

# Inhalt

<b>1</b>	<b>Einleitender Überblick .....</b>	<b>17</b>
1.1	Der Weg der Energie vom Kraftwerk zum Verbraucher .....	17
1.2	Anwendungen elektrischer Energie: Motoren und Antriebe.....	18
1.3	Inhalte des Buchs .....	18
1.3.1	Grundlagen der Elektrotechnik .....	19
1.3.2	Elektrische Maschinen .....	19
1.3.3	Elektrische Antriebe.....	19
<b>2</b>	<b>Grundbegriffe der Elektrotechnik.....</b>	<b>21</b>
2.1	Elektrische Ladung .....	21
2.2	Quellen, Potential und Spannung.....	22
2.3	Elektrischer Strom .....	24
2.4	Elektrischer Grundstromkreis .....	24
2.5	Elektrischer Widerstand (im Gleichstromkreis).....	25
2.6	Elektrische Energie (im Gleichstromkreis).....	26
2.7	Elektrische Leistung (im Gleichstromkreis) .....	26
2.8	Wirkungsgrad.....	26
2.9	Bezugspfeile für Strom und Spannung .....	27
2.9.1	Spannungsbezugspfeile.....	28
2.9.2	Strombezugspfeile.....	29
2.10	Erzeuger- und Verbraucherpeilsystem (EPS und VPS).....	30
2.10.1	Erzeugerpeilsystem.....	30
2.10.2	Verbraucherpeilsystem .....	31
2.11	Übungsaufgaben .....	31
<b>3</b>	<b>Lineare Gleichstromnetze .....</b>	<b>33</b>
3.1	Begriffsdefinitionen .....	33
3.2	Komponenten linearer Gleichstromnetzwerke.....	34
3.2.1	Ohm'scher Widerstand/Leitwert.....	35
3.2.2	Ideale Energiequellen.....	36
3.3	Topologie von Gleichstromnetzen .....	38
3.3.1	Knoten und Zweige.....	39
3.3.2	Maschen und Bäume.....	39
3.3.3	Topologische Grundstrukturen .....	41
3.3.3.1	Grundstromkreis .....	41
3.3.3.2	Reine Reihenschaltung.....	42

3.3.3.3	Reine Parallelschaltung.....	42
3.3.3.4	Allgemeines Netz.....	42
3.4	Fundamentale Berechnungsmethoden .....	43
3.4.1	Ohm'sches Gesetz.....	43
3.4.2	Kirchhoff'sche Regeln .....	43
3.4.2.1	Knotenregel.....	43
3.4.2.2	Maschenregel .....	44
3.5	Lineare Quellen.....	45
3.5.1	Verhalten realer Energiequellen.....	45
3.5.2	Modelle für das Verhalten realer Energiequellen .....	45
3.5.3	Kennzeichen linearer Quellen.....	46
3.5.4	Lineare Spannungsquelle .....	47
3.5.5	Lineare Stromquelle.....	48
3.5.6	Hinweise zur Modellierung realer Quellen .....	48
3.5.7	Umwandlung linearer Quellen .....	50
3.5.7.1	Umwandlung einer linearen Spannungsquelle.....	50
3.5.7.2	Umwandlung einer linearen Stromquelle.....	50
3.5.7.3	Beispiel für äquivalente lineare Quellen .....	50
3.5.8	Leistungsanpassung bei linearen Quellen .....	51
3.5.8.1	Leistungsanpassung bei der linearen Spannungsquelle.....	51
3.5.8.2	Leistungsanpassung bei der linearen Stromquelle .....	52
3.6	Methoden zur Umformung von Netzwerken .....	53
3.6.1	Berechnung von Widerstandersatzschaltungen .....	53
3.6.1.1	Reihenschaltung aus Ohm'schen Widerständen oder Leitwerten.....	53
3.6.1.2	Parallelschaltung aus Ohm'schen Widerständen oder Leitwerten .....	54
3.6.1.3	Sterne und Dreiecke aus Ohm'schen Widerständen .....	56
3.6.1.4	Sterne und Dreiecke aus Ohm'schen Leitwerten .....	57
3.6.1.5	Beispiel für die Berechnung einer Widerstandersatzschaltung .....	57
3.6.1.6	Widerstandsberechnung bei Punkten gleichen Potentials .....	59
3.6.2	Berechnung von Quellenersatzschaltungen .....	60
3.7	Berechnung von Spannungen und Strömen bei Serien- und Parallel- schaltungen von Widerständen oder Leitwerten .....	62
3.7.1	Spannungsteilerregel.....	62
3.7.2	Stromteilerregel.....	63
3.8	Berechnung stark verzweigter Netzwerke.....	64
3.8.1	Zweigstromanalyse .....	65
3.8.2	Zweipoltheorie .....	69
3.9	Übungsaufgaben .....	73

<b>4</b>	<b>Elektrische und magnetische Felder.....</b>	<b>75</b>
4.1	Grundlagen der Feldtheorie .....	75
4.1.1	Experimentelle Erfahrungen .....	75
4.1.2	Der (physikalische) Feldbegriff .....	77
4.1.3	Lokale und globale (integrale) Feldgrößen .....	77
4.1.3.1	Lokale Feldgrößen .....	78
4.1.3.2	Globale (integrale) Feldgrößen .....	78
4.1.3.3	Die Feldgrößen des elektrischen Strömungsfelds .....	79
4.1.3.4	Die Feldgrößen des elektrostatischen Felds.....	82
4.1.3.5	Die Feldgrößen des magnetischen Felds.....	85
4.1.4	Ferromagnetische Materialien.....	88
4.1.5	Lorentzkraft auf bewegte Ladungen im Magnetfeld.....	89
4.1.6	Zugspannungen im Magnetfeld und im elektrostatischen Feld.....	91
4.1.7	Feldlinien .....	91
4.1.7.1	Definition .....	92
4.1.7.2	Magnetische Feldlinien an Grenzflächen.....	92
4.1.7.3	Feldlinienverlauf bei homogenen Feldern.....	94
4.2	Die Maxwell'schen Gleichungen.....	94
4.2.1	Die Feldgleichungen .....	96
4.2.1.1	Das Durchflutungsgesetz (1. Maxwell'sche Gleichung).....	96
4.2.1.2	Das Induktionsgesetz (2. Maxwell'sche Gleichung).....	102
4.2.2	Die Kontinuitätsgleichungen (Quellen und Wirbel) .....	108
4.2.2.1	Quelleneigenschaft des elektrostatischen Felds .....	109
4.2.2.2	Wirbeleigenschaft des magnetischen Felds.....	110
4.2.3	Die Materialgleichungen.....	110
4.3	Anwendungsbeispiel: Kondensator.....	111
4.3.1	Begriffsdefinitionen .....	111
4.3.1.1	Kondensator .....	111
4.3.1.2	Kapazität .....	112
4.3.2	Parallel- und Reihenschaltung von Kapazitäten.....	112
4.3.2.1	Parallelschaltung .....	112
4.3.2.2	Reihenschaltung.....	113
4.3.3	Der Kondensator als Energiespeicher .....	114
4.3.3.1	Laden des Kondensators und fundamentale <i>i-u</i> -Beziehung .....	114
4.3.3.2	Gespeicherte Energie des Kondensators .....	116
4.3.3.3	Entladen des Kondensators .....	116
4.4	Anwendungsbeispiel: Spule.....	118
4.4.1	Begriffsdefinitionen .....	118
4.4.1.1	Spule .....	118

4.4.1.2	Selbstinduktion .....	119
4.4.2	Fundamentale $u$ - $i$ -Beziehung und Induktivität.....	119
4.4.3	Schaltungen magnetisch nicht gekoppelter Spulen .....	122
4.4.3.1	Reihenschaltung .....	122
4.4.3.2	Parallelschaltung .....	122
4.4.4	Spule als Energiespeicher .....	123
4.4.4.1	Bestromen der Spule .....	123
4.4.4.2	Gespeicherte Energie der Spule .....	124
4.4.4.3	Entstromen der Spule .....	125
4.5	Anwendungsbeispiel: Transformator (Grundlagen).....	127
4.5.1	Magnetisch gekoppelte Spulen .....	127
4.5.2	Gegeninduktion.....	128
4.5.3	Gegeninduktivität.....	128
4.5.4	Transformatorprinzip .....	128
4.6	Übungsaufgaben .....	130
<b>5</b>	<b>Lineare Wechselstromnetze .....</b>	<b>133</b>
5.1	Begriffe .....	133
5.1.1	Wechselstromnetz/Sinusstromnetz .....	133
5.1.2	Komponenten von Wechselstromnetzen.....	133
5.1.3	Wirk- und Blindleistung.....	134
5.2	Sinusförmige Spannungen und Ströme.....	134
5.2.1	Mathematische Beschreibung .....	134
5.2.2	Grafische Darstellung elektrischer Sinusgrößen .....	137
5.2.2.1	Festlegung des Zeitnullpunkts .....	137
5.2.2.2	Sinusgrößen als Funktion des Winkels .....	137
5.2.2.3	Sinusgrößen als Funktion der Zeit .....	138
5.2.2.4	Phasenwinkel zwischen Spannung und Strom.....	138
5.2.3	Integrale Kennwerte sinusförmiger Größen.....	139
5.2.3.1	Arithmetischer Mittelwert.....	139
5.2.3.2	Effektivwert .....	141
5.2.4	Darstellung sinusförmiger Größen durch komplexe Zeiger.....	142
5.2.4.1	Exponentialform .....	143
5.2.4.2	Algebraische Form.....	144
5.2.4.3	Komplexer Drehzeiger.....	145
5.2.4.4	Reelle Zeitfunktion .....	146
5.2.4.5	Beispiel für das Rechnen mit sinusförmigen Wechselgrößen.....	147
5.2.4.6	Zeigerdiagramm und Phasenwinkel $\varphi$ .....	149
5.3	Komponenten linearer Wechselstromnetze.....	150

5.3.1	Ideale Wechselspannungsquellen.....	150
5.3.2	Reale Wechselspannungsquellen .....	151
5.3.3	Allgemeine komplexe Widerstände und Leitwerte.....	151
5.3.4	Verhalten eines Ohm'schen Widerstands/Leitwerts bei sinusförmiger Wechselspannung .....	153
5.3.5	Verhalten einer Spule bei sinusförmiger Wechselspannung.....	154
5.3.6	Verhalten eines Kondensators bei sinusförmiger Wechselspannung.....	156
5.3.7	Zusammenfassung der Zeigerdiagramme .....	158
5.4	Berechnung linearer Wechselstromnetze .....	159
5.4.1	Fundamentale Berechnungsmethoden .....	159
5.4.1.1	Ohm'sches Gesetz in komplexer Form .....	159
5.4.1.2	Kirchhoff'sche Regeln in komplexer Form .....	160
5.4.2	Komplexe Widerstands- und Leitwertersatzschaltungen .....	161
5.4.2.1	Reihenschaltung.....	161
5.4.2.2	Parallelschaltung.....	163
5.4.3	Effektivwertzeigerdiagramme.....	165
5.4.4	Komplexe Spannungsteilerregel .....	166
5.4.5	Komplexe Stromteilerregel.....	168
5.5	Leistung im Wechselstromnetz.....	170
5.5.1	Momentanleistung am Verbraucher .....	171
5.5.2	Momentane Wirk- und Blindleistung.....	172
5.5.3	Mittlere Leistungen.....	174
5.5.4	Wirk-, Blind- und Scheinleistung, Leistungsfaktor.....	175
5.5.5	Komplexe Leistung.....	177
5.5.6	Blindleistungskompensation (klassisch) .....	178
5.6	Übungsaufgaben .....	183
<b>6</b>	<b>Lineare Drehstromnetze.....</b>	<b>185</b>
6.1	Vorteile von Drehstromsystemen.....	185
6.2	Drehstromgeneratoren.....	185
6.2.1	Prinzip der Drehstromerzeugung .....	185
6.2.2	Symmetrisches dreiphasiges Spannungssystem.....	187
6.2.3	Verkettung .....	188
6.2.3.1	Sternschaltung des Generators (4-Leiter-Netz).....	189
6.2.3.2	Dreieckschaltung des Generators (3-Leiter-Netz).....	192
6.3	Drehstromverbraucher .....	192
6.3.1	Symmetrische und unsymmetrische Verbraucher.....	192
6.3.2	Drehstromverbraucher am 4-Leiter- und 3-Leiter-Netz.....	193
6.4	Berechnung von Drehstromnetzen.....	195

6.4.1	Drehstromverbraucher am 4-Leiter-Netz.....	195
6.4.1.1	Sternschaltung.....	195
6.4.1.2	Dreieckschaltung.....	199
6.4.2	Drehstromverbraucher am 3-Leiter-Netz.....	204
6.4.2.1	Sternschaltung.....	204
6.4.2.2	Dreieckschaltung.....	204
6.5	Leistung im Drehstromnetz.....	204
6.5.1	Ausgangslage für die Leistungsberechnung.....	204
6.5.2	Momentanleistung.....	205
6.5.3	Komplexe Leistung, Wirk-, Blind- und Scheinleistung.....	206
6.5.4	Drehstromleistung bei symmetrischer Last.....	208
6.5.5	Kollektive Leistung.....	210
6.6	Blindleistungskompensation im Drehstromnetz (klassisch).....	210
6.6.1	Problemstellung.....	210
6.6.2	Sternschaltung der Kondensatoren.....	211
6.6.3	Dreieckschaltung der Kondensatoren.....	212
6.7	Übungsaufgaben.....	213
<b>7</b>	<b>Überblick über elektrische Maschinen.....</b>	<b>215</b>
7.1	Unterscheidungsmerkmale für elektrische Maschinen.....	215
7.2	Haupttypen elektrischer Maschinen.....	215
7.2.1	Transformator.....	215
7.2.2	Rotierende elektrische Maschinen und Linearmaschinen.....	217
7.2.2.1	Drehfeldmaschine.....	217
7.2.2.2	Einphasen-Wechselstrommaschine.....	218
7.2.2.3	Gleichstrommaschine.....	219
7.2.2.4	Schrittmotor.....	219
7.3	Spezielle Typen rotierender elektrischer Maschinen.....	220
7.3.1	Servomotor.....	220
7.3.2	Elektronisch kommutierter Motor.....	221
7.3.3	Reluktanzmaschine.....	221
7.3.4	High-Torque-Motor (Direktantrieb).....	221
<b>8</b>	<b>Transformator.....</b>	<b>223</b>
8.1	Mechanischer Aufbau.....	224
8.1.1	Eisenkern.....	225
8.1.2	Wicklungen.....	227
8.2	Funktionsprinzip des Einphasentransformators.....	230
8.3	Bezugspfeile beim Einphasentransformator.....	231

8.3.1	Wicklungssinn .....	231
8.3.2	Magnetische Kopplung und Strombezugspfeile .....	232
8.3.3	Klemmenspannungen.....	234
8.3.4	Schema für die Festlegung der Bezugspfeile .....	234
8.4	Der ideale Einphasentransformator.....	237
8.4.1	Bezugspfeile und Wicklungssinn.....	237
8.4.2	Ideale Spannungstransformation.....	238
8.4.3	Ideale Stromtransformation.....	239
8.4.4	Ideale Widerstandstransformation .....	241
8.5	Der reale Einphasentransformator.....	241
8.5.1	Vollständiges Ersatzschaltbild des Einphasentransformators .....	242
8.5.1.1	Kupferverluste .....	242
8.5.1.2	Unvollständige magnetische Kopplung .....	243
8.5.1.3	Eisenverluste.....	245
8.5.2	Leerlauf- und Kurzschlussversuch.....	246
8.5.2.1	Leerlaufversuch.....	246
8.5.2.2	Kurzschlussversuch.....	248
8.5.2.3	Berechnungsbeispiel .....	252
8.5.3	Nennbetrieb (Kapp'sches Dreieck).....	253
8.6	Drehstromtransformator.....	254
8.6.1	Aufbau eines Drehstrom-Kerntransformators .....	254
8.6.2	Wicklungen und Schaltungen .....	254
8.6.3	Schaltgruppen .....	255
8.6.3.1	Kennbuchstaben.....	255
8.6.3.2	Kennzahl .....	256
8.6.4	Elektrisches Ersatzschaltbild bei symmetrischer Last.....	257
8.6.4.1	Nennspannungen.....	258
8.6.4.2	Übersetzungsverhältnis .....	258
8.7	Übungsaufgaben .....	261
<b>9</b>	<b>Drehstromasynchronmaschine .....</b>	<b>263</b>
9.1	Aufbau des Drehstromasynchronmotors.....	263
9.2	Funktionsweise .....	266
9.2.1	Schlupf.....	267
9.2.2	Ständerdrehfeld.....	268
9.2.3	Läufer- und Luftspaltdrehfeld.....	271
9.2.4	Drehmomentbildung .....	271
9.3	Elektrisches Ersatzschaltbild.....	273
9.4	Leistungsbilanz des Drehstromasynchronmotors.....	277

9.5	Ortskurve des Ständerstroms (Heyland-Kreis) .....	280
9.6	Drehmoment-Schlupf-Kennlinie (Kloss'sche Formel) .....	283
9.7	Übungsaufgaben .....	287
<b>10</b>	<b>Drehstromsynchronmaschine .....</b>	<b>289</b>
10.1	Aufbau des Drehstromsynchrongenerators .....	289
10.2	Funktionsweise des Drehstromsynchrongenerators .....	291
10.3	Elektrisches Ersatzschaltbild.....	293
10.4	Betrieb am starren Netz.....	295
10.4.1	Synchronisierung mit dem Netz.....	295
10.4.2	Drehstromgenerator als Blindleistungserzeuger .....	296
10.4.3	Drehstromgenerator als Wirkleistungserzeuger .....	297
10.5	Übungsaufgaben .....	299
<b>11</b>	<b>Gleichstrommaschine .....</b>	<b>301</b>
11.1	Grundlegende physikalische Gesetze.....	301
11.1.1	Kraft auf stromdurchflossene gerade Leiter im Magnetfeld .....	301
11.1.2	Spannungserzeugung in der Läuferwicklung.....	304
11.2	Aufbau des Gleichstrommotors .....	305
11.2.1	Ständer .....	306
11.2.2	Läufer, Kommutator und Bürsten .....	310
11.2.2.1	Läuferblechpaket.....	311
11.2.2.2	Kommutator und Bürsten.....	311
11.2.2.3	Stromverlauf bei der Kommutierung .....	313
11.2.2.4	Ankerwicklung.....	315
11.2.2.5	Ankerrückwirkung.....	318
11.3	Die Grundgleichungen des Gleichstrommotors .....	319
11.3.1	Induzierte Spannung .....	319
11.3.2	Drehmoment .....	321
11.3.2.1	Leistungsbilanz des Gleichstrommotors .....	321
11.3.2.2	Drehmoment als Funktion von Fluss und Strom.....	322
11.3.2.3	Drehmoment als Funktion der Drehzahl ( $M$ - $n$ -Kennlinie).....	322
11.4	Erregungsarten und elektrische Ersatzschaltbilder.....	323
11.4.1	Erregung von Gleichstrommotoren.....	323
11.4.2	Elektrische Ersatzschaltbilder .....	324
11.4.2.1	Fremderregter Gleichstrommotor.....	324
11.4.2.2	Nebenschlussmotor .....	325
11.4.2.3	Reihenschlussmotor .....	326
11.5	Betriebsverhalten von Gleichstrommotoren.....	327

11.5.1	Nebenschlussverhalten.....	327
11.5.2	Reihenschlussverhalten.....	328
11.6	Übungsaufgaben .....	331
<b>12</b>	<b>Elektrische Antriebe .....</b>	<b>333</b>
12.1	Einführende Übersicht .....	333
12.1.1	Leistungsantrieb.....	333
12.1.2	Ungesteuerte, gesteuerte und geregelte Antriebe.....	335
12.1.2.1	Ungesteuerter Antrieb.....	335
12.1.2.2	Gesteuerter Antrieb.....	335
12.1.2.3	Geregelter Antrieb .....	336
12.1.3	Einsatz- und Betriebsbedingungen.....	337
12.1.3.1	Bauform und Aufstellung (IM).....	337
12.1.3.2	Schutzart (IP).....	337
12.1.3.3	Kühlung (IC).....	337
12.1.3.4	Betriebsarten .....	338
12.2	Physikalische Grundgesetze der Antriebstechnik .....	338
12.2.1	Das dynamische Grundgesetz der Rotation .....	339
12.2.1.1	Bezugspfeile für Drehzahl und Drehmoment.....	339
12.2.1.2	Bewegungsgleichung eines rotierenden Körpers .....	339
12.2.1.3	Freischneiden .....	340
12.2.1.4	Beispiel für das Aufstellen einer Bewegungsgleichung.....	340
12.2.2	Umrechnung von Bewegungsgrößen .....	341
12.2.2.1	Umrechnung von translatorischer Bewegung in rotatorische .....	341
12.2.2.2	Umrechnung von Drehmomenten.....	342
12.2.2.3	Umrechnung von Trägheitsmomenten bei rotierenden Massen.....	343
12.2.2.4	Umrechnung von Trägheitsmomenten bei geradlinig bewegten Massen .....	344
12.2.2.5	Beispiel für die Umrechnung von Bewegungsgrößen.....	345
12.3	Stationäre $M$ - $n$ -Kennlinien und Arbeitspunktstabilität .....	346
12.3.1	Stationäre $M_L$ - $n$ -Kennlinien von Arbeitsmaschinen.....	347
12.3.1.1	Konstante Antriebsleistung.....	347
12.3.1.2	Konstantes Lastmoment.....	347
12.3.1.3	Quadratisch ansteigendes Lastmoment.....	348
12.3.2	Stationäre $M_M$ - $n$ -Kennlinien von Motoren.....	348
12.3.3	Stationärer Arbeitspunkt.....	350
12.3.3.1	Drehmomentgleichung.....	350
12.3.3.2	Beispiel für eine Arbeitspunktberechnung.....	351
12.3.4	Statische Stabilität im Arbeitspunkt.....	352

12.4	Antriebsdynamik.....	356
12.4.1	Langsame Drehzahländerungen.....	356
12.4.1.1	Konstantes Beschleunigungsmoment.....	357
12.4.1.2	Linear abnehmendes Beschleunigungsmoment.....	358
12.4.1.3	Beliebiger Verlauf des Beschleunigungsmoments.....	359
12.4.2	Schnelle Drehzahländerungen.....	359
12.5	Klassische Verfahren der Drehzahlsteuerung.....	362
12.5.1	Drehzahlsteuerung beim Drehstromasynchronmotor.....	363
12.5.1.1	Grundsätzliche Möglichkeiten.....	363
12.5.1.2	$U$ - $f$ -Steuerung.....	363
12.5.2	Drehzahlsteuerung beim Gleichstrommotor.....	365
12.6	Stromrichterantriebe.....	368
12.6.1	Stromrichterventile.....	368
12.6.1.1	Diode.....	369
12.6.1.2	Thyristor.....	370
12.6.1.3	Leistungs transistor.....	372
12.6.2	Stromrichter.....	373
12.6.3	Netzgeführter Stromrichter für Gleichstrommotoren.....	375
12.6.3.1	Wechselstrombrückenschaltung mit Dioden.....	375
12.6.3.2	Wechselstrombrückenschaltung mit Thyristoren.....	377
12.6.3.3	Drehstrombrückenschaltung.....	379
12.6.4	Transistorumrichter für den Drehstromasynchronmotor.....	380
12.6.4.1	Grundsätzlicher Aufbau eines $U$ -Umrichters.....	380
12.6.4.2	Pulsweitenmodulation.....	381
12.7	Antriebsregelung.....	386
12.7.1	Struktur eines geregelten Antriebs.....	386
12.7.1.1	Verfahren für die Lage- und Drehzahlregelung.....	387
12.7.1.2	Aufbau von Gesamt-Antriebsmoduln.....	388
12.7.2	Netzteil.....	389
12.7.3	Leistungsteil-Interface.....	390
12.7.4	Signalverarbeitungseinheit.....	390
12.7.5	Schnittstellen.....	390
12.8	Übungsaufgaben.....	395
	<b>Lösungen der Übungsaufgaben.....</b>	<b>397</b>
	<b>Literatur.....</b>	<b>405</b>
	<b>Stichwortverzeichnis.....</b>	<b>407</b>