

Inhalt

1 Einführung	1
1.1 Aufgabe der Hochspannungstechnik	1
1.2 Anwendungen der Hochspannungstechnik	1
1.3 Perspektiven der Hochspannungstechnik	2
1.4 Übersicht	2
2 Elektrische Beanspruchungen	5
2.1 Grundlagen des elektrischen Feldes	5
2.1.1 Feldgrößen	6
2.1.2 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	13
2.1.4.2 Quasistationäre (induktive) Felder in Leitern	15
2.1.4.3 Quasistationäre (kapazitive) Felder in Isolierstoffen	16
2.1.4.4 Nichtstationäre Felder (elektromagnetische Wellen)	20
2.2 Technische Beanspruchungen	21
2.2.1 Beanspruchung mit Gleichspannung	22
2.2.2 Beanspruchung mit Wechselspannung	23
2.2.3 Beanspruchung mit Schaltstoßspannung („Innere Überspannungen“)	24
2.2.4 Beanspruchung mit Blitzstoßspannung („Äußere Überspannungen“)	25
2.2.5 Beanspruchung mit sehr schnell ansteigenden Impulsen („Fast Transients“)	25
2.2.6 Mischfeldbeanspruchungen	28
2.3 Statische, stationäre und quasistationäre Felder in homogenen Dielektrika	28
2.3.1 Analytische Auswertung der Kontinuitätsgleichung	29
2.3.1.1 Grundsätzlicher Berechnungsweg	29
2.3.1.2 Kugelsymmetrische Felder	30
2.3.1.3 Zylindersymmetrische Felder	33
2.3.1.4 Homogene Felder	36
2.3.1.5 Feldverzerrungen durch Raumladungen	37
2.3.2 Analytische Auswertung der Potentialgleichung.....	38
2.3.3 Graphische Feldermittlung (für ebene Felder).....	39
2.3.4 Methode der konformen Abbildung (für ebene Felder).....	43
2.3.5 Ersatzladungsverfahren	47
2.3.5.1 Leitende Kugeln (Punktladungen)	47
2.3.5.2 Feld zwischen zwei leitenden Kugeln (Kugelfunkenstrecke)	53
2.3.5.3 Parallele Linienladungen	57
2.3.5.4 Felder in der Umgebung zylindrischer Leiter	59
2.3.6 Ähnlichkeitsbeziehungen, Homogenitätsgrad („Schwaigerscher Ausnutzungsfaktor“)	69
2.3.7 Ausmessung stationärer Strömungsfelder.....	72
2.3.7.1 Analogie zwischen dielektrischem Verschiebungsfeld und stationärem Strömungsfeld	73
2.3.7.2 Messungen auf halbleitendem Papier („Widerstandspapier“)	73
2.3.7.3 Messungen in halbleitenden Flüssigkeiten („Elektrolytischer Trog“)	74

2.4 Statische, stationäre und quasistationäre Felder in inhomogenen Dielektrika.....	74
2.4.1 Leitfähigkeit und Polarisierung	75
2.4.1.1 Leitfähigkeit	75
2.4.1.2 Polarisierung	76
2.4.2 Geschichtete Dielektrika	79
2.4.2.1 Grenzflächen	79
2.4.2.2 Quer geschichtetes Dielektrikum („Feldverdrängung“)	80
2.4.2.3 Längs geschichtetes Dielektrikum (Tangentiale Grenzfläche, „Interface“)	82
2.4.2.4 Schräg geschichtetes Dielektrikum („Brechungsgesetze“)	82
2.4.3 Analytische Berechnung geschichteter Dielektrika	84
2.4.3.1 Ebene, zylindersymmetrische und kugelsymmetrische Schichtungen	84
2.4.3.2 Spalte und Risse	89
2.4.3.3 Zwickel (Tripel-Punkte)	91
2.4.3.4 Hohlräume und dielektrische Kugeln	94
2.4.4 Gleichspannung und Übergangsvorgänge	96
2.4.4.1 Analogien zum dielektrischen Verschiebungsfeld	96
2.4.4.2 Typische Gleichspannungsfelder	99
2.4.4.3 Übergangsvorgänge	102
2.5 Numerische Feldberechnung.....	108
2.5.1 Übersicht	108
2.5.2 Ersatzladungsverfahren	109
2.5.3 Finite-Differenzen-Verfahren	111
2.5.4 Methode der Finiten Elemente	113
2.6 Schnell veränderliche Felder und Wanderwellen	119
2.6.1 Leitungsgebundene TEM-Welle	119
2.6.2 Reflexionsvorgänge	123
2.6.2.1 Grundlagen	123
2.6.2.2 Wellenersatzbild	125
2.6.2.3 Mehrfachreflexionen	126
2.6.3 Beispiele	129
2.6.3.1 Gasisolierte Schaltanlage („Fast Transients“)	129
2.6.3.2 Schutzbereich von Überspannungsableitern	131
2.6.3.3 Leitungsgeneratoren	132
3 Elektrische Festigkeit.....	135
3.1 Statistische Grundlagen.....	135
3.1.1 Statistische Beschreibung von Entladungsvorgängen.....	135
3.1.1.1 Zufallsgrößen	135
3.1.1.2 Verteilungsfunktionen	136
3.1.1.3 Parameterschätzung	138
3.1.1.4 Beispiel einer Messreihe	139
3.1.2 Beschreibung von Entladungsvorgängen mit theoretischen Verteilungsfunktionen ...	140
3.1.2.1 Vergleich empirischer Verteilungen mit theoretischen Verteilungen	141
3.1.2.2 Die Gaußsche Normalverteilung	142
3.1.2.3 Die Weibull-Verteilung	143
3.1.2.4 Parameterschätzung	145
3.1.3 Vergrößerungsgesetze	147
3.1.4 Korrelation und Regression, Lebensdauergesetz	150
3.2 Gasentladungen	152
3.2.1 Gasentladungskennlinien	153
3.2.1.1 Unselbständige und selbständige Entladung	153
3.2.1.2 Gasentladungskennlinie, Einstellung von Arbeitspunkten	153
3.2.1.3 Erscheinungsformen von Gasentladungen	156

3.2.2 Raumladungsfreie Entladung im homogenen Feld (nach Townsend und Paschen)....	157
3.2.2.1 Zündbedingung nach Townsend (Generationenmechanismus)	158
3.2.2.2 Ionisierung und Anlagerung	162
3.2.2.3 Gesetz von Paschen	166
3.2.3 Raumladungsbeschwerte Entladung, Kanalentladung (Streamer-Mechanismus)	171
3.2.4 Entladeverzug, Stoßkennlinien und Hochfrequenzdurchschlag	174
3.2.4.1 Zünd- und Entladeverzug	174
3.2.4.2 Stoßkennlinien	176
3.2.4.3 Hochfrequenzdurchschlag	178
3.2.5 Entladungen im inhomogenen Feld	178
3.2.5.1 Vorentladungen und Durchschlag	178
3.2.5.2 Polaritätseffekt	180
3.2.5.3 Koronaeinsatz und Vorentladungen	182
3.2.5.4 Durchschlagsspannungen	184
3.2.5.5 Einfluss verschiedener Parameter	186
3.2.6 Oberflächenentladungen	188
3.2.6.1 Anordnungen mit Oberflächen	188
3.2.6.2 Zündung von Gleitentladungen	189
3.2.6.3 Entwicklung von Gleitentladungen	191
3.2.6.4 Fremdschichtüberschlag	193
3.2.7 Funken-, Bogen- und Blitzenentladung	195
3.2.7.1 Funkenentladung	196
3.2.7.2 Bogenentladung	198
3.2.7.3 Blitzenentladungen	200
3.3 Entladungen in flüssigen und festen Dielektrika.....	203
3.3.1 Entladungen in Flüssigkeiten	205
3.3.1.1 Entladungsmechanismen in Mineralöl	205
3.3.1.2 Wichtige Einflussgrößen beim Durchschlag in Mineralöl	209
3.3.1.3 Teilentladungen (TE) in Mineralöl	213
3.3.1.4 Andere Isolierflüssigkeiten	215
3.3.2 Entladungen in festen Stoffen	215
3.3.2.1 Elektrischer Durchschlag	216
3.3.2.2 Wärmedurchschlag	217
3.3.2.3 Alterung, Erosionsdurchschlag und Lebensdauer	221
3.4 Teilentladungen (TE)	224
3.4.1 Ursachen für Teilentladungen	224
3.4.1.1 Koronaentladungen	224
3.4.1.2 Innere Teilentladungen	225
3.4.1.3 Oberflächenentladungen	228
3.4.2 Teilentladungsquellen	228
3.4.2.1 TE-Quellen in Gasen	228
3.4.2.2 TE-Quellen in Flüssigkeiten	228
3.4.2.3 TE-Quellen in festen Stoffen	229
3.4.3 Klassische TE-Interpretation bei Wechselspannung.....	230
3.5 Vakuumdurchschlag	233
4 Dielektrische Systemeigenschaften	237
4.1 Polarisierung in Zeit- und Frequenzbereich	237
4.1.1 Beschreibung im Zeitbereich	237
4.1.2 Beschreibung im Frequenzbereich.....	240
4.2 Dielektrische Kenngrößen	240
4.2.1 Dielektrizitätszahl ϵ_r	241
4.2.1.1 Polarisationsmechanismen	241

4.2.1.2 Frequenzabhängigkeit (Dispersion)	242
4.2.1.3 Temperaturabhängigkeit	243
4.2.1.4 Feldstärkeabhängigkeit	243
4.2.1.5 Mischdielektrika	244
4.2.2 Leitfähigkeit κ	244
4.2.2.1 Leitfähigkeit in Gasen	245
4.2.2.2 Leitfähigkeit in Flüssigkeiten	245
4.2.2.3 Leitfähigkeit in festen Stoffen	246
4.2.2.4 Feldstärke- und Temperatureinfluss	249
4.2.3 Verlustfaktor $\tan \delta$	250
4.2.4 Komplexe Dielektrizitätszahl.....	251
4.3 Beschreibung von Dielektrika.....	254
4.3.1 Klassische Parallel- und Reihenersatzschaltbilder.....	255
4.3.2 Beschreibung von Materialeigenschaften.....	256
4.3.2.1 Lineares Polarisations-Ersatzschaltbild	256
4.3.2.2 Nichtlineare Ersatzschaltbilder	257
4.3.3 Beschreibung von Geometrieigenschaften.....	259
4.3.3.1 Maxwellsches Zweischichtenmodell	259
4.3.3.2 Einfache Schichtungen	261
4.3.3.3 Komplexe Geometrien	261
5 Isolierstoffe.....	263
5.1 Gase.....	263
5.1.1 Luft.....	264
5.1.2 Schwefelhexafluorid (SF ₆).....	264
5.2 Anorganische feste Isolierstoffe.....	266
5.2.1 Porzellan und Keramik.....	266
5.2.2 Glas.....	267
5.2.3 Glimmerprodukte.....	268
5.3 Hochpolymere Kunststoffe.....	269
5.3.1 Bildungsreaktionen und Vernetzung.....	270
5.3.2 Thermoplastische Isolierstoffe.....	271
5.3.2.1 Polyäthylen (PE und VPE)	271
5.3.2.2 Polyvinylchlorid (PVC)	273
5.3.2.3 Polypropylen (PP)	273
5.3.2.4 Hochtemperaturbeständige Thermoplaste	274
5.3.2.5 Polyamide (PA) und Aramide	275
5.3.2.6 Polytetrafluoräthylen (PTFE)	275
5.3.2.7 Polymethylmethacrylat (PMMA)	276
5.3.3 Duroplaste und Elastomere.....	276
5.3.3.1 Epoxidharze	277
5.3.3.2 Polyurethane (PU)	282
5.3.3.3 Phenolharze (PF) und Hartpapier	283
5.3.3.4 Silikonharze und -elastomere (SIR)	283
5.4 Isolierflüssigkeiten.....	287
5.4.1 Technologie der Isolierflüssigkeiten.....	288
5.4.2 Mineralöl.....	289
5.4.3 Synthetische Isolierflüssigkeiten.....	292
5.4.3.1 Polychlorierte Biphenyle (PCB)	292
5.4.3.2 Silikonflüssigkeiten („Silikonöle“)	292
5.4.3.3 Andere organische Flüssigkeiten	293

5.4.4 Pflanzliche Öle	294
5.4.5 Wasser	295
5.4.6 Verflüssigte Gase	296
5.5 Faserstoffe	298
5.5.1 Papier und Pressspan	299
5.5.1.1 Elektrische Festigkeit	299
5.5.1.2 Dielektrische Eigenschaften, Feuchtigkeit und Alterung	300
5.5.1.3 Herstellung und Verarbeitung	302
5.5.2 Synthetische Faserstoffe	306
6 Prüfen, Messen, Diagnose	307
6.1 Qualitätssicherung	307
6.1.1 Qualitätssicherungssysteme	307
6.1.2 Zertifizierung und Akkreditierung	308
6.1.3 Kalibrierung	308
6.1.4 Isolationskoordination	310
6.1.4.1 Prinzip der Isolationskoordination	310
6.1.4.2 Hochspannungsprüfungen	313
6.1.4.3 Überspannungsableiter	314
6.2 Erzeugung hoher Spannungen	316
6.2.1 Erzeugung von Wechselspannungen	317
6.2.1.1 Erzeugungsprinzipien	317
6.2.1.2 Prüftransformatoren	319
6.2.1.3 Kaskadenschaltung	320
6.2.1.4 Kapazitive Spannungsüberhöhung bei Transformatoren	321
6.2.1.5 Serienresonanz-Prüfanlagen	323
6.2.1.6 Anforderungen an Labor- und Vor-Ort-Prüfspannungen	326
6.2.2 Erzeugung von Gleichspannungen	329
6.2.2.1 Hochspannungsgleichrichter	329
6.2.2.2 Gleichrichterschaltungen	330
6.2.2.3 Schaltnetzteile	333
6.2.2.4 Elektrostatische Generatoren	333
6.2.3 Erzeugung von Stoßspannungen	335
6.2.3.1 Stoßspannungsformen	335
6.2.3.2 Einstufige Stoßspannungsgeneratoren	338
6.2.3.3 Mehrstufige Stoßspannungsgeneratoren	341
6.2.3.4 Stoßstromgeneratoren	343
6.2.3.5 Kombinierte Prüfschaltungen	344
6.2.3.6 Spezielle Impulsgeneratoren	345
6.3 Hochspannungsmesstechnik	348
6.3.1 Messfunkenstrecken	348
6.3.1.1 Kugelfunkenstrecke	348
6.3.1.2 Stab-Stab-Funkenstrecke	350
6.3.2 Elektrostatische Voltmeter	351
6.3.3 Feldsensoren	352
6.3.3.1 Räumlich konzentrierte Sensoren	352
6.3.3.2 Räumlich ausgedehnte Sensoren	352
6.3.3.3 Potentialfreie Sonden	353
6.3.3.4 Generatorische Sensoren	353
6.3.3.5 Elektro- und magnetooptische Feldsensoren	354
6.3.4 Spannungsteiler	358
6.3.4.1 Übertragungsverhalten	358
6.3.4.2 Teilerbauarten	359

6.3.4.3 Streukapazitäten	361
6.3.4.4 Niederspannungsteile	362
6.3.4.5 Ankopplungsschaltungen	363
6.3.5 Wandler	364
6.3.5.1 Spannungswandler	364
6.3.5.2 Stromwandler	366
6.3.6 Effektiv-, Scheitelwert- und Oberschwingungsmessungen	367
6.3.7 Strommessung	369
6.3.8 Elektromagnetische Verträglichkeit (EMV)	370
6.4 Diagnose und Monitoring	371
6.4.1 Klassische dielektrische Messungen	372
6.4.1.1 Verlustfaktor und Kapazität	372
6.4.1.2 Isolationswiderstand, Leitfähigkeit	374
6.4.2 Teilentladungsmessungen	376
6.4.2.1 TE-Messkreis	376
6.4.2.2 Scheinbare Ladung, TE-Energie	377
6.4.2.3 Empfindlichkeit und Kalibrierung	379
6.4.2.4 Signalverarbeitung und -bewertung	380
6.4.2.5 Störungsfreies Messen	382
6.4.2.6 TE-Diagnose	383
6.4.2.7 UHF-TE-Diagnose	387
6.4.2.8 Nicht-elektrische Methoden der TE-Diagnose	389
6.4.3 Chemische Analysen	389
6.4.3.1 Bestimmung des Wassergehalts	390
6.4.3.2 Gas-in-Öl-Analyse	391
6.4.3.3 Hochdruck-Flüssigkeits-chromatographie (HPLC)	395
6.4.3.4 Bestimmung des Polymerisationsgrades von Zellulose	396
6.4.4 Isolierstoffprüfungen	396
6.4.4.1 Dielektrische Messungen	396
6.4.4.2 Durchschlagsmessungen	396
6.4.4.3 Kriechstromfestigkeit	399
6.4.4.4 Lichtbogenfestigkeit	400
6.4.4.5 Weitere Isolierstoffprüfungen	401
6.4.5 Optische und akustische Diagnoseverfahren	401
6.4.5.1 Lichtwellenleiter	401
6.4.5.2 Visuelle Diagnostik	402
6.4.5.3 Akustische Diagnostik	402
6.4.6 Bestimmung von Systemeigenschaften	403
6.4.6.1 Stoßstromverlauf	403
6.4.6.2 Übertragungsfunktionen	403
6.4.6.3 Frequenzgangmessungen	405
6.4.6.4 Reflektometrie	405
6.4.7 Dielektrische Diagnose	405
6.4.7.1 Zeit- und Frequenzbereich	405
6.4.7.2 Selektive Messungen	406
6.4.7.3 Entladespannungsmessung	407
6.4.7.4 IRC-Analyse	407
6.4.7.5 Rückkehrspannungsanalyse	408
6.4.7.6 PDC-Analyse	410
6.4.7.7 Frequenzbereichsanalyse	416
6.4.8 Online-Monitoring	418
6.4.8.1 Monitoring von Transformatoren	418
6.4.8.2 Monitoring von Durchführungen	421
6.4.8.3 Monitoring rotierender Maschinen	423
6.4.8.4 Monitoring von VPE-Kabeln und Garnituren	424
6.4.8.5 Monitoring weiterer Betriebsmittel	425

7 Anwendungen	427
7.1 Typische Isolationssysteme für Wechselspannungen	427
7.1.1 Kabel und Garnituren	427
7.1.1.1 Papierisolierte Kabel	427
7.1.1.2 Kunststoffkabel	429
7.1.1.3 Gasisolierte Leitungen (GIL)	431
7.1.1.4 Kabelgarnituren	431
7.1.1.5 Prüfung von Kabelsystemen	433
7.1.2 Durchführungen	435
7.1.2.1 Feld- bzw. Potentialsteuerung	435
7.1.2.2 Berechnung kapazitiver Steuerungen	437
7.1.2.3 Bauformen	439
7.1.3 Transformatoren	440
7.1.3.1 Öl- und Trockentransformatoren, Drosseln	441
7.1.3.2 Wicklungsaufbau, Stufenschalter	442
7.1.3.3 Aufbau der Öl-Board-Isolation	445
7.1.3.4 Fertigung	452
7.1.3.5 Transformatorprüfung	452
7.1.3.6 Betrieb, Diagnose und Wartung	458
7.1.4 Kondensatoren	462
7.1.4.1 Aufbau des Dielektrikums	463
7.1.4.2 Trocknung und Imprägnierung	463
7.1.4.3 Kondensatorbauarten	464
7.1.4.4 Messkondensatoren	464
7.1.5 Leistungsschalter	465
7.1.5.1 Entwicklung der Schaltgeräte	465
7.1.5.2 SF ₆ -Druckgasschalter	466
7.1.5.3 Vakuumschalter	469
7.1.6 Elektrische Maschinen	471
7.1.6.1 Niederspannungsmotoren	472
7.1.6.2 Maschinen für hohe Leistungen	473
7.1.6.3 Kabelgeneratoren und -maschinen	476
7.2 Typische Isolationssysteme für Gleichspannungen.....	477
7.2.1 Beanspruchung und Festigkeit	477
7.2.2 Gleichspannungskondensatoren	478
7.2.3 HGÜ-Transformatoren	479
7.2.3.1 Beanspruchungen	479
7.2.3.2 Wechsel- und stationäre Gleichspannungsbeanspruchung	480
7.2.3.3 Belastungen bei Spannungsänderungen	482
7.2.3.4 Übergangsvorgänge (Transienten)	483
7.2.3.5 Einflüsse der Materialien	487
7.2.4 Äußere Isolation	488
7.2.5 Hochfrequent getaktete Gleichspannungen	491
7.2.5.1 Anwendungen	491
7.2.5.2 Isolationsprobleme	491
7.2.5.3 Prüftechnik	492
7.3 Typische Isolationssysteme für Impulsspannungen.....	492
7.3.1 Beanspruchung und Festigkeit	492
7.3.2 Energiespeicherung	493
7.3.3 Impulskondensatoren (Energiespeicher-, Stoßkondensatoren).....	493
7.3.3.1 Aufbau des Kondensators	493
7.3.3.2 Die sogenannte „Kondensatorinduktivität“	494
7.3.3.3 Dielektrikum und Lebensdauer	494
7.3.4 Barrierensysteme	496

7.4 Weitere Anwendungen	497
7.4.1 Blitzschutz.....	497
7.4.2 Hochleistungsimpulstechnik	499
7.4.2.1 Impulsstromkreise	499
7.4.2.2 Akustische Stoßwellen	500
7.4.2.3 Gepulste Teilchen- und Laserstrahlen	500
7.4.2.4 Elektrodynamische Erzeugung nanokristalliner Werkstoffe	501
7.4.2.5 Elektrodynamische Fragmentierung	501
7.4.2.6 Elektroporation biologischer Zellen	502
7.4.3 Licht- und Lasertechnik	502
7.4.4 Röntgentechnik	503
7.4.5 Partikelabscheidung, Ionisierung	504
7.4.6 Zündkerzen.....	505
7.5 Supraleitende Betriebsmittel	507
7.5.1 Supraleitung	507
7.5.2 HTSL-Leitermaterial.....	508
7.5.3 Isolation und Kühlung mit LN ₂	509
7.5.4 Anwendungen	510
7.5.4.1 SMES Supraleitende magnetische Energiespeicher	510
7.5.4.2 Kurzschlussstrombegrenzer, Schalter	511
7.5.4.3 Kabel	512
7.5.4.4 Motoren, Generatoren	513
7.5.4.5 Transformatoren	513
8 Literatur	516
9 Sachwortverzeichnis	529