

Hochspannungstechnik

Grundlagen – Technologie – Anwendungen

Prof. Dr.-Ing. Andreas Küchler

Inhalt

Symbole und Abkürzungen	XIV
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 Maxwell'schen Feldgleichungen	9
2.1.3.1 Die Maxwell'schen Hauptgleichungen (Feldgleichungen)	10
2.1.3.2 Die Maxwell'schen Nebengleichungen (Kontinuitätsgleichungen)	10
2.1.3.3 Die Stoffgleichungen	12
2.1.4 Einteilung der Felder	13
2.1.4.1 Statische Felder	13
2.1.4.2 Stationäre Felder	13
2.1.4.3 Langsam veränderliche Felder in Leitern (Induktive Felder)	15
2.1.4.4 Langsam veränderliche Felder in Isolierstoffen (Kapazitive Felder)	16
2.1.4.5 Schnell veränderliche Felder	19
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")	24
2.2.5 Beanspruchung mit sehr schnell ansteigenden Impulsen ("Fast Transients")	25
2.2.6 Gemischte Beanspruchungen	27
2.3 Statische, stationäre und quasistationäre Felder in homogenen Dielektrika	29
2.3.1 Analytische Auswertung der Kontinuitätsgleichung	29
2.3.1.1 Grundsätzlicher Berechnungsweg	29
2.3.1.2 Kugelsymmetrische Felder	31
2.3.1.3 Zylindersymmetrische Felder	34
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	47
2.3.5.1 Leitende Kugeln	48
2.3.5.2 Feld zwischen zwei leitenden Kugeln (Kugelfunkenstrecke)	54
2.3.5.3 Parallele Linienladungen	57

2.3.5.4	Felder in der Umgebung zylindrischer Leiter (Beispiele)	59
2.3.6	Ähnlichkeitsbeziehungen, Homogenitätsgrad, Ausnutzungsfaktor	71
2.3.7	Ausmessung stationärer Strömungsfelder	74
2.3.7.1	Analogie zwischen dielektr. Verschiebungsfeld u. stationärem Strömungsfeld	74
2.3.7.2	Messungen auf halbleitendem Papier ("Widerstandspapier")	74
2.3.7.3	Messungen in halbleitenden Flüssigkeiten ("Elektrolytischer Trog")	75
2.4	Statische, stationäre und quasistationäre Felder in inhomogenen Dielektrika	75
2.4.1	Leitfähigkeit und Polarisierung	76
2.4.1.1	Leitfähigkeit	76
2.4.1.2	Polarisierung	77
2.4.2	Geschichtete Dielektrika	80
2.4.2.1	Grenzflächen	80
2.4.2.2	Quer geschichtetes Dielektrikum ("Feldverdrängung")	81
2.4.2.3	Längs geschichtetes Dielektrikum (Tangentiale Grenzfläche, "Interface")	83
2.4.2.4	Schräg geschichtetes Dielektrikum ("Brechungsgesetze")	84
2.4.3	Analytische Berechnung geschichteter Dielektrika	85
2.4.3.1	Ebene, zylindersymmetrische und kugelsymmetrische Schichtungen	86
2.4.3.2	Spalte und Risse	91
2.4.3.3	Zwickel ("Tripel-Punkte")	92
2.4.3.4	Hohlräume und dielektrische Kugeln	96
2.4.4	Gleichspannung und Übergangsvorgänge	97
2.4.4.1	Analogien zum dielektrischen Verschiebungsfeld	98
2.4.4.2	Typische Gleichspannungsfelder (Beispiele)	100
2.4.4.3	Übergangsvorgänge (Beispiele)	104
2.5	Numerische Feldberechnung	110
2.5.1	Übersicht	110
2.5.2	Ersatzladungsverfahren	111
2.5.3	Differenzenverfahren	113
2.5.4	Methode der Finiten Elemente	115
2.6	Schnell veränderliche Felder und Wanderwellen	120
2.6.1	Leitungsgebundene TEM-Welle	120
2.6.2	Reflexionsvorgänge	125
2.6.2.1	Grundlagen	125
2.6.2.2	Wellenersatzbild	127
2.6.2.3	Mehrfachreflexionen	128
2.6.3	Beispiele	130
2.6.3.1	Gasisolierte Schaltanlage ("Fast Transients")	130
2.6.3.2	Schutzbereich von Überspannungsableitern	132
2.6.3.3	Leitungsgeneratoren	134
3	Elektrische Festigkeit	137
3.1	Statistische Grundlagen	137
3.1.1	Statistischer Charakter von Entladungsvorgängen	137
3.1.2	Beschreibung von Entladungsvorgängen mit theoretischen Verteilungsfunktionen	140
3.1.2.1	Vergleich empirischer Verteilungen mit theoretischen Verteilungen	140
3.1.2.2	Die Gaußsche Normalverteilung	141

3.1.2.3	Die Weibull-Verteilung	143
3.1.3	Vergrößerungsgesetze	146
3.1.4	Korrelation und Regression, Lebensdauergesetz	149
3.2	Gasentladungen	152
3.2.1	Gasentladungskennlinien	152
3.2.1.1	Unselbständige und selbständige Entladung	152
3.2.1.2	Gasentladungskennlinie, Einstellung von Arbeitspunkten	153
3.2.1.3	Erscheinungsformen von Gasentladungen	155
3.2.2	Raumladungsfreie Entladungen im homogenen Feld (Townsend, Paschen).....	157
3.2.2.1	Zündbedingung nach Townsend (Generationenmechanismus)	157
3.2.2.2	Ionisierung und Anlagerung	161
3.2.2.3	Gesetz von Paschen	165
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	179
3.2.5.3	Koronaeinsetz 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	192
3.2.7	Funken-, Bogen- und Blitzentladung	195
3.2.7.1	Funkenentladung	195
3.2.7.2	Bogenentladung	197
3.2.7.3	Blitzentladungen	199
3.3	Entladungen in flüssigen und festen Dielektrika	203
3.3.1	Entladungen in Flüssigkeiten	204
3.3.1.1	Entladungsmechanismen in Mineralöl	204
3.3.1.2	Wichtige Einflußgrößen beim Durchschlag in Mineralöl	207
3.3.1.3	Teilentladungen (TE) in Mineralöl	211
3.3.1.4	Andere Isolierflüssigkeiten	212
3.3.2	Entladungen in festen Stoffen	213
3.3.2.1	Elektrischer Durchschlag	213
3.3.2.2	Wärmedurchschlag	215
3.3.2.3	Alterung, Erosionsdurchschlag und Lebensdauer	218
3.4	Teilentladungen (TE)	220
3.4.1	Ursachen für Teilentladungen	221
3.4.1.1	Koronaentladungen	221
3.4.1.2	Innere Teilentladungen	222
3.4.1.3	Oberflächenentladungen	224
3.4.2	Teilentladungsquellen	224
3.4.2.1	TE-Quellen in Gasen	224
3.4.2.2	TE-Quellen in Flüssigkeiten	225

3.4.2.3	TE-Quellen in festen Stoffen	225
3.4.3	TE-Interpretation bei Wechselspannung	226
3.4.3.1	Klassische TE-Interpretation	226
3.4.3.2	Neue Ansätze der TE-Interpretation	230
3.4.3.3	Nicht-elektrische Methoden der TE-Diagnose	231
4	Dielektrische Eigenschaften	232
4.1	Allgemeine Eigenschaften von Isolierstoffen	232
4.2	Dielektrische Eigenschaften	232
4.2.1	Dielektrizitätszahl ϵ_r	233
4.2.1.1	Polarisationsmechanismen	233
4.2.1.2	Frequenzabhängigkeit (Dispersion)	234
4.2.1.3	Temperaturabhängigkeit	235
4.2.1.4	Feldstärkeabhängigkeit	235
4.2.1.5	Mischdielektrika	236
4.2.2	Leitfähigkeit κ	236
4.2.3	Verlustfaktor $\tan \delta$	239
4.2.4	Komplexe Dielektrizitätszahl	240
4.3	Beschreibung von Dielektrika mit Ersatzschaltbildern	242
4.3.1	Parallel- und Reihenersatzschaltbild	243
4.3.2	Ersatzschaltbilder höherer Ordnung	244
4.3.2.1	Maxwellsches Zweischichtenmodell	244
4.3.2.2	Erweitertes Polarisationsersatzbild	245
5	Isolierstoffe	247
5.1	Gase	247
5.1.1	Luft	248
5.1.2	Schwefelhexafluorid (SF ₆)	248
5.2	Anorganische feste Isolierstoffe	249
5.2.1	Porzellan und Keramik	249
5.2.2	Glas	251
5.2.3	Glimmerprodukte	252
5.3	Hochpolymere Kunststoffe	252
5.3.1	Bildungsreaktionen und Vernetzung	253
5.3.2	Thermoplastische Isolierkunststoffe	254
5.3.2.1	Polyäthylen (PE)	254
5.3.2.2	Polyvinylchlorid (PVC)	255
5.3.2.3	Polypropylen (PP)	256
5.3.2.4	Hochtemperaturbeständige Thermoplaste	257
5.3.2.5	Polyamide (PA) und Aramide	257
5.3.2.6	Polytetrafluoräthylen (PTFE)	258
5.3.2.7	Polymethylmethacrylat (PMMA)	259
5.3.3	Duroplaste und Elastomere	259
5.3.3.1	Epoxidharze	259

5.3.3.2	Polyurethane (PU)	265
5.3.3.3	Phenolharze (PF) und Hartpapier	265
5.3.3.4	Silikonharze und -elastomere (SIR)	266
5.4	Isolierflüssigkeiten	270
5.4.1	Technologie der Isolierflüssigkeiten	270
5.4.2	Mineralöl	270
5.4.3	Synthetische Isolierflüssigkeiten	274
5.4.3.1	Polychlorierte Biphenyle (PCB)	274
5.4.3.2	Silikonflüssigkeiten ("Silikonöle")	274
5.4.3.3	Andere organische Flüssigkeiten	275
5.4.4	Pflanzliche Öle	276
5.4.5	Wasser	277
5.4.6	Verflüssigte Gase	278
5.5	Faserstoffe	279
5.5.1	Papier und Preßspan	279
5.5.1.1	Elektrische Festigkeit	279
5.5.1.2	Dielektrische Eigenschaften, Feuchtigkeit und Alterung	280
5.5.1.3	Herstellung und Verarbeitung	282
5.5.2	Synthetische Faserstoffe	286
6	Prüfen, Messen, Diagnose	287
6.1	Qualitätssicherung	287
6.1.1	Qualitätssicherungssysteme	287
6.1.2	Zertifizierung und Akkreditierung	287
6.1.3	Kalibrierung	288
6.1.4	Hochspannungsprüfungen und Isolationskoordination	290
6.2	Erzeugung hoher Spannungen	291
6.2.1	Erzeugung von Wechselspannungen	292
6.2.1.1	Erzeugungsprinzipien	292
6.2.1.2	Prüftransformatoren	293
6.2.1.3	Kaskadenschaltung	295
6.2.1.4	Kapazitive Spannungsüberhöhung und Resonanz	296
6.2.2	Erzeugung von Gleichspannungen	298
6.2.2.1	Hochspannungsgleichrichter	298
6.2.2.2	Gleichrichterschaltungen	299
6.2.2.3	Schaltnetzteile	301
6.2.2.4	Elektrostatische Generatoren	302
6.2.3	Erzeugung von Stoßspannungen	304
6.2.3.1	Stoßspannungsformen	304
6.2.3.2	Einstufige Stoßspannungsgeneratoren	305
6.2.3.3	Mehrstufige Stoßspannungsgeneratoren	308
6.2.3.4	Stoßstromgeneratoren	311
6.2.3.5	Kombinierte Prüfschaltungen	312
6.2.3.6	Spezielle Impulsgeneratoren	312

6.3	Hochspannungsmesstechnik	316
6.3.1	Meßfunkenstrecken	316
6.3.1.1	Kugelfunkenstrecke	316
6.3.1.2	Stab-Stab-Funkenstrecke	318
6.3.2	Elektrostatische Voltmeter	318
6.3.3	Feldsensoren	319
6.3.3.1	Räumlich konzentrierte Sensoren	319
6.3.3.2	Räumlich ausgedehnte Sensoren	320
6.3.3.3	Potentialfreie Sonden	320
6.3.3.4	Generatorische Sensoren	321
6.3.4	Spannungsteiler	321
6.3.4.1	Übertragungsverhalten	321
6.3.4.2	Teilerbauarten	323
6.3.4.3	Ankopplungsschaltungen	324
6.3.5	Wandler	325
6.3.6	Effektiv-, Scheitelwert- und Oberschwingungsmessungen	327
6.3.7	Strommessung	328
6.3.8	Elektromagnetische Verträglichkeit (EMV)	329
6.4	Diagnose	330
6.4.1	Dielektrische Messungen	330
6.4.1.1	Verlustfaktor und Kapazität	330
6.4.1.2	Isolationswiderstand	332
6.4.1.3	Dielektrische Diagnostik	332
6.4.2	Teilentladungsmessungen	334
6.4.2.1	TE-Meßkreis	334
6.4.2.2	Scheinbare Ladung, Kalibrierung	334
6.4.2.3	Signalverarbeitung und -bewertung	336
6.4.3	Bestimmung von Systemeigenschaften	338
6.4.3.1	Stoßstrommessungen	338
6.4.3.2	Transferfunktionen	339
6.4.3.3	Frequenzgangmessungen	339
6.4.3.4	Reflektometrie	339
6.4.4	Chemische Analysen	340
6.4.4.1	Bestimmung des Wassergehalts	340
6.4.4.2	Gas-in-Öl-Analyse	341
6.4.4.3	Hochdruck-Flüssigkeitschromatographie (HPLC)	344
6.4.4.4	Bestimmung des Polymerisationsgrades von Zellulose	344
6.4.5	Optische und akustische Diagnoseverfahren	344
6.4.6	Isolierstoffprüfungen	345
6.4.6.1	Dielektrische Messungen	345
6.4.6.2	Durchschlagsmessungen	345
6.4.6.3	Kriechstromfestigkeit	347
6.4.6.4	Lichtbogenfestigkeit	347
7	Anwendungen	349
7.1	Typische Isolationssysteme für Wechselspannungen	349
7.1.1	Kabel und Garnituren	349
7.1.1.1	Papierisolierte Kabel	350
7.1.1.2	Kunststoffkabel	350

7.1.1.3	Kabelgarnituren	351
7.1.2	Durchführungen	352
7.1.2.1	Feldsteuerung	352
7.1.2.2	Bauformen	354
7.1.3	Transformatoren	355
7.1.3.1	Wicklungsaufbau	355
7.1.3.2	Aufbau der Isolation	357
7.1.3.3	Fertigung, Prüfung, Diagnose	358
7.1.4	Kondensatoren	359
7.1.4.1	Aufbau des Dielektrikums	359
7.1.4.2	Imprägnierung	361
7.1.4.3	Kondensatorbauarten	361
7.1.4.4	Meßkondensatoren	361
7.1.5	Leistungsschalter	362
7.1.5.1	Entwicklung der Schaltgeräte	362
7.1.5.2	SF ₆ -Druckgasschalter	362
7.1.5.3	Vakuumrichter	364
7.1.6	Elektrische Maschinen	365
7.2	Typische Isolationssysteme für Gleichspannungen	366
7.2.1	Beanspruchung und Festigkeit	366
7.2.2	Gleichspannungskondensatoren	367
7.2.3	Barrierensysteme, Spalte und Durchführungen für die HGÜ	368
7.2.4	Äußere Isolation	370
7.3	Typische Isolationssysteme für Impulsspannungen	372
7.3.1	Beanspruchung und Festigkeit	372
7.3.2	Energiespeicherung	372
7.3.3	Impulskondensatoren (Energiespeicher-, Stoßkondensatoren)	373
7.3.3.1	Aufbau des Kondensators	373
7.3.3.2	Die sogenannte "Kondensatorinduktivität"	374
7.3.3.3	Dielektrikum und Lebensdauer	374
7.3.4	Impulsstromkreise (vgl. auch Kap. 6.2.3)	375
7.4	Weitere Anwendungen	376
7.4.1	Blitzschutz	376
7.4.2	Stoßwellenerzeugung	377
7.4.3	Licht- und Lasertechnik	378
7.4.4	Röntgentechnik	379
7.4.5	Partikelabscheidung	380
7.5	Supraleitung	380
8	Literatur	382
9	Sachwortverzeichnis	389