

Inhalt

Vorwort zur 3., erweiterten und aktualisierten Auflage.....	5
1 Einleitender Überblick	25
1.1 Energietransport vom Kraftwerk zum Verbraucher	25
1.2 Motoren und Antriebe.....	27
1.3 Inhalte des Buchs	27
1.3.1 Grundlagen der Elektrotechnik.....	27
1.3.2 Elektrische Maschinen.....	28
1.3.3 Leistungselektronik	28
1.3.4 Elektrische Antriebe.....	29
2 Grundbegriffe der Elektrotechnik	31
2.1 Elektrische Ladung	31
2.1.1 Ladungserhaltungssatz	32
2.1.2 Elementarladung.....	32
2.1.3 Coulomb'sches Gesetz	32
2.1.4 Elektrische Leiter und Nichtleiter.....	33
2.2 Quellen.....	34
2.3 Elektrisches Potential.....	35
2.4 Elektrische Spannung	36
2.4.1 Definition	36
2.4.2 Bezeichnungen	36
2.4.2.1 Spannungsgefälle	36
2.4.2.2 Spannungsfall	36
2.4.3 Spannungsbezugspfeile.....	37
2.5 Elektrischer Strom	38
2.5.1 Elektrische Stromstärke.....	39
2.5.2 Elektrische Stromdichte	39
2.5.3 Stromrichtung	40
2.5.4 Strombezugspfeile	40
2.6 Elektrischer Widerstand (im Gleichstromkreis)	42
2.6.1 Definition	42
2.6.2 Ohmscher Widerstand und ohmsches Gesetz.....	42
2.6.3 Widerstandsberechnung aus Materialgrößen.....	43
2.6.4 Temperaturabhängigkeit.....	43
2.6.5 Reihen- und Parallelschaltung von Widerständen	44

2.7	Elektrischer Grundstromkreis	45
2.8	Elektrische Leistung (im Gleichstromkreis)	45
2.9	(Leistungs-)Wirkungsgrad	46
2.10	Elektrische Energie (im Gleichstromkreis)	47
2.11	Erzeuger- und Verbraucherpfailsystem	47
2.11.1	Erzeugerpfailsystem	48
2.11.2	Verbraucherpfailsystem	48
2.11.3	Festlegung des Bezugspfailsystems	48
2.12	Übungsaufgaben	49
2.12.1	Aufgabenstellungen	49
2.12.1.1	Übungsaufgabe 2.1	49
2.12.1.2	Übungsaufgabe 2.2	49
2.12.1.3	Übungsaufgabe 2.3	49
2.12.1.4	Übungsaufgabe 2.4	50
2.12.2	Ergebnisse	50
2.12.2.1	Ergebnisse zur Übungsaufgabe 2.1	50
2.12.2.2	Ergebnisse zur Übungsaufgabe 2.2	50
2.12.2.3	Ergebnisse zur Übungsaufgabe 2.3	50
2.12.2.4	Ergebnisse zur Übungsaufgabe 2.4	51
2.12.3	Musterlösungen	51
2.12.3.1	Musterlösung zur Übungsaufgabe 2.1	51
2.12.3.2	Musterlösung zur Übungsaufgabe 2.2	52
2.12.3.3	Musterlösung zur Übungsaufgabe 2.3	52
2.12.3.4	Musterlösung zur Übungsaufgabe 2.4	54
3	Gleichstromnetze	55
3.1	Begriffsdefinitionen	55
3.1.1	Netz und Stromsystem	55
3.1.2	Gleichstromsystem	56
3.1.3	Lineares Gleichstromnetz	56
3.1.3.1	Kennlinien linearer Quellen und Verbraucher	56
3.1.3.2	Linearität	56
3.1.3.3	Beispiel für ein lineares Gleichstromnetz	58
3.2	Elektrische Quellen für Gleichstromnetze	59
3.2.1	Spannungs- und Stromquellen	59
3.2.2	Beispiel für die Modellierung einer realen Quelle	60
3.2.3	Ideale Gleichspannungsquelle	60
3.2.4	Ideale Gleichstromquelle	61
3.2.5	Lineare Gleichspannungsquelle	62
3.2.6	Lineare Gleichstromquelle	65
3.2.7	Hinweise zur Modellierung realer Quellen	67
3.2.7.1	Modellierung als lineare Gleichspannungsquelle	67

3.2.7.2	Modellierung als lineare Gleichstromquelle	69
3.2.8	Umwandlung linearer Quellen	70
3.2.8.1	Umwandlung einer linearen Gleichspannungsquelle	70
3.2.8.2	Umwandlung einer linearen Gleichstromquelle	70
3.2.8.3	Berechnungsbeispiel für äquivalente lineare Quellen	71
3.2.9	Leistungsanpassung bei linearen Quellen	71
3.2.9.1	Leistungsanpassung bei der linearen Gleichspannungsquelle	71
3.2.9.2	Leistungsanpassung bei der linearen Gleichstromquelle	73
3.3	Topologie von Gleichstromnetzen	74
3.3.1	Knoten und Zweige	75
3.3.2	Maschen und Bäume	76
3.3.3	Topologische Varianten	77
3.3.3.1	Netze mit einer Quelle und einem Verbraucher	78
3.3.3.2	Netze mit einer Quelle und Verbrauchern in Reihenschaltung	78
3.3.3.3	Netze mit einer Quelle und Verbrauchern in Parallelschaltung	79
3.3.3.4	Netze mit vielen Quellen und Zweigen	79
3.4	Berechnung von Gleichstromnetzen	80
3.5	Fundamentale Berechnungsmethoden	81
3.5.1	Ohmsches Gesetz	81
3.5.2	Kirchhoff'sche Regeln	81
3.5.2.1	Knotenregel	81
3.5.2.2	Maschenregel	82
3.5.3	Spannungs- und Stromteilerregel	83
3.5.3.1	Spannungsteilerregel	83
3.5.3.2	Stromteilerregel	85
3.5.4	Berechnung von Ersatzwiderständen/-leitwerten	87
3.5.4.1	Reihenschaltung aus ohmschen Widerständen oder Leitwerten	88
3.5.4.2	Parallelschaltung aus ohmschen Widerständen oder Leitwerten	89
3.5.4.3	Sterne und Dreiecke aus ohmschen Widerständen	91
3.5.4.4	Sterne und Dreiecke aus ohmschen Leitwerten	92
3.5.4.5	Beispiel für die Berechnung eines Ersatzwiderstands	93
3.5.4.6	Widerstandsberechnung bei Punkten gleichen Potentials	94
3.6	Berechnung von Netzen mit einfacher Topologie	96
3.6.1	Arbeitspunkt im Grundstromkreis	96
3.6.2	Zweipoltheorie	97
3.6.2.1	Quellenersatzschaltungen	97
3.6.2.2	Berechnung eines Stroms mit der Zweipoltheorie	99
3.6.3	Überlagerungssatz	103
3.7	Berechnung von umfangreicheren Netzen	106
3.7.1	Zweigstromanalyse	106
3.7.2	Maschenstromanalyse	111
3.7.3	Knotenpotentialverfahren	116

3.8	Übungsaufgaben.....	120
3.8.1	Aufgabenstellungen.....	120
3.8.1.1	Übungsaufgabe 3.1.....	120
3.8.1.2	Übungsaufgabe 3.2.....	120
3.8.1.3	Übungsaufgabe 3.3.....	120
3.8.1.4	Übungsaufgabe 3.4.....	121
3.8.1.5	Übungsaufgabe 3.5.....	122
3.8.1.6	Übungsaufgabe 3.6.....	122
3.8.2	Ergebnisse.....	123
3.8.2.1	Ergebnisse zur Übungsaufgabe 3.1.....	123
3.8.2.2	Ergebnisse zur Übungsaufgabe 3.2.....	123
3.8.2.3	Ergebnisse zur Übungsaufgabe 3.3.....	124
3.8.2.4	Ergebnisse zur Übungsaufgabe 3.4.....	124
3.8.2.5	Ergebnisse zur Übungsaufgabe 3.5.....	125
3.8.2.6	Ergebnisse zur Übungsaufgabe 3.6.....	125
3.8.3	Musterlösungen.....	125
3.8.3.1	Musterlösung zur Übungsaufgabe 3.1.....	125
3.8.3.2	Musterlösung zur Übungsaufgabe 3.2.....	126
3.8.3.3	Musterlösung zur Übungsaufgabe 3.3.....	126
3.8.3.4	Musterlösung zur Übungsaufgabe 3.4.....	127
3.8.3.5	Musterlösung zur Übungsaufgabe 3.5.....	128
3.8.3.6	Musterlösung zur Übungsaufgabe 3.6.....	129
4	Elektrische und magnetische Felder.....	133
4.1	Grundlagen der Feldtheorie.....	133
4.1.1	Experimentelle Erfahrungen.....	133
4.1.2	Der (physikalische) Feldbegriff.....	135
4.1.3	Lokale und globale Feldgrößen.....	136
4.1.3.1	Lokale Feldgrößen.....	136
4.1.3.2	Globale Feldgrößen.....	137
4.1.3.3	Feldgrößen des elektrischen Strömungsfelds.....	138
4.1.3.4	Feldgrößen des elektrostatischen Felds.....	141
4.1.3.5	Feldgrößen des magnetischen Felds.....	144
4.1.4	Ferromagnetische Materialien.....	147
4.1.5	Lorentzkraft auf bewegte Ladungen im Magnetfeld.....	149
4.1.6	Zugspannungen.....	150
4.1.7	Feldlinien.....	151
4.1.7.1	Definition.....	151
4.1.7.2	Magnetische Feldlinien an Grenzflächen.....	152
4.1.7.3	Feldlinienverlauf bei homogenen Feldern.....	153
4.2	Maxwell'sche Gleichungen.....	154
4.2.1	Überblick.....	154

4.2.1.1	Gleichungen in Integralform	154
4.2.1.2	Gleichungen in Differentialform	155
4.2.1.3	Wahl des Koordinatensystems	155
4.2.2	Feldgleichungen	156
4.2.2.1	Durchflutungsgesetz	156
4.2.2.2	Induktionsgesetz	162
4.2.3	Die Kontinuitätsgleichungen	169
4.2.3.1	Quelleneigenschaft des elektrostatischen Felds	169
4.2.3.2	Wirbeleigenschaft des magnetischen Felds	171
4.2.4	Materialgleichungen	171
4.3	Anwendungsbeispiel: Kondensator	172
4.3.1	Begriffsdefinitionen	172
4.3.1.1	Kondensator	172
4.3.1.2	Kapazität	173
4.3.1.3	Fundamentale i - u -Beziehung	173
4.3.2	Parallel- und Reihenschaltung von Kapazitäten	174
4.3.2.1	Parallelschaltung	174
4.3.2.2	Reihenschaltung	175
4.3.3	Der Kondensator als Energiespeicher	176
4.3.3.1	Laden des Kondensators	176
4.3.3.2	Gespeicherte Energie des Kondensators	177
4.3.3.3	Entladen des Kondensators	178
4.4	Anwendungsbeispiel: Spule	180
4.4.1	Begriffsdefinitionen	180
4.4.1.1	Spule	180
4.4.1.2	Selbstinduktion	181
4.4.1.3	Induktivität	181
4.4.1.4	Fundamentale u - i -Beziehung	183
4.4.2	Reihen- und Parallelschaltung von Spulen	184
4.4.2.1	Reihenschaltung	184
4.4.2.2	Parallelschaltung	185
4.4.3	Spule als Energiespeicher	185
4.4.3.1	Bestromen der Spule	185
4.4.3.2	Gespeicherte Energie der Spule	187
4.4.3.3	Entstromen der Spule	188
4.5	Anwendungsbeispiel: Transformator	190
4.5.1	Magnetisch gekoppelte Spulen	190
4.5.2	Gegeninduktion	190
4.5.3	Gegeninduktivität	191
4.5.4	Transformatorprinzip	191
4.6	Übungsaufgaben	193
4.6.1	Aufgabenstellungen	193

4.6.1.1	Übungsaufgabe 4.1.....	193
4.6.1.2	Übungsaufgabe 4.2.....	194
4.6.1.3	Übungsaufgabe 4.3.....	195
4.6.1.4	Übungsaufgabe 4.4.....	196
4.6.1.5	Übungsaufgabe 4.5.....	196
4.6.2	Ergebnisse.....	197
4.6.2.1	Ergebnisse zur Übungsaufgabe 4.1	197
4.6.2.2	Ergebnisse zur Übungsaufgabe 4.2	197
4.6.2.3	Ergebnisse zur Übungsaufgabe 4.3	197
4.6.2.4	Ergebnisse zur Übungsaufgabe 4.4	197
4.6.2.5	Ergebnisse zur Übungsaufgabe 4.5	198
4.6.3	Musterlösungen.....	198
4.6.3.1	Musterlösung zur Übungsaufgabe 4.1	198
4.6.3.2	Musterlösung zur Übungsaufgabe 4.2	199
4.6.3.3	Musterlösung zur Übungsaufgabe 4.3	200
4.6.3.4	Musterlösung zur Übungsaufgabe 4.4	201
4.6.3.5	Musterlösung zur Übungsaufgabe 4.5	202
5	Wechselstromnetze	205
5.1	Begriffe	205
5.1.1	Wechselgröße.....	205
5.1.2	Wechselstromsystem	205
5.1.3	Einphasen-Stromsystem.....	205
5.1.4	Lineares Wechselstromnetz	206
5.1.5	Elemente von Wechselstromnetzen.....	206
5.1.6	Momentanleistung	207
5.2	Sinusförmige Spannungen und Ströme.....	207
5.2.1	Zeitlicher Verlauf und Eigenschaften	207
5.2.2	Mathematische Beschreibung	209
5.2.2.1	Kreisfrequenz	209
5.2.2.2	Nullphasenwinkel	210
5.2.2.3	Amplitude.....	211
5.2.3	Grafische Darstellung von Sinusgrößen im Zeitbereich	211
5.2.3.1	Darstellung von Sinusgrößen als Funktion des Winkels.....	211
5.2.3.2	Darstellung von Sinusgrößen als Funktion der Zeit.....	212
5.2.3.3	Festlegung des Zeitnullpunkts	213
5.2.3.4	Phasenverschiebungswinkel zwischen Spannung und Strom	213
5.2.4	Integrale Kennwerte sinusförmiger Größen	214
5.2.4.1	Arithmetischer Mittelwert	214
5.2.4.2	Effektivwert	216
5.2.5	Darstellung von Sinusgrößen durch komplexe Zeiger.....	218
5.2.5.1	Exponentialform.....	219

5.2.5.2	Algebraische Form	220
5.2.5.3	Komplexe Drehzeiger.....	221
5.2.5.4	Reelle Zeitfunktionen	222
5.2.5.5	Rechnen mit sinusförmigen Wechselgrößen.....	223
5.2.5.6	Effektivwertzeigerdiagramm	226
5.2.5.7	Bestimmung des Phasenwinkels in Effektivwertzeigerdiagrammen	226
5.3	Komponenten linearer Wechselstromnetze	228
5.3.1	Ideale Wechselspannungsquelle	228
5.3.2	Lineare Wechselspannungsquelle.....	229
5.3.3	Komplexe Widerstände und Leitwerte	230
5.3.4	Komplexe Größen beim ohmschen Widerstand/Leitwert	231
5.3.5	Komplexe Größen bei der Spule.....	233
5.3.6	Komplexe Größen beim Kondensator	236
5.4	Widerstands- und Leitwertersatzschaltungen.....	239
5.4.1	Reihenschaltung komplexer Widerstände	239
5.4.2	Reihenschaltung komplexer Leitwerte	241
5.4.3	Parallelschaltung komplexer Leitwerte.....	242
5.4.4	Parallelschaltung komplexer Widerstände.....	244
5.4.5	Sterne und Dreiecke.....	245
5.4.5.1	Sterne und Dreiecke aus komplexen Widerständen	246
5.4.5.2	Sterne und Dreiecke aus komplexen Leitwerten	248
5.4.5.3	Berechnungsbeispiel.....	249
5.4.6	Modellierung von Wechselstromverbrauchern.....	251
5.5	Berechnung von Wechselstromnetzen	252
5.5.1	Ohmsches Gesetz in komplexer Form.....	253
5.5.2	Kirchhoff'sche Regeln in komplexer Form	253
5.5.3	Komplexe Spannungsteilerregel.....	255
5.5.4	Komplexe Stromteilerregel.....	258
5.5.5	Weitere Berechnungsmethoden.....	262
5.5.5.1	Maschenstromverfahren	263
5.5.5.2	Knotenpotentialverfahren.....	264
5.6	Leistung im Wechselstromnetz	266
5.6.1	Momentanleistungen.....	267
5.6.1.1	Momentane Leistung.....	267
5.6.1.2	Momentane Wirk- und Blindleistung.....	269
5.6.1.3	Momentanleistungen bei R , L und C	271
5.6.1.4	Fazit	278
5.6.2	Mittlere Leistungen.....	278
5.6.3	Wirk-, Blind- und Scheinleistung, Leistungsfaktor	279
5.6.3.1	Wirkleistung.....	279
5.6.3.2	Blindleistung	280
5.6.3.3	Scheinleistung	281

5.6.3.4	Verschiebungsfaktor und Leistungsfaktor	281
5.6.3.5	Umrechnungen	282
5.6.4	Komplexe Leistung	282
5.6.5	Blindleistungskompensation (klassisch)	285
5.6.5.1	Problemstellung	285
5.6.5.2	Verringerung von Blindleistung und Blindstrom des Netzes	285
5.6.5.3	Dimensionierung des Kondensators	289
5.7	Ortskurven	291
5.7.1	Begriffsdefinition und Typen von Ortskurven	292
5.7.2	Ortskurven vom Typ Halbgerade	293
5.7.3	Ortskurven vom Typ Halbkreis durch den Nullpunkt	296
5.7.4	Ortskurven vom Typ Halbkreis in allgemeiner Lage	298
5.8	Übungsaufgaben	301
5.8.1	Aufgabenstellungen	301
5.8.1.1	Übungsaufgabe 5.1	301
5.8.1.2	Übungsaufgabe 5.2	301
5.8.1.3	Übungsaufgabe 5.3	302
5.8.1.4	Übungsaufgabe 5.4	302
5.8.2	Ergebnisse	303
5.8.2.1	Ergebnisse zur Übungsaufgabe 5.1	303
5.8.2.2	Ergebnisse zur Übungsaufgabe 5.2	304
5.8.2.3	Ergebnisse zur Übungsaufgabe 5.3	304
5.8.2.4	Ergebnisse zur Übungsaufgabe 5.4	304
5.8.3	Musterlösungen	305
5.8.3.1	Musterlösung zur Übungsaufgabe 5.1	305
5.8.3.2	Musterlösung zur Übungsaufgabe 5.2	305
5.8.3.3	Musterlösung zur Übungsaufgabe 5.3	306
5.8.3.4	Musterlösung zur Übungsaufgabe 5.4	308
6	Drehstromnetze	311
6.1	Vorteile von Drehstromsystemen	311
6.2	Drehstromgeneratoren	311
6.2.1	Prinzip der Drehstromerzeugung	311
6.2.2	Symmetrisches dreiphasiges Spannungssystem	313
6.2.3	Verkettung	315
6.2.3.1	Sternschaltung des Generators (4-Leiter-Netz)	315
6.2.3.2	Dreieckschaltung des Generators (3-Leiter-Netz)	319
6.3	Drehstromverbraucher	319
6.3.1	Symmetrische und unsymmetrische Belastung/Last	319
6.3.1.1	Symmetrische Belastung	320
6.3.1.2	Symmetrische Last	320
6.3.1.3	Unsymmetrische Belastung	321

6.3.1.4	Unsymmetrische Last.....	321
6.3.2	Drehstromverbraucher am 4-Leiter- und 3-Leiter-Netz.....	321
6.4	Berechnung von Drehstromnetzen	323
6.4.1	Drehstromverbraucher am 4-Leiter-Netz.....	323
6.4.1.1	Sternschaltung.....	323
6.4.1.2	Dreieckschaltung.....	327
6.4.2	Drehstromverbraucher am 3-Leiter-Netz.....	333
6.4.2.1	Sternschaltung.....	333
6.4.2.2	Dreieckschaltung.....	337
6.5	Leistung im Drehstromnetz	337
6.5.1	Ausgangslage für die Leistungsberechnung.....	337
6.5.2	Momentanleistung	338
6.5.3	Komplexe Leistung, Wirk-, Blind- und Scheinleistung.....	339
6.5.4	Kollektive Leistung.....	344
6.6	Blindleistungskompensation (klassisch) bei symmetrischen Drehstromverbrauchern	344
6.6.1	Problemstellung	344
6.6.2	Sternschaltung der Kondensatoren	345
6.6.3	Dreieckschaltung der Kondensatoren	346
6.7	Übungsaufgaben.....	347
6.7.1	Aufgabenstellungen.....	347
6.7.1.1	Übungsaufgabe 6.1.....	347
6.7.1.2	Übungsaufgabe 6.2.....	347
6.7.1.3	Übungsaufgabe 6.3.....	348
6.7.1.4	Übungsaufgabe 6.4.....	349
6.7.2	Ergebnisse.....	349
6.7.2.1	Ergebnisse zur Übungsaufgabe 6.1	349
6.7.2.2	Ergebnisse zur Übungsaufgabe 6.2	350
6.7.2.3	Ergebnisse zur Übungsaufgabe 6.3	350
6.7.2.4	Ergebnisse zur Übungsaufgabe 6.4	350
6.7.3	Musterlösungen.....	350
6.7.3.1	Musterlösung zur Übungsaufgabe 6.1	350
6.7.3.2	Musterlösung zur Übungsaufgabe 6.2	351
6.7.3.3	Musterlösung zur Übungsaufgabe 6.3	353
6.7.3.4	Musterlösung zur Übungsaufgabe 6.4	356
7	Überblick über elektrische Maschinen	361
7.1	Unterscheidungsmerkmale für elektrische Maschinen.....	361
7.2	Haupttypen elektrischer Maschinen	361
7.2.1	Transformator	361
7.2.2	Rotierende elektrische Maschinen und Linearmaschinen.....	363
7.2.2.1	Drehfeldmaschine.....	363

7.2.2.2	Einphasen-Wechselstrommaschine	364
7.2.2.3	Gleichstrommaschine.....	365
7.2.2.4	Schrittmotor	365
7.3	Spezielle Typen rotierender elektrischer Maschinen.....	366
7.3.1	Servomotor.....	366
7.3.2	Elektronisch kommutierter Motor	366
7.3.3	Reluktanzmaschine.....	367
7.3.4	Direktantrieb	367
8	Transformator.....	369
8.1	Begriffsdefinition	369
8.2	Einsatzbeispiele.....	369
8.2.1	Leistungstransformatoren.....	369
8.2.2	Kleintransformatoren.....	371
8.3	Mechanischer Aufbau	371
8.3.1	Eisenkern.....	372
8.3.2	Wicklungen	374
8.4	Funktionsprinzip des Einphasentransformators.....	376
8.5	Bezugspfeile beim Einphasentransformator	378
8.5.1	Wicklungssinn.....	378
8.5.2	Magnetische Kopplung und Strombezugspfeile.....	379
8.5.3	Klemmenspannungen	380
8.5.4	Schema für die Festlegung der Bezugspfeile	381
8.6	Der ideale Einphasentransformator.....	383
8.6.1	Bezugspfeile und Wicklungssinn	384
8.6.2	Ideale Spannungstransformation	384
8.6.3	Ideale Stromtransformation.....	386
8.6.4	Ideale Widerstandstransformation.....	387
8.7	Der reale Einphasentransformator.....	388
8.7.1	Vollständiges Ersatzschaltbild.....	389
8.7.1.1	Kupferverluste	389
8.7.1.2	Unvollständige magnetische Kopplung	390
8.7.1.3	Eisenverluste	392
8.7.2	Leerlauf- und Kurzschlussversuch.....	393
8.7.2.1	Leerlaufversuch.....	393
8.7.2.2	Kurzschlussversuch	396
8.7.2.3	Berechnungsbeispiel.....	400
8.7.3	Nennbetrieb (Kapp'sches Dreieck)	402
8.8	Drehstromtransformator.....	403
8.8.1	Aufbau eines Drehstrom-Kerntransformators.....	403
8.8.2	Wicklungen und Schaltungen.....	404
8.8.3	Schaltgruppen	405

8.8.3.1	Kennbuchstaben	405
8.8.3.2	Kennzahl	405
8.8.4	Elektrisches Ersatzschaltbild bei symmetrischer Last.....	407
8.8.4.1	Nennspannungen	408
8.8.4.2	Übersetzungsverhältnis.....	408
8.9	Übungsaufgaben.....	411
8.9.1	Aufgabenstellungen.....	411
8.9.1.1	Übungsaufgabe 8.1.....	411
8.9.1.2	Übungsaufgabe 8.2.....	411
8.9.1.3	Übungsaufgabe 8.3.....	412
8.9.1.4	Übungsaufgabe 8.4.....	412
8.9.2	Ergebnisse.....	413
8.9.2.1	Ergebnisse zur Übungsaufgabe 8.1.....	413
8.9.2.2	Ergebnisse zur Übungsaufgabe 8.2.....	413
8.9.2.3	Ergebnisse zur Übungsaufgabe 8.3.....	413
8.9.2.4	Ergebnisse zur Übungsaufgabe 8.4.....	414
8.9.3	Musterlösungen.....	414
8.9.3.1	Musterlösung zur Übungsaufgabe 8.1.....	414
8.9.3.2	Musterlösung zur Übungsaufgabe 8.2.....	414
8.9.3.3	Musterlösung zur Übungsaufgabe 8.3.....	415
8.9.3.4	Musterlösung zur Übungsaufgabe 8.4.....	417
9	Drehstromasynchronmaschine	421
9.1	Aufbau des Drehstromasynchronmotors	421
9.2	Funktionsweise	425
9.2.1	Schlupf.....	425
9.2.2	Ständerdrehfeld.....	426
9.2.3	Läufer- und Luftspaltdrehfeld.....	430
9.2.4	Drehmomentbildung	430
9.3	Elektrisches Ersatzschaltbild	431
9.4	Leistungsbilanz des Drehstromasynchronmotors	436
9.4.1	Leistung, Verluste und Wirkungsgrad.....	436
9.4.2	Energieeffiziente Asynchronmotoren	438
9.5	Ortskurve des Ständerstroms (Heyland-Kreis)	440
9.5.1	Drehmoment-Schlupf-Kennlinie (Kloss'sche Formel).....	443
9.6	Übungsaufgaben.....	447
9.6.1	Aufgabenstellungen.....	447
9.6.1.1	Übungsaufgabe 9.1.....	447
9.6.1.2	Übungsaufgabe 9.2.....	448
9.6.1.3	Übungsaufgabe 9.3.....	448
9.6.1.4	Übungsaufgabe 9.4.....	449
9.6.2	Ergebnisse.....	449

9.6.2.1	Ergebnisse zur Übungsaufgabe 9.1	449
9.6.2.2	Ergebnisse zur Übungsaufgabe 9.2	449
9.6.2.3	Ergebnisse zur Übungsaufgabe 9.3	449
9.6.2.4	Ergebnisse zur Übungsaufgabe 9.4	450
9.6.3	Musterlösungen.....	450
9.6.3.1	Musterlösung zur Übungsaufgabe 9.1	450
9.6.3.2	Musterlösung zur Übungsaufgabe 9.2	450
9.6.3.3	Musterlösung zur Übungsaufgabe 9.3	451
9.6.3.4	Musterlösung zur Übungsaufgabe 9.4	451
10	Drehstromsynchronmaschine	453
10.1	Aufbau des Drehstromsynchrongenerators.....	454
10.2	Funktionsweise des Drehstromsynchrongenerators	455
10.3	Elektrisches Ersatzschaltbild	458
10.4	Betrieb am starren Netz	459
10.4.1	Synchronisierung mit dem Netz.....	459
10.4.2	Drehstromgenerator als Blindleistungserzeuger.....	460
10.4.3	Drehstromgenerator als Wirkleistungserzeuger.....	462
10.5	Übungsaufgaben.....	463
10.5.1	Aufgabenstellungen.....	463
10.5.1.1	Übungsaufgabe 10.1.....	463
10.5.1.2	Übungsaufgabe 10.2.....	463
10.5.1.3	Übungsaufgabe 10.3.....	463
10.5.1.4	Übungsaufgabe 10.4.....	464
10.5.2	Ergebnisse.....	464
10.5.2.1	Ergebnisse zur Übungsaufgabe 10.1	464
10.5.2.2	Ergebnisse zur Übungsaufgabe 10.2	464
10.5.2.3	Ergebnisse zur Übungsaufgabe 10.3	464
10.5.2.4	Ergebnisse zur Übungsaufgabe 10.4	465
10.5.3	Musterlösungen.....	465
10.5.3.1	Musterlösung zur Übungsaufgabe 10.1	465
10.5.3.2	Musterlösung zur Übungsaufgabe 10.2	465
10.5.3.3	Musterlösung zur Übungsaufgabe 10.3	466
10.5.3.4	Musterlösung zur Übungsaufgabe 10.4	467
11	Gleichstrommaschine	469
11.1	Grundlegende physikalische Gesetze	470
11.1.1	Kraft auf stromdurchflossene gerade Leiter im Magnetfeld	470
11.1.2	Spannungserzeugung in der Läuferwicklung.....	472
11.2	Aufbau des Gleichstrommotors	473
11.2.1	Ständer.....	474
11.2.2	Läufer, Kommutator und Bürsten.....	478

11.2.2.1	Läuferblechpaket.....	479
11.2.2.2	Kommutator und Bürsten.....	480
11.2.2.3	Stromverlauf bei der Kommutierung	482
11.2.2.4	Ankerwicklung	483
11.2.2.5	Ankerrückwirkung	486
11.3	Die Grundgleichungen des Gleichstrommotors	487
11.3.1	Induzierte Spannung.....	487
11.3.2	Drehmoment.....	489
11.3.2.1	Leistungsbilanz des Gleichstrommotors.....	489
11.3.2.2	Drehmoment als Funktion von Fluss und Strom.....	490
11.3.2.3	Drehmoment als Funktion der Drehzahl (M - n -Kennlinie)	491
11.4	Erregungsarten und elektrische Ersatzschaltbilder	492
11.4.1	Erregung von Gleichstrommotoren.....	492
11.4.2	Elektrische Ersatzschaltbilder	492
11.4.2.1	Fremderregter Gleichstrommotor.....	493
11.4.2.2	Nebenschlussmotor.....	494
11.4.2.3	Reihenschlussmotor	495
11.5	Betriebsverhalten von Gleichstrommotoren	495
11.5.1	Nebenschlussverhalten	495
11.5.2	Reihenschlussverhalten.....	497
11.6	Übungsaufgaben.....	500
11.6.1	Aufgabenstellungen.....	500
11.6.1.1	Übungsaufgabe 11.1.....	500
11.6.1.2	Übungsaufgabe 11.2.....	500
11.6.1.3	Übungsaufgabe 11.3.....	501
11.6.1.4	Übungsaufgabe 11.4.....	501
11.6.2	Ergebnisse.....	501
11.6.2.1	Ergebnisse zur Übungsaufgabe 11.1	501
11.6.2.2	Ergebnisse zur Übungsaufgabe 11.2	502
11.6.2.3	Ergebnisse zur Übungsaufgabe 11.3	502
11.6.2.4	Ergebnisse zur Übungsaufgabe 11.4	502
11.6.3	Musterlösungen.....	502
11.6.3.1	Musterlösung zur Übungsaufgabe 11.1	502
11.6.3.2	Musterlösung zur Übungsaufgabe 11.2	503
11.6.3.3	Musterlösung zur Übungsaufgabe 11.3	503
11.6.3.4	Musterlösung zur Übungsaufgabe 11.4	503
12	Servo- und Schrittmotoren	505
12.1	Servomotor.....	505
12.1.1	Gleichstromservomotor.....	508
12.1.2	Bürstenloser Gleichstrommotor	509
12.1.3	Synchronservomotor	512

12.1.4	Asynchronservomotor.....	513
12.2	Schrittmotor.....	513
12.2.1	Reluktanzschrittmotor.....	514
12.2.2	Permanentmagnetschrittmotor.....	514
12.2.3	Hybridschrittmotor.....	515
12.2.3.1	Vollschrittsteuerung.....	516
12.2.3.2	Halbschrittsteuerung.....	516
12.2.3.3	Mikroschrittsteuerung.....	517
13	Leistungselektronik.....	519
13.1	Einführung in die Leistungselektronik.....	520
13.2	Leistungshalbleiter.....	523
13.2.1	Überblick über Leistungshalbleiter.....	523
13.2.2	Ideale Schalter verglichen mit realen Schaltern.....	524
13.2.3	Diode.....	528
13.2.4	Thyristor.....	530
13.2.5	Leistungstransistor.....	534
13.2.6	Gehäusebauformen von Leistungshalbleitern.....	536
13.2.7	Entwärmung und Kühlung von Leistungshalbleitern.....	537
13.2.7.1	Thermisches Ersatzschaltbild.....	539
13.3	Grundlagen und Begriffe der Leistungselektronik.....	541
13.3.1	Leistungssteuerverfahren.....	541
13.3.2	Definitionen.....	542
13.3.2.1	Arithmetischer Mittelwert und Effektivwert.....	542
13.3.2.2	Gleich-, Wechsel- und Mischgrößen.....	543
13.3.2.3	Gesamteffektivwert.....	544
13.3.2.4	Welligkeit.....	544
13.3.2.5	Grund- und Oberschwingungsgehalt.....	544
13.3.3	Energiespeicher.....	545
13.3.4	Leistung und Netzurückwirkungen.....	547
13.3.4.1	Stromüberschwingungen.....	549
13.3.4.2	Leistung.....	550
13.3.5	Leistungsumkehr.....	555
13.3.6	Klassifizierung.....	556
13.4	Netzgeführte Stromrichter.....	557
13.4.1	Kennzeichnung netzgeführter Stromrichter.....	558
13.4.2	Mittelpunktschaltungen.....	558
13.4.2.1	Einpuls-Mittelpunktschaltungen.....	559
13.4.2.2	Zweipuls-Mittelpunktschaltung.....	570
13.4.2.3	Dreipuls-Mittelpunktschaltung.....	584
13.4.2.4	Kennzahlen netzgeführter Stromrichter.....	587
13.4.3	Brückenschaltungen.....	590

13.4.3.1	Zweipuls-Brückenschaltung	590
13.4.3.2	Sechspuls-Brückenschaltung	601
13.5	Selbstgeführte Stromrichter	603
13.5.1	Gleichstromsteller	603
13.5.1.1	Steuerung und Regelung der Ausgangsgleichspannung	604
13.5.1.2	Betriebsarten von Gleichstromstellern	606
13.5.1.3	Einquadranten-Gleichstromsteller	607
13.5.1.4	Zweiquadrantensteller	618
13.5.1.5	Vierquadrantensteller	628
13.5.2	Wechselrichter mit eingepprägter Spannung (UWR)	633
13.5.2.1	Umrichter	633
13.5.2.2	Einphasiger spannungseinprägender Wechselrichter	635
13.5.2.3	Dreiphasiger spannungseinprägender Wechselrichter	640
13.6	Übungsaufgaben	649
13.6.1	Aufgabenstellungen	649
13.6.1.1	Übungsaufgabe 13.1	649
13.6.1.2	Übungsaufgabe 13.2	650
13.6.1.3	Übungsaufgabe 13.3	650
13.6.1.4	Übungsaufgabe 13.4	650
13.6.1.5	Übungsaufgabe 13.5	651
13.6.1.6	Übungsaufgabe 13.6	651
13.6.2	Ergebnisse	652
13.6.2.1	Ergebnisse zur Übungsaufgabe 13.1	652
13.6.2.2	Ergebnisse zur Übungsaufgabe 13.2	652
13.6.2.3	Ergebnisse zur Übungsaufgabe 13.3	652
13.6.2.4	Ergebnisse zur Übungsaufgabe 13.4	652
13.6.2.5	Ergebnisse zur Übungsaufgabe 13.5	652
13.6.2.6	Ergebnisse zur Übungsaufgabe 13.6	652
13.6.3	Musterlösungen	653
13.6.3.1	Musterlösung zur Übungsaufgabe 13.1	653
13.6.3.2	Musterlösung zur Übungsaufgabe 13.2	653
13.6.3.3	Musterlösung zur Übungsaufgabe 13.3	654
13.6.3.4	Musterlösung zur Übungsaufgabe 13.4	654
13.6.3.5	Musterlösung zur Übungsaufgabe 13.5	655
13.6.3.6	Musterlösung zur Übungsaufgabe 13.6	657
14	Elektrische Antriebe	659
14.1	Einführende Übersicht	660
14.1.1	Leistungsantrieb	660
14.1.2	Ungesteuerte, gesteuerte und geregelte Antriebe	661
14.1.2.1	Ungesteuerter Antrieb	661
14.1.2.2	Gesteuerter Antrieb	661

14.1.2.3	Geregelter Antrieb	662
14.1.3	Einsatz- und Betriebsbedingungen	663
14.1.3.1	Bauform und Aufstellung (IM)	663
14.1.3.2	Schutzart (IP)	663
14.1.3.3	Kühlung (IC)	663
14.1.3.4	Betriebsarten	664
14.2	Physikalische Grundgesetze der Antriebstechnik	664
14.2.1	Das dynamische Grundgesetz der Rotation	665
14.2.1.1	Bezugspfeile für Drehzahl und Drehmoment	665
14.2.1.2	Bewegungsgleichung eines rotierenden Körpers	665
14.2.1.3	Freischneiden	666
14.2.1.4	Beispiel für das Aufstellen einer Bewegungsgleichung	666
14.2.2	Umrechnung von Bewegungsgrößen	668
14.2.2.1	Umrechnung von translatorischer Bewegung in rotatorische	668
14.2.2.2	Umrechnung von Drehmomenten	668
14.2.2.3	Umrechnung von Trägheitsmomenten bei rotierenden Massen ...	669
14.2.2.4	Umrechnung von Trägheitsmomenten bei geradlinig bewegten Massen	670
14.3	Stationäre M - n -Kennlinien und Arbeitspunktstabilität	673
14.3.1	Stationäre M_L - n -Kennlinien von Arbeitsmaschinen	673
14.3.1.1	Konstante Antriebsleistung	673
14.3.1.2	Konstantes Lastmoment	674
14.3.1.3	Quadratisch ansteigendes Lastmoment	674
14.3.2	Stationäre M_M - n -Kennlinien von Motoren	675
14.3.3	Stationärer Arbeitspunkt	676
14.3.3.1	Drehmomentgleichung	677
14.3.4	Statische Stabilität im Arbeitspunkt	678
14.4	Antriebsdynamik	682
14.4.1	Langsame Drehzahländerungen	683
14.4.1.1	Konstantes Beschleunigungsmoment	683
14.4.1.2	Linear abnehmendes Beschleunigungsmoment	684
14.4.1.3	Beliebiger zeitlicher Verlauf des Beschleunigungsmoments	686
14.4.2	Schnelle Drehzahländerungen	686
14.5	Klassische Verfahren der Drehzahlsteuerung	689
14.5.1	Drehzahlsteuerung beim Drehstromasynchronmotor	689
14.5.1.1	Grundsätzliche Möglichkeiten	689
14.5.1.2	U - f -Steuerung	690
14.5.2	Drehzahlsteuerung beim Gleichstrommotor	692
14.5.2.1	Drehzahlsteuerung durch Änderung der Ankerspannung	693
14.5.2.2	Drehzahlsteuerung durch Änderung des magnetischen Flusses ...	694
14.6	Antriebsregelung	695
14.6.1	Struktur eines geregelten Antriebs	695

14.6.2	Verfahren für die Lage- und Drehzahlregelung.....	696
14.6.2.1	Antriebsregelung bei Gleichstrommaschinen.....	697
14.6.2.2	Antriebsregelung bei Drehstrommaschinen.....	700
14.6.3	Aufbau von Gesamt-Antriebsmodulen.....	706
14.6.3.1	Netzteil.....	707
14.6.3.2	Leistungsteil-Interface.....	707
14.6.3.3	Signalverarbeitungseinheit.....	707
14.6.3.4	Schnittstellen.....	708
14.6.4	Drehzahl- und Lagegeber für elektrische Antriebe.....	711
14.6.4.1	Kommutierungsgeber.....	712
14.6.4.2	Tachogenerator.....	713
14.6.4.3	Resolver.....	713
14.6.4.4	Inkrementalgeber.....	714
14.6.4.5	Absolutwertgeber.....	715
14.7	Übungsaufgaben.....	716
14.7.1	Aufgabenstellungen.....	716
14.7.1.1	Übungsaufgabe 14.1.....	716
14.7.1.2	Übungsaufgabe 14.2.....	716
14.7.1.3	Übungsaufgabe 14.3.....	717
14.7.2	Ergebnisse.....	718
14.7.2.1	Ergebnisse zur Übungsaufgabe 14.1.....	718
14.7.2.2	Ergebnisse zur Übungsaufgabe 14.2.....	718
14.7.2.3	Ergebnisse zur Übungsaufgabe 14.3.....	718
14.7.3	Musterlösungen.....	719
14.7.3.1	Musterlösung zur Übungsaufgabe 14.1.....	719
14.7.3.2	Musterlösung zur Übungsaufgabe 14.2.....	719
14.7.3.3	Musterlösung zur Übungsaufgabe 14.3.....	720
	Literatur.....	721
	Stichwortverzeichnis.....	725