



dandelion.com

© 2008 AGI-Information Management Consultants  
May be used for personal purposes only or by  
libraries associated to dandelion.com network.

# Elektrische Energieversorgung II

Parameter elektrischer Stromkreise •  
Leitungen • Transformatoren

Von Univ.-Professor Dr.-Ing. Gerhard Herold  
Universität Erlangen-Nürnberg

Mit 261 Bildern

4\*•^

WBibliothek



J. Schlemmbach Fachverlag

# Inhaltsverzeichnis

## 6 Parameter elektrischer Stromkreise

<b>6.1 Kapazitäten von Leiteranordnungen</b> .....	1
6.1.1 Die Kapazität als Integralparameter des elektrostatischen Feldes.....	1
6.1.2 Die Kapazität koaxialer Leiteranordnungen.....	3
6.1.2.1 Das elektrostatische Feld eines linienhaften Leiters.....	3
6.1.2.2 Berechnung der Kapazität zweier koaxialer Elektroden.....	4
6.1.2.3 Kapazitäten von Einleiter-Kabeln.....	5
6.1.3 Kapazitäten von Anordnungen zylindrischer paralleler Leiter.....	6
6.1.3.1 Das elektrostatische Feld zweier linienhafter Leiter mit gleichgroßen Ladungen verschiedenen Vorzeichens.....	6
6.1.3.2 Berechnung der Kapazität paralleler zylindrischer Leiter.....	8
6.1.3.3 Berechnung der elektrischen Feldstärken.....	13
6.1.3.4. Kapazitäten und elektrische Feldstärken von Anordnungen unendlich langer paralleler zylindrischer Leiter.....	14
6.1.4 Kapazitäten von Mehrleiteranordnungen - Ersatzladungsverfahren.....	15
6.1.4.1 Spiegelung der Leiter an der Erdoberfläche.....	15
6.1.4.2 Berechnung der Kapazitäten der n-Leiter-Anordnung.....	17
6.1.4.3 Potentiale und Feldstärken im Feld der n-Leiter-Anordnung.....	20
6.1.4.4. Ersatzradius eines Bündelleiters.....	21
6.1.4.5 Teilkapazitäten eines Dreileiter-Gürtelkabels.....	22
6.1.4.6 Erweiterung des Ersatzladungsverfahrens.....	25
6.1.4.7 Anwendungen des Ersatzladungsverfahrens.....	27
<b>6.2 Induktivitäten von Leiteranordnungen</b> .....	35
6.2.1 Grundgleichungen zur Bestimmung von Induktivitäten.....	35
6.2.1.1 Energie im Magnetfeld induktiv gekoppelter Stromkreise.....	35
6.2.1.2 Berechnung der Energie aus den Größen des magnetischen Feldes.....	36
6.2.2 Magnetisches Feld einer Anordnung unendlich langer paralleler Leiter.....	38
6.2.2.1 Magnetisches Feld linienhafter Leiter.....	38
6.2.2.2 Vektorpotential im magnetischen Feld einer Leiteranordnung.....	40
6.2.2.3 Magnetische Energie und Induktivitäten.....	42
6.2.3 Mittlere geometrische Abstände.....	44

6.2.3.1	Definition des mittleren geometrischen Abstandes.....	44
6.2.3.2	Teilflächensatz.....	45
6.2.3.3	Berechnung des mittleren geometrischen Abstandes zwischen Trapezen.....	46
6.2.3.4	Berechnung der mgA für weitere Elemente.....	51
6.2.4	Induktivitätskoeffizienten kurzer Leiterstücke.....	53
6.2.4.1	Ausgangsgleichungen.....	53
6.2.4.2	Induktivität einer rechteckigen Schleife linienhafter Leiter.....	54
6.2.4.3	Vergleich mit der Induktivitätsberechnung für unendlich lange Leiter.....	56
6.2.5	Anwendungsbeispiele.....	56
6.2.5.1	Magnetfeld einer 380-kV-Drehstrom-Doppelleitung.....	56
6.2.5.2	Induktivitäten einer Drehstromfreileitung.....	60
6.2.5.3	Induktivitäten eines Niederspannungs-Stromschienensystems.....	63
<b>6.3</b>	<b>Ohmsche Widerstände.....</b>	<b>65</b>
6.3.1	Der ohmsche Widerstand als Integralparameter des stationären elektrischen Strömungsfeldes.....	65
6.3.1.1	Ausgangsgleichungen.....	65
6.3.1.2	Ohmscher Widerstand und Leitwert.....	66
6.3.1.3	Beziehungen zwischen den Integralparametern des elektrischen Feldes.....	67
6.3.2	Metallische Leiter.....	67
6.3.2.1	Ohmscher Widerstand metallischer Leiter.....	67
6.3.2.2	Erwärmung eines stromdurchflossenen gekühlten Leiters.....	69
6.3.2.3	Kurzschlußerwärmung metallischer Leiter.....	74
6.3.2.4	Beispiel für die Erwärmung von Leiterschienen.....	76
6.3.3	Stromleitung in das Erdreich.....	79
6.3.3.1	Bedeutung der Erdung.....	79
6.3.3.2	Wirkung von Körperströmen auf den Menschen.....	80
6.3.3.3	Die Erde als Stromleiter.....	84
6.3.3.4	Arten von Erdern.....	85
6.3.3.5	Kugelerder.....	86
6.3.3.6	Potentialverteilung, Schritt- und Berührungsspannungen an der Erdoberfläche.....	89
6.3.3.7	Staberder.....	92
6.3.3.8	Banderder.....	94
6.3.3.9	Ringerder.....	98
6.3.3.10	Kreisplattenerder.....	101
6.3.3.11	Zusammengesetzte Erder.....	103
6.3.3.12	Geschichtetes Erdreich.....	106

6.3.3.13 Messung des spezifischen Erdwiderstandes.....	109
6.3.4 Elektrische Kontakte.....	114
6.3.4.1 Einführung.....	114
6.3.4.2 Modelle eines Mikrokontaktes.....	114
6.3.4.3 Fremdschichten in der Berührungsfläche.....	116
6.3.4.4 Mehrpunktkontaktmodell.....	117
6.3.4.5 Erwärmung von Kontakten.....	118
6.3.4.6 Alterung von elektrischen Kontakten . . . ;.....	119
6.3.5 Ohmsche Querleitwerte.....	121
6.3.5.1 Leitwert des elektrischen Strömungsfeldes innerhalb eines Dielektrikums . . .	121
6.3.5.2 Polarisaton in Isolierstoffen.....	121
6.3.5.3 Verlustfaktor $\tan \delta$ .....	123
6.3.5.4 Koronaverluste bei Freileitungen.....	124
<b>6.4 Einfluß von Stromverdrängung und Magnetisierung auf Leiteranordnungen</b>	<b>128</b>
6.4.1 Integralgleichung des Stromverdrängungsproblems.....	128
6.4.1.1 Magnetische Flußdichte und Vektorpotential.....	128
6.4.1.2 Vollständige Integralgleichung des Stromverdrängungsproblems.....	131
6.4.1.3 Diskretisierung der Integralgleichung des Stromverdrängungsproblems.....	131
6.4.1.4 Mittlere harmonische Abstände.....	134
6.4.2 Spannungsgleichung der gesamten Leiteranordnung.....	135
6.4.2.1 Freie Ströme und Magnetisierungsströme in den Grenzflächen.....	135
6.4.2.2 Spannungsgleichung für die flächenhaften Teilleiter.....	135
6.4.2.3 Geometrische Symmetrien innerhalb der Leiteranordnung.....	136
6.4.2.4 Elektrischer symmetrischer Betrieb von Leiteranordnungen.....	139
6.4.2.5 Vollständiges Gleichungssystem.....	141
6.4.3 Stationäre Stromverdrängung bei kosinusförmigen Erregungen.....	144
6.4.3.1 Spannungsgleichungen.....	144
6.4.3.2 Verluste der Leiteranordnung im stationären Betrieb.....	145
6.4.3.3 Leiteranordnungen für Drehstrom im stationären Betrieb.....	146
6.4.4 Beispiel.....	147
<b>6.5 Stromleitung im Erdreich</b> .....	<b>153</b>
6.5.1 Vorüberlegungen.....	153
6.5.2 Zylindersymmetrisches Modell.....	154

6.5.2.1 Bestimmung der Stromdichte im Erdreich.....	154
6.5.2.2 Impedanz der Leiter-Erde-Schleife.....	158
6.5.3 Teilleiter - Modell.....	160
6.5.4 Induktive Beeinflussung zwischen zwei Leitern.....	161
6.5.4.1 Gegeninduktivität zwischen zwei Leiterschleifen.....	161
6.5.4.2 Gegenimpedanz zwischen zwei parallelen Leitern über der Erde.....	162
6.5.5 Induktive Beeinflussung von Signalleitungen durch Starkstromleitungen.....	164
<b>6.6 Kraftwirkungen in Leiteranordnungen.....</b>	<b>165</b>
6.6.1 Kraftwirkung zwischen zwei parallelen Leitern.....	165
6.6.1.1 Magnetisches Feld in der Umgebung eines kurzen Linienleiters.....	165
6.6.1.2 Kraftwirkung zwischen zwei kurzen stromdurchflossenen Leiterstücken auf parallelen Geraden.....	167
6.6.1.3 Einfluß endlicher Leiterquerschnitte auf die Kraftwirkung.....	168
6.6.2 Kräfte zwischen senkrecht aufeinanderstellenden Leitern.....	170
6.6.2.1 Kraftwirkung zwischen zwei kurzen stromdurchflossenen Leiterstücken auf orthogonalen Geraden.....	170
6.6.2.2 Kraft auf ein abgewinkeltes Stück einer Strombahn.....	172
6.6.2.3 Kraftwirkung auf eine Traverse in der Strombahn.....	172
6.6.3 Kräfte an ringförmigen Windungen.....	174
6.6.3.1 Kräfte in einer ringförmigen Windung.....	174
6.6.3.2 Kraftwirkung zwischen zwei coaxialen kreisförmigen Windungen.....	175
6.6.4 Kräfte in ebenen Leiteranordnungen unter Berücksichtigung von Stromverdrängung und Magnetisierung.....	175
6.6.4.1 Ausgangsgleichung.....	175
6.6.4.2 Bestimmung der Volumenkraft im ebenen Fall.....	176
6.6.4.3 Bestimmung der Flächenkraft im ebenen Fall.....	178
6.6.4.4 Leiter- und Hauptleiterkräfte.....	179
6.6.5 Anwendungsbeispiele.....	179
6.6.5.1 Kraftortskurven in ebenen Leiteranordnungen.....	179
6.6.5.2 Kurzschlußkräfte in einer Transformatorableitung.....	182
<b>6.7 Erwärmung elektrischer Betriebsmittel.....</b>	<b>186</b>
6.7.1 Wärmeleitung.....	187

6.7.1.1 Wärmeleitungsgleichung.....	187
6.7.1.2 Wärmeleitung durch eine Platte.....	189
6.7.1.3 Wärmeleitung durch ein zylindrisches Rohr.....	189
6.7.1.4 Wärmeleitung durch ein Rohr mit rechteckigem Querschnitt.....	190
6.7.1.5 Temperaturfeld in einer ebenen Wand mit inneren Wärmequellen.....	191
6.7.1.6 Temperaturfeld in einem Zylinder mit inneren Wärmequellen.....	193
6.7.1.7 Temperaturverlauf in einem zylindrischen Rohr mit inneren Wärmequellen..	193
6.7.1.8 Nichtstationäre Wärmeleitung.....	194
6.7.2 Wärmestrahlung.....	196
6.7.2.1 Strahlungsgesetz von Stefan-Boltzmann.....	196
6.7.2.2 Strahlungsaustausch zwischen zwei gegenüberstehenden Flächen.....	197
6.7.2.3 Analogie zum Ohmschen Gesetz.....	199
6.7.2.4 Erwärmung durch Sonneneinstrahlung.....	199
6.7.3 Wärmekonvektion.....	200
6.7.3.1 Wärmeübergangskoeffizient für die Konvektion.....	200
6.7.3.2 Ähnlichkeitstheorie des Wärmeüberganges.....	201
6.7.3.3 Wärmeübergangskoeffizient bei freier Konvektion.....	203
6.7.3.4 Wärmeübergangskoeffizient bei erzwungener Konvektion.....	204
6.7.3.5 Konvektion in durchströmten Rohren.....	205
6.7.3.6 Freie Konvektion in engen Kanälen und Spalten.....	205
6.7.4 Anwendung.....	206
6.7.4.1 Ungekapselte Leiteranordnung für Drehstrom.....	206
6.7.4.2 Gekapselte Leiteranordnung für Drehstrom.....	210

## 7 Leitungen

<b>7.1 Aufbau von Freileitungen.....</b>	<b>216</b>
7.1.1 Konstruktiver Aufbau.....	216
7.1.2 Aufbauelemente einer Freileitung.....	216
7.1.2.1 Leiterseile.....	216
7.1.2.2 Mäste.....	218
7.1.2.3 Isolatoren.....	219
7.1.3 Durchhang von Freileitungsseilen.....	222
7.1.3.1 Vereinfachtes Modell zur Durchhangsberechnung.....	222
7.1.3.2 Genauere Berechnung des Seildurchhanges.....	223

7.1.3.3 Zustandsgleichung eines Seiles.....	226
7.1.3.4 Charakteristische Arbeitspunkte der Zustandsgleichung.....	227
7.1.4 Geometrische Abmessungen von Freileitungsmasten.....	228
<b>7.2 Aufbau von Kabeln.....</b>	<b>232</b>
7.2.1 Aufbauelemente von Kabeln.....	232
7.2.1.1 Leiter von Kabeln.....	232
7.2.1.2 Leiterisolierung.....	233
7.2.1.3 Schutzmäntel.....	235
7.2.1.4 Korrosionsschutz.....	235
7.2.1.5 Bewehrung.....	236
7.2.1.6 Konzentrische Leiter.....	236
7.2.1.7 Elektrische Schirmung.....	236
7.2.2 Alterung von Isolierstoffen für Kabel.....	238
7.2.3 Bauarten von Kabeln.....	240
7.2.3.1 Grundbauarten.....	240
7.2.3.2 Kabelbauarten.....	242
7.2.3.3 Gasisolierte Rohrleiter.....	242
7.2.3.4 Supraleitende Kabel.....	243
7.2.4 Kabelgarnituren.....	244
7.2.4.1 Endverschlüsse und Muffen.....	244
7.2.4.2 Feldsteuerung.....	245
<b>7.3 Drehstrom-Einfachleitungen.....</b>	<b>247</b>
7.3.1 Kapazitäten und Induktivitäten einer Leitung ohne Erdseil.....	247
7.3.1.1 Potentialkoeffizienten.....	247
7.3.1.2 Induktivitäten.....	247
7.3.1.3 Verdrillung der Leitung.....	248
7.3.1.4 Symmetrische Komponenten der Potentialkoeffizienten und Kapazitäten.....	250
7.3.1.5 Symmetrische Komponenten der Induktivitäten.....	251
7.3.2 Ohmsche Längswiderstände und Querleitwerte.....	252
7.3.3 Kapazitäten und Längsimpedanzen einer Leitung mit Erdseil.....	253
7.3.3.1 Einfluß des Erdseiles auf die Kapazitäten.....	254
7.3.3.2 Einfluß des Erdseiles auf die Nulllängsimpedanz.....	255
7.3.4 Homogene Drehstrom-Einfachleitung.....	258

7.3.4.1 Gleichungen der homogenen Leitung.....	258
7.3.4.2 Allgemeine Lösung der Leitungsgleichungen der verlustlosen Leitung.....	259
7.3.4.3 Laufzeitmodell der verzerrungsfreien Leitung.....	261
7.3.4.4 Wanderwellenschwingungen auf Leitungen.....	264
7.3.4.5 Lösung der Leitungsgleichungen im Frequenzbereich.....	265
7.3.4.6 Charakteristische Betriebszustände einer homogenen Leitung.....	267
7.3.4.7 Parameter der Leitungsgleichungen bei Wechselstrom.....	268
7.3.4.8 Normalbetrieb der Drehstromleitung.....	269
7.3.4.9 Leistungsübertragung über Drehstrom-Leitungen.....	271
7.3.4.10 Kompensation von Drehstrom-Leitungen.....	273
7.3.5 Kurze Leitungen.....	276
7.3.5.1 Ersatzschaltungen.....	276
7.3.5.2 Ladestrom von Leitungen.....	277
7.3.5.3 Erdschlußstrom von Leitungen.....	278
7.3.5.4 Ladestrom bei Erdschluß.....	279
<b>7.4 Drehstrom-Doppelleitungen.....</b>	<b>281</b>
7.4.1 Verdrillung von Doppelleitungen.....	281
7.4.1.1 $\gamma$ -Verdrillung.....	281
7.4.1.2 $\beta$ -Verdrillung.....	282
7.4.2 Potentialkoeffizienten und Kapazitäten.....	283
7.4.2.1 Potentialkoeffizienten einer Leitung ohne Erdseile.....	283
7.4.2.2 Erdkapazitäten.....	284
7.4.2.3 Betriebskapazitäten.....	285
7.4.3 Induktivitäten.....	285
7.4.3.1 Induktivitätsmatrizen der Doppelleitung ohne Erdseile.....	285
7.4.3.2 Induktivitäten bei Parallelschaltung beider Systeme.....	287
7.4.3.3 Längsimpedanzen der verkürzten Doppelleitung.....	287
7.4.4 Berücksichtigung der Erdseile.....	288
7.4.5 Parameter einer symmetrischen Drehstrom-Doppelleitung.....	289
7.4.5.1 Daten der Leitung.....	289
7.4.5.2 Abschätzung des Durchhanges und des mittleren Mastabstandes.....	290
7.4.5.3 Ohmsche Längswiderstände und Querleitwerte.....	290
7.4.5.4 Dauerstrombelastbarkeit der Leiterseile.....	291
7.4.5.5 Geometrische Mittelwerte.....	292
7.4.5.6 Kapazitäten und Längsimpedanzen.....	292

7.4.5.7 Leitungsparameter im Betrieb mit parallelgeschalteten Systemen.....	293
7.4.5.8 Kompensation der Leitung.....	294
<b>7.5 Blitzschutz von Freileitungen.....</b>	<b>297</b>
7.5.1. Schutzwinkel- und Schutzraumtheorie.....	297
7.5.2 Stromverteilung bei Blitzeinschlag in die Freileitung.....	299
<b>7.6 Drehstrom-Kabelverbindungen.....</b>	<b>300</b>
7.6.1 Elektrische Parameter.....	300
7.6.1.1 Kapazitäten.....	300
7.6.1.2 Induktivitäten.....	300
7.6.1.3 Längsimpedanzen einer Drehstrom-Verbindung aus Einleiterkabeln.....	301
7.6.1.4 Wellenwiderstand und natürliche Leistung im Normalbetrieb.....	305
7.6.2 Erwärmung von Kabeln.....	305
7.6.2.1 Wärmenetze für Kabel.....	305
7.6.2.2 Besonderheiten für die Wärmewiderstände von Kabeln.....	307
7.6.2.3 Wärmeleitung im Erdreich.....	309
7.6.2.4 Bestimmung der Strombelastbarkeit von Kabeln mit Reduktionsfaktoren ...	312
7.6.3 400-kV-Drehstrom-Kabelverbindung.....	314
7.6.3.1 Daten einer 400-kV-Ölkabelverbindung.....	314
7.6.3.2 Elektrische Parameter.....	315
7.6.3.3 Erwärmung und Dauerstrombelastbarkeit der Kabel.....	316
7.6.3.4 Vergleich mit einer 400-kV-Freileitung.....	317
7.6.3.5 Vergleich mit einer Drehstromverbindung aus gasisolierten Rohrleitern.....	318

## 8 Drosselspulen und Transformatoren

<b>8.1 Aufbau.....</b>	<b>323</b>
8.1.1 Magnetischer Kreis.....	323
8.1.2. Wicklungen.....	326
8.1.3 Außenhülle und Kühlung.....	328
<b>8.2 Luftdrosselspulen.....</b>	<b>330</b>
8.2.1 Gegeninduktivität zwischen zwei koaxialen Windungen.....	330

8.2.1.1	Linienhafte Windungen.....	330
8.2.1.2	Windungen mit endlichen Querschnittsabmessungen.....	332
8.2.2	Induktivität von Spulen mit kreisförmigen Windungen.....	332
8.2.2.1	Summationsformel.....	332
8.2.2.2	Vereinfachung der Berechnung.....	333
8.2.2.3	Einfache Näherungsformeln.....	334
8.2.2.4	Spule mit minimalem Materialaufwand.....	336
8.2.3	Drosselspule für einen Saugkreis.....	337
8.2.3.1	Parameter der Drossel.....	337
8.2.3.2	Drosselspule mit quadratischem Wicklungsquerschnitt.....	338
8.2.3.3	Optimale Zylinderspule.....	340
<b>8.3</b>	<b>Magnetische Eisenkreise.....</b>	<b>342</b>
8.3.1	Beschreibung eines einfachen magnetischen Kreises.....	342
8.3.1.1	Durchflutungsgesetz.....	342
8.3.1.2	Aufbau eines einfachen magnetischen Kreises.....	343
8.3.1.3	Magnetischer Kreis unter Vernachlässigung der Streuung.....	345
8.3.2	Magnetkreis von Einphasentransformatoren.....	347
8.3.2.1	Magnetische Ersatzschaltung.....	347
8.3.2.2	Streuung bei Einphasentransformatoren.....	348
<b>8.4</b>	<b>Einphasentransformatoren.....</b>	<b>351</b>
8.4.1	Elektrische Ersatzschaltungen.....	351
8.4.1.1	Vorzeichenvereinbarungen.....	351
8.4.1.2	Beschreibungsebenen für Einphasentransformatoren.....	353
8.4.1.3	Idealer Transformator.....	353
8.4.1.4	Stromidealer Transformator.....	355
8.4.1.5	Spannungsidealer Transformator.....	356
8.4.1.6	Linearer Transformator.....	357
8.4.2	Parameter der Transformator-Ersatzschaltungen.....	358
8.4.2.1	Kenngößen von Transformatoren.....	358
8.4.2.2	Kurzschlußimpedanz.....	359
8.4.2.3	Leerlaufimpedanz.....	360
8.4.3	Spartransformatoren.....	361
8.4.4	Dreiwicklungs-Transformatoren.....	363

<b>8.5 Drehstrom-Transformatoren</b> .....	364
8.5.1 Magnetischer Kreis.....	365
8.5.1.1 Symmetrischer magnetischer Kreis.....	365
8.5.1.2 Magnetischer Kreis mit den Schenkeln in einer Ebene.....	366
8.5.2 Elektrische Ersatzschaltungen.....	368
8.5.2.1 Unverschaltete Wicklungen.....	368
8.5.2.2 Verschaltung der Wicklungen eines Drehstromtransformators.....	370
8.5.2.3 Idealer Raumzeiger-Transformator.....	373
8.5.2.4 Schaltgruppen von Drehstrom-Transformatoren.....	374
8.5.2.5 Linearer Raumzeigertransformator.....	375
8.5.2.6 Nullgrößen-Transformator.....	376
8.5.2.7 Drehstrom-Transformator in Symmetrischen Komponenten.....	380
8.5.2.8 Parameter von Drehstrom-Transformatoren.....	381
8.5.3 Unsymmetrische Belastung von Transformatoren.....	382
8.5.3.1 Parameter eines Niederspannungs-Transformators.....	382
8.5.3.2 Symmetrische Belastung.....	383
8.5.3.3 Zweiphasige Belastung.....	383
8.5.3.4 Einphasige Belastung.....	385
8.5.4 Magnetisierungserscheinungen in Transformatoren.....	388
8.5.4.1 Emphasen-Transformatoren.....	388
8.5.4.2 Drehstrom-Transformatoren mit freier Magnetisierung.....	389
8.5.4.3 Drehstrom-Transformatoren mit erzwungener Magnetisierung.....	392
8.5.4.4 Einschaltstrom von Transformatoren.....	393
<b>8.6 Einfluß der Wicklungskapazitäten</b> .....	397
8.6.1 Wicklungskapazitäten von Drosselspulen.....	397
8.6.1.1 Die Wicklung als Kettenleiter.....	397
8.6.1.2 Beschreibung einer Wicklung als homogene Leitung.....	398
8.6.2 Spannungsverteilung über einer Wicklung.....	400
8.6.2.1 Wicklungsgleichungen für Stoßwellen.....	400
8.6.2.2 Anfangsverteilung der Spannung über der Wicklung.....	400
8.6.2.3 Übergang zur Endverteilung der Stoßwelle.....	402
8.6.2.4 Konstruktive Maßnahmen zur Vergrößerung der Windungskapazität.....	404
8.6.2.5 Konstruktive Maßnahmen zur Verkleinerung der Erdkapazität.....	405

8.6.3 Kapazitäten von vollständigen Transformatorwicklungen.....	405
8.6.3.1 Transformatorersatzschaltung mit Wicklungskapazitäten.....	405
8.6.3.2 Vereinfachte Ersatzschaltungen.....	406
8.6.3.3 Drehstromtransformatoren.....	408
<b>8.7 Parallelbetrieb von Transformatoren.....</b>	<b>409</b>
8.7.1 Parallelschaltung von Transformatoren.....	409
8.7.1.1 Direkte Parallelschaltung.....	409
8.7.1.2 Parallelschaltung von Transformatoren mit unterschiedlichen Übersetzungs- verhältnissen.....	410
8.7.2 Steuerung des Lastflusses mit Transformatoren.....	412
8.7.2.1 Grundprinzip.....	412
8.7.2.2 Regeltransformatoren.....	413
8.7.2.3 Längsregelung.....	415
8.7.2.4 Querregelung.....	416
8.7.2.5 Schrägregelung.....	417
8.7.2.6 Unabhängige Steuerung von Wirk- und Blindleistungsfluß.....	418
8.7.3 Ersatzschaltung einer Regeltransformatorbank.....	419
8.7.3.1 Übersichtsschaltung und technische Daten.....	419
8.7.3.2 Ersatzschaltungen im Mit- und Gegensystem.....	421
8.7.3.3 Steuerung des Lastflusses mit dem Regeltransformator.....	423
8.7.3.4 Leistungsflußsteuerung mit Hilfe von Umrichtern im Zwischenkreis.....	425
8.7.3.5 Ersatzschaltung im Nullsystem.....	428
<b>Anhang.....</b>	<b>430</b>
<b>Literaturverzeichnis.....</b>	<b>452</b>
<b>Sachwortverzeichnis.....</b>	<b>461</b>