3.3 Graphische Feldermittlung (für ebene Felder)	40
2.3.4 Methode der konformen Abbildung (für ebene Felder)	44
2.3.5 Ersatzladungsverfahren	48
2.3.5.1 Leitende Kugeln (Punktladungen)	48
2.3.5.2 Feld zwischen zwei leitenden Kugeln (Kugelfunkenstrecke)	54
2.3.5.3 Parallele Linienladungen	58
2.3.5.4 Felder in der Umgebung zylindrischer Leiter	60
2.3.6 Ähnlichkeitsbeziehungen, Homogenitätsgrad („Schwaigerscher Ausnutzungsfaktor“)	71
2.3.7 Ausmessung stationärer Strömungsfelder	74
2.3.7.1 Analogie zwischen dielektrischem Verschiebungsfeld und stationärem Strömungsfeld	75
2.3.7.2 Messungen auf halbleitendem Papier („Widerstandspapier“)	75
2.3.7.3 Messungen in halbleitenden Flüssigkeiten („Elektrolytischer Trog“)	76
2.4 Statische, stationäre und quasistationäre Felder in inhomogenen Dielektrika	76
2.4.1 Leitfähigkeit und Polarisierung	77
2.4.1.1 Leitfähigkeit	77
2.4.1.2 Polarisierung	78
2.4.2 Geschichtete Dielektrika	81
2.4.2.1 Randbedingungen an Grenzflächen	81
2.4.2.2 Quer geschichtetes Dielektrikum („Feldverdrängung“)	82
2.4.2.3 Längs geschichtetes Dielektrikum (Tangentiale Grenzfläche, „Interface“)	84
2.4.2.4 Schräg geschichtetes Dielektrikum („Brechungsgesetze“)	85
2.4.3 Analytische Berechnung geschichteter Dielektrika	86
2.4.3.1 Ebene, zylindersymmetrische und kugelsymmetrische Schichtungen	86
2.4.3.2 Spalte und Risse	92
2.4.3.3 Zwickel (Tripel-Punkte)	93
2.4.3.4 Dielektrische Hohlräume und Kugeln	97
2.4.3.5 Feldkräfte an Grenzflächen	98
2.4.4 Gleichspannung und Übergangsvorgänge	99
2.4.4.1 Analogien zum dielektrischen Verschiebungsfeld	99
2.4.4.2 Typische Gleichspannungsfelder	102
2.4.4.3 Übergangsvorgänge	105
2.4.5 Feldsteuerung an Grenzflächen	111
2.5 Numerische Feldberechnung	113
2.5.1 Übersicht	114
2.5.2 Ersatzladungsverfahren	115
2.5.3 Finite-Differenzen-Verfahren	117
2.5.4 Methode der Finiten Elemente	119
2.6 Schnell veränderliche Felder und Wanderwellen	125
2.6.1 Leitungsgebundene TEM-Welle	125
2.6.2 Reflexionsvorgänge	130
2.6.2.1 Grundlagen	130
2.6.2.2 Wellenersatzbild	131
2.6.2.3 Mehrfachreflexionen	132
2.6.3 Beispiele	135
2.6.3.1 Gasisolierte Schaltanlage („Fast Transients“)	135
2.6.3.2 Schutzbereich von Überspannungsableitern	137
2.6.3.3 Leitungsgeneratoren	138

3 ELEKTRISCHE FESTIGKEIT	141
3.1 Statistische Grundlagen.....	141
3.1.1 Statistische Beschreibung von Entladungsvorgängen.....	141
3.1.1.1 Zufallsgrößen	141
3.1.1.2 Verteilungsfunktionen	142
3.1.1.3 Parameterschätzung	144
3.1.1.4 Beispiel einer Messreihe	145
3.1.2 Beschreibung von Entladungsvorgängen mit theoretischen Verteilungsfunktionen	147
3.1.2.1 Vergleich empirischer Verteilungen mit theoretischen Verteilungen	147
3.1.2.2 Die Gaußsche Normalverteilung	148
3.1.2.3 Die Weibull-Verteilung	150
3.1.2.4 Parameterschätzung	153
3.1.3 Vergrößerungsgesetze	153
3.1.4 Korrelation und Regression, Lebensdauergesetz	157
3.2 Gasentladungen	159
3.2.1 Gasentladungskennlinien	159
3.2.1.1 Unselbständige und selbständige Entladung	159
3.2.1.2 Gasentladungskennlinie, Einstellung von Arbeitspunkten	160
3.2.1.3 Erscheinungsformen von Gasentladungen	162
3.2.2 Raumladungsfreie Entladung im homogenen Feld (nach Townsend und Paschen)	165
3.2.2.1 Zündbedingung nach Townsend (Generationenmechanismus)	165
3.2.2.2 Ionisierung und Anlagerung	170
3.2.2.3 Elektronenaffinität und Elektronegativität	173
3.2.2.4 Gesetz von Paschen	174
3.2.3 Raumladungsbeschwerte Entladung, Kanalentladung (Streamer-Mechanismus)	181
3.2.4 Entladeverzug, Stoßkennlinien und Hochfrequenzdurchschlag	183
3.2.4.1 Zünd- und Entladeverzug	183
3.2.4.2 Stoßkennlinien	186
3.2.4.3 Hochfrequenzdurchschlag	188
3.2.5 Entladungen im inhomogenen Feld	188
3.2.5.1 Vorentladungen und Durchschlag	188
3.2.5.2 Polaritätseffekt	190
3.2.5.3 Koronaeinsatz und Vorentladungen	192
3.2.5.4 Durchschlagsspannungen	195
3.2.5.5 Einfluss verschiedener Parameter	197
3.2.6 Oberflächenentladungen	199
3.2.6.1 Anordnungen mit Oberflächen	199
3.2.6.2 Zündung von Gleitentladungen	200
3.2.6.3 Entwicklung von Gleitentladungen	203
3.2.6.4 Fremdschichtüberschlag	204
3.2.7 Funken-, Bogen- und Blitzentladung	207
3.2.7.1 Funkenentladung	207
3.2.7.2 Bogenentladung	209
3.2.7.3 Blitzentladungen	212
3.2.7.4 „Kugelblitze“	216
3.3 Entladungen in flüssigen und festen Dielektrika.....	217
3.4 Entladungen in Flüssigkeiten	218
3.4.1 Entladungsmechanismen in Mineralöl	218
3.4.1.1 Phasen des Öldurchschlags	220
3.4.1.2 Die Flüssigkeit vor der Zündung	222
3.4.1.3 Initialprozesse	223
3.4.1.4 Entladungsausbreitung	227
3.4.2 Wichtige Einflussgrößen beim Durchschlag in Mineralöl.....	233

3.4.2.1 Feuchtigkeit und Verschmutzung	233
3.4.2.2 Temperaturabhängigkeit	235
3.4.2.3 Druckabhängigkeit	236
3.4.2.4 Barrieren und Umformungen, Spaltweitenabhängigkeit	236
3.4.2.5 Zeitabhängigkeiten, Zeitfaktoren	238
3.4.3 Teilentladungen (TE) in Mineralöl	239
3.4.4 Andere Isolierflüssigkeiten	241
3.5 Entladungen in festen Stoffen	242
3.5.1 Elektrischer Durchschlag	242
3.5.2 Wärmedurchschlag	244
3.5.3 Alterung, Erosionsdurchschlag und Lebensdauer	248
3.6 Teilentladungen (TE)	251
3.6.1 Ursachen für Teilentladungen	251
3.6.1.1 Koronaentladungen	252
3.6.1.2 Innere Teilentladungen bei Wechselspannung	253
3.6.1.3 Innere Teilentladungen bei Gleichspannung	256
3.6.1.4 Oberflächenentladungen	257
3.6.2 Teilentladungsquellen	258
3.6.2.1 TE-Quellen in Gasen	258
3.6.2.2 TE-Quellen in Flüssigkeiten	258
3.6.2.3 TE-Quellen in festen Stoffen	259
3.6.3 Klassische TE-Interpretation	260
3.6.3.1 Klassische TE-Interpretation bei Wechselspannung	260
3.6.3.2 TE-Interpretation bei Gleichspannung	263
3.7 Vakuumdurchschlag	264
3.7.1 Physikalischer Prozess	264
3.7.2 Technische Festigkeiten	266
3.7.3 Anwendungen	267
4 DIELEKTRISCHE SYSTEMEIGENSCHAFTEN	269
4.1 Polarisation in Zeit- und Frequenzbereich	269
4.1.1 Beschreibung im Zeitbereich	269
4.1.2 Beschreibung im Frequenzbereich	272
4.2 Dielektrische Kenngrößen	272
4.2.1 Dielektrizitätszahl ϵ_r	273
4.2.1.1 Polarisationsmechanismen	273
4.2.1.2 Frequenzabhängigkeit (Dispersion)	274
4.2.1.3 Temperaturabhängigkeit	275
4.2.1.4 Feldstärkeabhängigkeit	276
4.2.1.5 Mischdielektrika	276
4.2.2 Leitfähigkeit κ	277
4.2.2.1 Leitfähigkeit in Gasen	277
4.2.2.2 Leitfähigkeit in Flüssigkeiten	278
4.2.2.3 Leitfähigkeit in festen Stoffen	279
4.2.2.4 Feldstärke- und Temperatureinfluss	281
4.2.3 Verlustfaktor $\tan \delta$	282
4.2.4 Komplexe Dielektrizitätszahl	284
4.3 Beschreibung von Dielektrika	287
4.3.1 Klassische Parallel- und Reihenersatzschaltbilder	288
4.3.2 Beschreibung dielektrischer Materialeigenschaften	290

4.3.2.1 Lineares Polarisations-Ersatzschaltbild für Feststoffe	290
4.3.2.2 Temperaturabhängigkeit	292
4.3.2.3 Drift, Diffusion und Injektion in Flüssigkeiten	293
4.3.3 Beschreibung von Geometrieeigenschaften	296
4.3.3.1 Maxwell'sches Zweischichtenmodell	296
4.3.3.2 Einfache Schichtungen	298
4.3.3.3 Komplexe Geometrien	299
5 ISOLIERSTOFFE	301
5.1 Gase	301
5.1.1 Luft	302
5.1.2 Schwefelhexafluorid (SF ₆)	302
5.1.3 Alternative Isoliergase	304
5.2 Anorganische feste Isolierstoffe	306
5.2.1 Porzellan und Keramik	306
5.2.2 Glas	308
5.2.3 Glimmerprodukte	309
5.3 Hochpolymere Kunststoffe	309
5.3.1 Bildungsreaktionen und Vernetzung	310
5.3.2 Thermoplastische Isolierstoffe	312
5.3.2.1 Polyäthylen (PE und VPE)	312
5.3.2.2 Polyvinylchlorid (PVC)	314
5.3.2.3 Polypropylen (PP)	314
5.3.2.4 Hochtemperaturbeständige Thermoplaste	315
5.3.2.5 Polyamide (PA) und Aramide	315
5.3.2.6 Polytetrafluoräthylen (PTFE)	316
5.3.2.7 Polymethylmethacrylat (PMMA), Acrylglass	317
5.3.3 Duroplaste und Elastomere	317
5.3.3.1 Epoxidharze	318
5.3.3.2 Polyurethane (PU)	323
5.3.3.3 Phenolharz (PF) und Hartpapier	324
5.3.3.4 Elastomere und Schrumpfschläuche	325
5.3.4 Silikone	326
5.3.4.1 Eigenschaften von Silikonen	326
5.3.4.2 Hydrophobe Isolatoren	327
5.3.4.3 Weitere Anwendungen von Silikonen	331
5.3.5 Nano-Dielektrika	331
5.3.5.1 Einführung	331
5.3.5.2 Prinzip der Nanostrukturierung	332
5.3.5.3 Dielektrische Eigenschaften	333
5.3.5.4 Anwendungen	334
5.4 Isolierflüssigkeiten	334
5.4.1 Technologie der Isolierflüssigkeiten	334
5.4.2 Mineralöl	336
5.4.3 Synthetische Isolierflüssigkeiten	339
5.4.3.1 Polychlorierte Biphenyle (PCB)	339
5.4.3.2 Silikonflüssigkeiten („Silikonöle“)	339
5.4.3.3 Andere organische Flüssigkeiten	340
5.4.4 Pflanzliche Öle und „natürliche Esterflüssigkeiten“	341
5.4.4.1 Pflanzliche Öle	341
5.4.4.2 Natürliche Esterflüssigkeiten	342
5.4.5 Wasser	343

5.4.6 Verflüssigte Gase	345
5.5 Faserstoffe	347
5.5.1 Papier und Pressspan.....	347
5.5.1.1 Elektrische Festigkeit	347
5.5.1.2 Dielektrische Eigenschaften, Feuchtigkeit und Alterung	349
5.5.1.3 Zustandsbewertung	351
5.5.1.4 Herstellung und Verarbeitung	353
5.5.2 Synthetische Faserstoffe	357
6 PRÜFEN, MESSEN, DIAGNOSE	359
6.1 Qualitätssicherung	359
6.1.1 Qualitätssicherungssysteme	359
6.1.2 Zertifizierung und Akkreditierung	360
6.1.3 Kalibrierung	360
6.1.4 Isolationskoordination.....	362
6.1.4.1 Prinzip der Isolationskoordination	362
6.1.4.2 Hochspannungsprüfungen	366
6.1.4.3 Überspannungsableiter	367
6.2 Erzeugung hoher Spannungen	369
6.2.1 Erzeugung von Wechselspannungen	371
6.2.1.1 Erzeugungsprinzipien	371
6.2.1.2 Prüftransformatoren	373
6.2.1.3 Kaskadenschaltung	374
6.2.1.4 Kapazitive Spannungsüberhöhung bei Transformatoren	375
6.2.1.5 Serienresonanz-Prüfanlagen	377
6.2.1.6 Anforderungen an Labor- und Vor-Ort-Prüfspannungen	380
6.2.2 Erzeugung von Gleichspannungen.....	384
6.2.2.1 Hochspannungsgleichrichter	384
6.2.2.2 Gleichrichterschaltungen	384
6.2.2.3 Schaltnetzteile	388
6.2.2.4 Elektrostatische Generatoren	389
6.2.3 Erzeugung von Stoßspannungen	390
6.2.3.1 Stoßspannungsformen	390
6.2.3.2 Einstufige Stoßspannungsgeneratoren	393
6.2.3.3 Mehrstufige Stoßspannungsgeneratoren	396
6.2.3.4 Überspringen und Durchspringen	398
6.2.3.5 Stoßstromgeneratoren	401
6.2.3.6 Kombinierte Prüfschaltungen	402
6.2.3.7 Spezielle Impulsgeneratoren	403
6.3 Hochspannungsmesstechnik.....	406
6.3.1 Messfunkenstrecken.....	406
6.3.1.1 Kugelfunkenstrecke	406
6.3.1.2 Stab-Stab-Funkenstrecke	409
6.3.2 Elektrostatische Voltmeter	410
6.3.3 Feldsensoren.....	411
6.3.3.1 Räumlich konzentrierte Sensoren	411
6.3.3.2 Räumlich ausgedehnte Sensoren	411
6.3.3.3 Potentialfreie Sonden	412
6.3.3.4 Generatorische Sensoren	412
6.3.3.5 Elektro- und magnetooptische Feldsensoren	413
6.3.4 Spannungsteiler	417
6.3.4.1 Übertragungsverhalten	417
6.3.4.2 Teilerbauarten	418

6.3.4.3 Streukapazitäten	421
6.3.4.4 Niederspannungsteile	422
6.3.4.5 Ankopplungsschaltungen	423
6.3.5 Wandler	424
6.3.5.1 Spannungswandler	424
6.3.5.2 Stromwandler	425
6.3.6 Effektiv-, Scheitelwert- und Oberschwingungsmessungen	427
6.3.7 Strommessung	429
6.3.8 Elektromagnetische Verträglichkeit (EMV)	430
6.4 Diagnose und Monitoring	431
6.4.1 Dielektrische Messungen	431
6.4.1.1 Verlustfaktor und Kapazität	431
6.4.1.2 Isolationswiderstand, Leitfähigkeit	435
6.4.1.3 Dielektrische Systemantwort	436
6.4.2 Teilentladungsmessung und -diagnose	438
6.4.2.1 TE-Messkreis	439
6.4.2.2 Scheinbare Ladung, TE-Energie	440
6.4.2.3 Empfindlichkeit und Kalibrierung	442
6.4.2.4 Signalverarbeitung und -bewertung	444
6.4.2.5 Störungsfreies Messen	446
6.4.2.6 TE-Diagnose	448
6.4.2.7 Synchrone Mehrkanal-TE-Messung	452
6.4.2.8 UHF-TE-Diagnose	457
6.4.2.9 Nicht-elektrische Methoden der TE-Diagnose	458
6.4.3 Chemische Analysen	459
6.4.3.1 Bestimmung des Wassergehalts	459
6.4.3.2 Gas-in-Öl-Analyse	460
6.4.3.3 Hochdruck-Flüssigkeits-chromatographie (HPLC)	465
6.4.3.4 Bestimmung des Polymerisationsgrades von Zellulose	466
6.4.4 Isolierstoffprüfungen	466
6.4.4.1 Dielektrische Messungen	466
6.4.4.2 Durchschlagsmessungen	467
6.4.4.3 Kriechstromfestigkeit	469
6.4.4.4 Lichtbogenfestigkeit	470
6.4.4.5 Weitere Isolierstoffprüfungen	471
6.4.5 Optische und akustische Diagnoseverfahren	472
6.4.5.1 Lichtwellenleiter	472
6.4.5.2 Visuelle Diagnostik	472
6.4.5.3 Akustische Diagnostik	473
6.4.6 Bestimmung von Systemeigenschaften	473
6.4.6.1 Stoßstromverlauf	473
6.4.6.2 Übertragungsfunktionen, Frequency Response Analysis FRA	474
6.4.6.3 Frequenzgangmessungen	475
6.4.6.4 Reflektometrie	476
6.4.7 Dielektrische Diagnose	476
6.4.7.1 Zeit- und Frequenzbereich	476
6.4.7.2 Selektive Messungen	478
6.4.7.3 Entladespannungsmessung	478
6.4.7.4 IRC-Analyse	480
6.4.7.5 Rückkehrspannungsanalyse	480
6.4.7.6 PDC-Analyse	483
6.4.7.7 Frequenzbereichsanalyse	490
6.4.7.8 Dielektrische Diagnose im Zeit- und Frequenzbereich	492
6.4.8 Online-Monitoring	493
6.4.8.1 Monitoring von Transformatoren	494
6.4.8.2 Monitoring von Durchführungen	496

6.4.8.3 Monitoring rotierender Maschinen	498
6.4.8.4 Monitoring von VPE-Kabeln und Garnituren	499
6.4.8.5 Monitoring weiterer Betriebsmittel	500

7 ANWENDUNGEN503

7.1 Typische Isoliersysteme für Wechselspannungen503

7.1.1 Kabel und Garnituren.....	503
7.1.1.1 Papierisolierte Kabel	503
7.1.1.2 Kunststoffkabel	505
7.1.1.3 Gasisolierte Leitungen (GIL)	507
7.1.1.4 Kabelgarnituren	507
7.1.1.5 Prüfung von Kabelsystemen	511
7.1.2 Durchführungen	513
7.1.2.1 Feld- bzw. Potentialsteuerung	513
7.1.2.2 Berechnung kapazitiver Steuerungen	514
7.1.2.3 Bauformen	516
7.1.3 Transformatoren.....	518
7.1.3.1 Öl- und Trockentransformatoren, Drosseln	519
7.1.3.2 Wicklungsaufbau, Stufenschalter	521
7.1.3.3 Aufbau der Öl-Board-Isolierung	524
7.1.3.4 Fertigung	531
7.1.3.5 Transformatorprüfung	532
7.1.3.6 Betrieb, Diagnose und Wartung	540
7.1.4 Kondensatoren	544
7.1.4.1 Aufbau des Dielektrikums	545
7.1.4.2 Trocknung und Imprägnierung	545
7.1.4.3 Kondensatorbauarten	546
7.1.4.4 Messkondensatoren	546
7.1.5 Leistungsschalter.....	547
7.1.5.1 Entwicklung der Schaltgeräte	547
7.1.5.2 SF ₆ -Druckgasschalter	548
7.1.5.3 Vakuumschalter	551
7.1.6 Elektrische Maschinen	554
7.1.6.1 Niederspannungsmotoren	554
7.1.6.2 Maschinen für hohe Leistungen	555
7.1.6.3 Kabelgeneratoren und -maschinen	558

7.2 Typische Isoliersysteme für Gleichspannungen560

7.2.1 Beanspruchung, Festigkeit und Design bei Gleichspannung.....	560
7.2.1.1 Elektrische Beanspruchung bei Gleichspannung	560
7.2.1.2 Elektrische Festigkeit bei Gleichspannung	561
7.2.1.3 Einflüsse der Materialien	562
7.2.1.4 Design von Isoliersystemen für Gleichspannung	567
7.2.2 Gleichspannungskondensatoren.....	568
7.2.3 HGÜ-Transformatoren.....	569
7.2.3.1 Elektrische Beanspruchungen	569
7.2.3.2 Wechsel- und stationäre Gleichspannungsbeanspruchung	573
7.2.3.3 Belastungen bei Spannungsänderungen	575
7.2.3.4 Übergangsvorgänge (Transienten)	576
7.2.4 HGÜ-Durchführungen	580
7.2.4.1 Innere Isolierung	580
7.2.4.2 Äußere Isolation	581
7.2.5 HGÜ-Kabel und -Garnituren	583
7.2.5.1 Gleichspannungskabel	583
7.2.5.2 Papierisolierte HGÜ-Kabel	585
7.2.5.3 Kunststoffisolierte HGÜ-Kabel	585

7.2.5.4 Neue HGÜ-Kabeltechnologien	587
7.2.5.5 HGÜ-Muffen und -Endverschlüsse	588
7.2.5.6 Prüfung von HGÜ-Kabeln	589
7.2.6 Hochfrequent getaktete Gleichspannungen	590
7.2.6.1 Anwendungen	590
7.2.6.2 Isolationsprobleme	590
7.2.6.3 Prüftechnik	591
7.3 Typische Isoliersysteme für Impulsspannungen	591
7.3.1 Beanspruchung und Festigkeit	591
7.3.2 Energiespeicherung	592
7.3.3 Impulskondensatoren (Energiespeicher-, Stoßkondensatoren)	593
7.3.3.1 Aufbau des Kondensators	593
7.3.3.2 Die sogenannte „Kondensatorinduktivität“	593
7.3.3.3 Dielektrikum und Lebensdauer	594
7.3.4 Barrierensysteme	595
7.4 Weitere Anwendungen	596
7.4.1 Blitzschutz	597
7.4.1.1 Sicherstellung der EMV	597
7.4.1.2 Äußerer Blitzschutz	598
7.4.1.3 Innerer Blitzschutz	599
7.4.1.4 Blitzschutzkonzept	600
7.4.2 Hochleistungsimpulstechnik	602
7.4.2.1 Impulsstromkreise	602
7.4.2.2 Akustische Stoßwellen	602
7.4.2.3 Gepulste Teilchen- und Laserstrahlen	603
7.4.2.4 Elektrodynamische Erzeugung nanokristalliner Werkstoffe	604
7.4.2.5 Elektrodynamische Fragmentierung	604
7.4.2.6 Elektrohydraulische Fragmentierung	605
7.4.2.7 Elektroporation biologischer Zellen	605
7.4.3 Licht- und Lasertechnik	606
7.4.4 Röntgentechnik	607
7.4.5 Elektrostatische Partikelabscheidung, Ionisierung	607
7.4.6 Zündkerzen	608
7.5 Supraleitende Betriebsmittel	611
7.5.1 Supraleitung	611
7.5.2 HTSL-Leitermaterial	612
7.5.3 Isolierung, Kühlung mit LN ₂	614
7.5.4 Anwendungen	615
7.5.4.1 SMES Supraleitende magnetische Energiespeicher	615
7.5.4.2 Kurzschlussstrombegrenzer, Schalter	615
7.5.4.3 Kabel	616
7.5.4.4 Motoren, Generatoren	617
7.5.4.5 Transformatoren	618
8 LITERATUR	621
9 INDEX	641