

Inhalt

Symbol 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	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 Polarisation.....	75
2.4.1.1 Leitfähigkeit	75
2.4.1.2 Polarisation	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 (Tangentielle 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
2.4.5 Feldsteuerung an Grenzflächen.....	108
2.5 Numerische Feldberechnung.....	110
2.5.1 Übersicht	110
2.5.2 Ersatzladungsverfahren	111
2.5.3 Finite-Differenzen-Verfahren	113
2.5.4 Methode der Finiten Elemente	115
2.6 Schnell veränderliche Felder und Wanderwellen	121
2.6.1 Leitungsgebundene TEM-Welle	121
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.....	131
2.6.3.1 Gasisolierte Schaltanlage („Fast Transients“)	131
2.6.3.2 Schutzbereich von Überspannungsableitern	133
2.6.3.3 Leitungsgeneratoren	134
3 Elektrische Festigkeit	137
3.1 Statistische Grundlagen	137
3.1.1 Statistische Beschreibung von Entladungsvorgängen.....	137
3.1.1.1 Zufallsgrößen	137
3.1.1.2 Verteilungsfunktionen	138
3.1.1.3 Parameterschätzung	140
3.1.1.4 Beispiel einer Messreihe	141
3.1.2 Beschreibung von Entladungsvorgängen mit theoretischen Verteilungsfunktionen	142
3.1.2.1 Vergleich empirischer Verteilungen mit theoretischen Verteilungen	143
3.1.2.2 Die Gaußsche Normalverteilung	144
3.1.2.3 Die Weibull-Verteilung	145

3.1.2.4 Parameterschätzung	147
3.1.3 Vergrößerungsgesetze	149
3.1.4 Korrelation und Regression, Lebensdauergesetz	152
3.2 Gasentladungen	154
3.2.1 Gasentladungskennlinien	155
3.2.1.1 Unselbständige und selbständige Entladung	155
3.2.1.2 Gasentladungskennlinie, Einstellung von Arbeitspunkten	155
3.2.1.3 Erscheinungsformen von Gasentladungen	158
3.2.2 Raumladungsfreie Entladung im homogenen Feld (nach Townsend und Paschen)....	160
3.2.2.1 Zündbedingung nach Townsend (Generationenmechanismus)	160
3.2.2.2 Ionisierung und Anlagerung	165
3.2.2.3 Gesetz von Paschen	168
3.2.3 Raumladungsbeschwerte Entladung, Kanalentladung (Streamer-Mechanismus)	174
3.2.4 Entladeverzug, Stoßkennlinien und Hochfrequenzdurchschlag	177
3.2.4.1 Zünd- und Entladeverzug	177
3.2.4.2 Stoßkennlinien	179
3.2.4.3 Hochfrequenzdurchschlag	181
3.2.5 Entladungen im inhomogenen Feld	182
3.2.5.1 Vorentladungen und Durchschlag	182
3.2.5.2 Polaritätseffekt	183
3.2.5.3 Koronaeinsatz und Vorentladungen	185
3.2.5.4 Durchschlagsspannungen	187
3.2.5.5 Einfluss verschiedener Parameter	189
3.2.6 Oberflächenentladungen	192
3.2.6.1 Anordnungen mit Oberflächen	192
3.2.6.2 Zündung von Gleitentladungen	193
3.2.6.3 Entwicklung von Gleitentladungen	195
3.2.6.4 Fremdschichtüberschlag	197
3.2.7 Funken-, Bogen- und Blitzentladung	199
3.2.7.1 Funkenentladung	199
3.2.7.2 Bogenentladung	202
3.2.7.3 Blitzentladungen	204
3.2.7.4 „Kugelblitze“	207
3.3 Entladungen in flüssigen und festen Dielektrika.....	208
3.4 Entladungen in Flüssigkeiten	210
3.4.1 Entladungsmechanismen in Mineralöl.....	210
3.4.1.1 Phasen des Öldurchschlags	211
3.4.1.2 Die Flüssigkeit vor der Zündung	213
3.4.1.3 Initialprozesse	215
3.4.1.4 Ausbreitung der Streamer	219
3.4.2 Wichtige Einflussgrößen beim Durchschlag in Mineralöl.....	224
3.4.2.1 Feuchtigkeit und Verschmutzung	225
3.4.2.2 Temperaturabhängigkeit	226
3.4.2.3 Druckabhängigkeit	227
3.4.2.4 Barrieren und Umformungen	228
3.4.2.5 Zeitabhängigkeiten, Zeitfaktoren	229
3.4.3 Teilentladungen (TE) in Mineralöl	231
3.4.4 Andere Isolierflüssigkeiten	233
3.5 Entladungen in festen Stoffen	233
3.5.1 Elektrischer Durchschlag	234
3.5.2 Wärmedurchschlag.....	235
3.5.3 Alterung, Erosionsdurchschlag und Lebensdauer.....	239

3.6 Teilentladungen (TE)	242
3.6.1 Ursachen für Teilentladungen	243
3.6.1.1 Koronaentladungen	243
3.6.1.2 Innere Teilentladungen	244
3.6.1.3 Oberflächenentladungen	247
3.6.2 Teilentladungsquellen	247
3.6.2.1 TE-Quellen in Gasen	247
3.6.2.2 TE-Quellen in Flüssigkeiten	248
3.6.2.3 TE-Quellen in festen Stoffen	248
3.6.3 Klassische TE-Interpretation bei Wechselspannung	249
3.6.3.1 TE-Interpretation bei AC	249
3.6.3.2 TE-Interpretation bei DC	253
3.7 Vakuumdurchschlag	253
3.7.1 Physikalischer Prozess	254
3.7.2 Technische Festigkeiten	255
3.7.3 Anwendungen	257
4 Dielektrische Systemeigenschaften	259
4.1 Polarisation in Zeit- und Frequenzbereich	259
4.1.1 Beschreibung im Zeitbereich	259
4.1.2 Beschreibung im Frequenzbereich	262
4.2 Dielektrische Kenngrößen	262
4.2.1 Dielektrizitätszahl ϵ_r	263
4.2.1.1 Polarisationsmechanismen	263
4.2.1.2 Frequenzabhängigkeit (Dispersion)	264
4.2.1.3 Temperaturabhängigkeit	265
4.2.1.4 Feldstärkeabhängigkeit	266
4.2.1.5 Mischdielektrika	266
4.2.2 Leitfähigkeit κ	266
4.2.2.1 Leitfähigkeit in Gasen	267
4.2.2.2 Leitfähigkeit in Flüssigkeiten	267
4.2.2.3 Leitfähigkeit in festen Stoffen	269
4.2.2.4 Feldstärke- und Temperatureinfluss	271
4.2.3 Verlustfaktor $\tan \delta$	272
4.2.4 Komplexe Dielektrizitätszahl	274
4.3 Beschreibung von Dielektrika	277
4.3.1 Klassische Parallel- und Reihenersatzschaltbilder	278
4.3.2 Beschreibung von Materialeigenschaften	279
4.3.2.1 Lineares Polarisations-Ersatzschaltbild	279
4.3.2.2 Nichtlineare Ersatzschaltbilder	281
4.3.3 Beschreibung von Geometrieigenschaften	282
4.3.3.1 Maxwellsches Zweischichtenmodell	282
4.3.3.2 Einfache Schichtungen	284
4.3.3.3 Komplexe Geometrien	285
5 Isolierstoffe	287
5.1 Gase	287
5.1.1 Luft	288
5.1.2 Schwefelhexafluorid (SF_6)	288

5.2 Anorganische feste Isolierstoffe	290
5.2.1 Porzellan und Keramik.....	290
5.2.2 Glas	291
5.2.3 Glimmerprodukte	292
5.3 Hochpolymere Kunststoffe	293
5.3.1 Bildungsreaktionen und Vernetzung.....	294
5.3.2 Thermoplastische Isolierstoffe	295
5.3.2.1 Polyäthylen (PE und VPE)	295
5.3.2.2 Polyvinylchlorid (PVC)	297
5.3.2.3 Polypropylen (PP)	297
5.3.2.4 Hochtemperaturbeständige Thermoplaste	298
5.3.2.5 Polyamide (PA) und Aramide	299
5.3.2.6 Polytetrafluoräthylen (PTFE)	300
5.3.2.7 Polymethylmethacrylat (PMMA)	300
5.3.3 Duroplaste und Elastomere	301
5.3.3.1 Epoxidharze	301
5.3.3.2 Polyurethane (PU)	307
5.3.3.3 Phenolharze (PF) und Hartpapier	308
5.3.3.4 Elastomere und Schrumpfschläuche	308
5.3.4 Silikone	309
5.3.4.1 Eigenschaften von Silikonen	309
5.3.4.2 Hydrophobe Isolatoren	311
5.3.4.3 Weitere Anwendungen von Silikonen	313
5.3.5 Nano-Dielektrika.....	314
5.3.5.1 Einführung	314
5.3.5.2 Prinzip der Nanostrukturierung	315
5.3.5.3 Dielektrische Eigenschaften	316
5.3.5.4 Anwendungen	317
5.4 Isolierflüssigkeiten.....	317
5.4.1 Technologie der Isolierflüssigkeiten	317
5.4.2 Mineralöl	319
5.4.3 Synthetische Isolierflüssigkeiten.....	322
5.4.3.1 Polychlorierte Biphenyle (PCB)	322
5.4.3.2 Silikonflüssigkeiten („Silikonöle“)	322
5.4.3.3 Andere organische Flüssigkeiten	323
5.4.4 Pflanzliche Öle	324
5.4.5 Wasser	325
5.4.6 Verflüssigte Gase	326
5.5 Faserstoffe	328
5.5.1 Papier und Pressspan.....	329
5.5.1.1 Elektrische Festigkeit	329
5.5.1.2 Dielektrische Eigenschaften, Feuchtigkeit und Alterung	330
5.5.1.3 Zustandsbewertung	332
5.5.1.4 Herstellung und Verarbeitung	334
5.5.2 Synthetische Faserstoffe	338
6 Prüfen, Messen, Diagnose.....	339
6.1 Qualitätssicherung	339
6.1.1 Qualitätssicherungssysteme	339
6.1.2 Zertifizierung und Akkreditierung	340
6.1.3 Kalibrierung	340

6.1.4 Isolationskoordination.....	342
6.1.4.1 Prinzip der Isolationskoordination	342
6.1.4.2 Hochspannungsprüfungen	345
6.1.4.3 Überspannungsableiter	346
6.2 Erzeugung hoher Spannungen.....	348
6.2.1 Erzeugung von Wechselspannungen	350
6.2.1.1 Erzeugungsprinzipien	350
6.2.1.2 Prüftransformatoren	351
6.2.1.3 Kaskadenschaltung	353
6.2.1.4 Kapazitive Spannungsüberhöhung bei Transformatoren	354
6.2.1.5 Serienresonanz-Prüfanlagen	356
6.2.1.6 Anforderungen an Labor- und Vor-Ort-Prüfspannungen	359
6.2.2 Erzeugung von Gleichspannungen.....	362
6.2.2.1 Hochspannungsgleichrichter	362
6.2.2.2 Gleichrichterschaltungen	363
6.2.2.3 Schaltnetzteile	366
6.2.2.4 Elektrostatische Generatoren	367
6.2.3 Erzeugung von Stoßspannungen.....	368
6.2.3.1 Stoßspannungsformen	368
6.2.3.2 Einstufige Stoßspannungsgeneratoren	371
6.2.3.3 Mehrstufige Stoßspannungsgeneratoren	374
6.2.3.4 Stoßstromgeneratoren	376
6.2.3.5 Kombinierte Prüfschaltungen	378
6.2.3.6 Spezielle Impulsgeneratoren	378
6.3 Hochspannungsmesstechnik.....	382
6.3.1 Messfunkenstrecken	382
6.3.1.1 Kugelfunkenstrecke	382
6.3.1.2 Stab-Stab-Funkenstrecke	385
6.3.2 Elektrostatische Voltmeter	386
6.3.3 Feldsensoren.....	386
6.3.3.1 Räumlich konzentrierte Sensoren	386
6.3.3.2 Räumlich ausgedehnte Sensoren	387
6.3.3.3 Potentialfreie Sonden	388
6.3.3.4 Generatorische Sensoren	388
6.3.3.5 Elektro- und magnetooptische Feldsensoren	389
6.3.4 Spannungsteiler.....	392
6.3.4.1 Übertragungsverhalten	392
6.3.4.2 Teilerbauarten	394
6.3.4.3 Streukapazitäten	396
6.3.4.4 Niederspannungsteile	397
6.3.4.5 Ankopplungsschaltungen	398
6.3.5 Wandler	399
6.3.5.1 Spannungswandler	399
6.3.5.2 Stromwandler	401
6.3.6 Effektiv-, Scheitelwert- und Oberschwingungsmessungen	402
6.3.7 Strommessung	404
6.3.8 Elektromagnetische Verträglichkeit (EMV)	405
6.4 Diagnose und Monitoring	406
6.4.1 Dielektrische Messungen	407
6.4.1.1 Verlustfaktor und Kapazität	407
6.4.1.2 Isolationswiderstand, Leitfähigkeit	410
6.4.1.3 Dielektrische Systemantwort	411
6.4.2 Teilentladungsmessung und -diagnose	413
6.4.2.1 TE-Messkreis	414

6.4.2.2 Scheinbare Ladung, TE-Energie	415
6.4.2.3 Empfindlichkeit und Kalibrierung	417
6.4.2.4 Signalverarbeitung und -bewertung	418
6.4.2.5 Störungsfreies Messen	421
6.4.2.6 TE-Diagnose	423
6.4.2.7 Synchrone Mehrkanal-TE-Messung	427
6.4.2.8 UHF-TE-Diagnose	431
6.4.2.9 Nicht-elektrische Methoden der TE-Diagnose	433
6.4.3 Chemische Analysen	433
6.4.3.1 Bestimmung des Wassergehalts	434
6.4.3.2 Gas-in-Öl-Analyse	435
6.4.3.3 Hochdruck-Flüssigkeits-chromatographie (HPLC)	440
6.4.3.4 Bestimmung des Polymerisationsgrades von Zellulose	441
6.4.4 Isolierstoffprüfungen.....	441
6.4.4.1 Dielektrische Messungen	441
6.4.4.2 Durchschlagsmessungen	441
6.4.4.3 Kriechstromfestigkeit	444
6.4.4.4 Lichtbogenfestigkeit	445
6.4.4.5 Weitere Isolierstoffprüfungen	446
6.4.5 Optische und akustische Diagnoseverfahren	446
6.4.5.1 Lichtwellenleiter	446
6.4.5.2 Visuelle Diagnostik	447
6.4.5.3 Akustische Diagnostik	447
6.4.6 Bestimmung von Systemeigenschaften	448
6.4.6.1 Stoßstromverlauf	448
6.4.6.2 Übertragungsfunktionen, Frequency Response Analysis FRA	448
6.4.6.3 Frequenzgangmessungen	450
6.4.6.4 Reflektometrie	450
6.4.7 Dielektrische Diagnose	450
6.4.7.1 Zeit- und Frequenzbereich	451
6.4.7.2 Selektive Messungen	452
6.4.7.3 Entladespannungsmessung	452
6.4.7.4 IRC-Analyse	454
6.4.7.5 Rückkehrspannungsanalyse	454
6.4.7.6 PDC-Analyse	457
6.4.7.7 Frequenzbereichsanalyse	464
6.4.7.8 Dielektrische Diagnose im Zeit- und Frequenzbereich	466
6.4.8 Online-Monitoring	467
6.4.8.1 Monitoring von Transformatoren	468
6.4.8.2 Monitoring von Durchführungen	470
6.4.8.3 Monitoring rotierender Maschinen	472
6.4.8.4 Monitoring von VPE-Kabeln und Garnituren	473
6.4.8.5 Monitoring weiterer Betriebsmittel	475
7 Anwendungen	477
7.1 Typische Isoliersysteme für Wechselspannungen	477
7.1.1 Kabel und Garnituren.....	477
7.1.1.1 Papierisierte Kabel	477
7.1.1.2 Kunststoffkabel	479
7.1.1.3 Gasisolierte Leitungen (GIL)	481
7.1.1.4 Kabelgarnituren	481
7.1.1.5 Prüfung von Kabelsystemen	485
7.1.2 Durchführungen	487
7.1.2.1 Feld- bzw. Potentialsteuerung	487
7.1.2.2 Berechnung kapazitiver Steuerungen	488
7.1.2.3 Bauformen	490

7.1.3 Transformatoren.....	492
7.1.3.1 Öl- und Trockentransformatoren, Drosseln	493
7.1.3.2 Wicklungsaufbau, Stufenschalter	494
7.1.3.3 Aufbau der Öl-Board-Isolierung	496
7.1.3.4 Fertigung	503
7.1.3.5 Transformatorprüfung	504
7.1.3.6 Betrieb, Diagnose und Wartung	510
7.1.4 Kondensatoren	514
7.1.4.1 Aufbau des Dielektrikums	514
7.1.4.2 Trocknung und Imprägnierung	515
7.1.4.3 Kondensatorbauarten	516
7.1.4.4 Messkondensatoren	516
7.1.5 Leistungsschalter.....	516
7.1.5.1 Entwicklung der Schaltgeräte	517
7.1.5.2 SF ₆ -Druckgasschalter	517
7.1.5.3 Vakumschalter	521
7.1.6 Elektrische Maschinen	523
7.1.6.1 Niederspannungsmotoren	523
7.1.6.2 Maschinen für hohe Leistungen	525
7.1.6.3 Kabelgeneratoren und -maschinen	527
7.2 Typische Isoliersysteme für Gleichspannungen	529
7.2.1 Beanspruchung und Festigkeit	529
7.2.2 Gleichspannungskondensatoren.....	530
7.2.3 HGÜ-Transformatoren.....	531
7.2.3.1 Beanspruchungen	531
7.2.3.2 Wechsel- und stationäre Gleichspannungsbeanspruchung	534
7.2.3.3 Belastungen bei Spannungsänderungen	536
7.2.3.4 Übergangsvorgänge (Transienten)	537
7.2.3.5 Einflüsse der Materialien	541
7.2.4 Äußere Isolation.....	543
7.2.5 Hochfrequent getaktete Gleichspannungen	544
7.2.5.1 Anwendungen	544
7.2.5.2 Isolationsprobleme	545
7.2.5.3 Prüftechnik	546
7.3 Typische Isoliersysteme für Impulsspannungen	546
7.3.1 Beanspruchung und Festigkeit	546
7.3.2 Energiespeicherung.....	547
7.3.3 Impulkondensatoren (Energiespeicher-, Stoßkondensatoren).....	548
7.3.3.1 Aufbau des Kondensators	548
7.3.3.2 Die sogenannte „Kondensatorinduktivität“	548
7.3.3.3 Dielektrikum und Lebensdauer	549
7.3.4 Barrierensysteme.....	550
7.4 Weitere Anwendungen.....	551
7.4.1 Blitzschutz.....	551
7.4.1.1 Sicherstellung der EMV	552
7.4.1.2 Äußerer Blitzschutz	552
7.4.1.3 Innerer Blitzschutz	554
7.4.1.4 Blitzschutzzonenkonzept	555
7.4.2 Hochleistungsimpulstechnik	556
7.4.2.1 Impulstromkreise	556
7.4.2.2 Akustische Stoßwellen	556
7.4.2.3 Gepulste Teilchen- und Laserstrahlen	557
7.4.2.4 Elektrodynamische Erzeugung nanokristalliner Werkstoffe	558
7.4.2.5 Elektrodynamische Fragmentierung	558

7.4.2.6 Elektrohydraulische Fragmentierung	559
7.4.2.7 Elektroporation biologischer Zellen	559
7.4.3 Licht- und Lasertechnik	560
7.4.4 Röntgentechnik	561
7.4.5 Partikelabscheidung, Ionisierung	561
7.4.6 Zündkerzen.....	562
7.5 Supraleitende Betriebsmittel.....	565
7.5.1 Supraleitung	565
7.5.2 HTSL-Leitermaterial.....	566
7.5.3 Isolierung/ Kühlung mit LN ₂	568
7.5.4 Anwendungen	568
7.5.4.1 SMES Supraleitende magnetische Energiespeicher	569
7.5.4.2 Kurzschlussstrombegrenzer, Schalter	569
7.5.4.3 Kabel	570
7.5.4.4 Motoren, Generatoren	571
7.5.4.5 Transformatoren	571
8 Literatur	575
9 Sachwortverzeichnis.	591