

Rudolf Busch

Elektrotechnik und Elektronik

für Maschinenbauer und Verfahrenstechniker

4., korrigierte und aktualisierte Auflage

Mit 463 Abbildungen und 132 Aufgaben mit Lösungen



Inhaltsverzeichnis

Teil A : Grundlagen der Elektrotechnik.....	1
1 Das elektrische Feld.....	1
1.1 Feldbegriff. Darstellung von Feldern.....	1
1.2 Das stationäre elektrische Strömungsfeld.....	2
1.2.1 Ladung. Strom. Stromdichte.....	2
1.2.2 Potenzial. Spannung. Feldstärke.....	7
1.2.3 Elektrischer Widerstand. Ohmsches Gesetz.....	12
1.2.4 Der elektrische Stromkreis.....	14
1.2.5 Die Gesetze von Kirchhoff.....	16
1.3 Das elektrostatische Feld.....	18
1.3.1 Entwicklung aus dem Strömungsfeld.....	18
1.3.2 Kenngrößen des elektrostatischen Feldes.....	20
1.3.3 Kapazität. Kondensatoren.....	22
1.3.4 Kondensatorstrom.....	23
1.3.5 Energie und Kräfte im elektrostatischen Feld.....	24
1.4 Übungsaufgaben.....	26
2 Das magnetische Feld.....	28
2.1 Magnetische Erscheinungen.....	28
2.2 Magnetische Kenngrößen.....	30
2.2.1 Magnetischer Fluss und magnetische Flussdichte.....	30
2.2.2 Durchflutung. Magnetische Spannung. Magnetischer Widerstand.....	31
2.2.3 Die magnetische Feldstärke.....	33
2.3 Das Durchflutungsgesetz.....	34
2.4 Materie im Magnetfeld.....	37
2.4.1 Die Permeabilität. Einteilung der Stoffe.....	37
2.4.2 Hystereseschleife und Magnetisierungskurve.....	38
2.5 Das Induktionsgesetz.....	42
2.5.1 Grundlagen. Der Versuch von Faraday.....	42
2.5.2 Anwendungen des Induktionsgesetzes.....	48
2.6 Selbst- und Gegeninduktion.....	50
2.6.1 Selbstinduktion.....	50
2.6.2 Gegeninduktion.....	53
2.7 Energie und Kräfte im magnetischen Feld.....	55
2.7.1 Energieinhalt des Magnetfeldes.....	55
2.7.2 Kraftwirkungen im magnetischen Feld.....	55
2.7.2.1 Kräfte an Grenzflächen.....	55
2.7.2.2 Kräfte auf stromdurchflossene Leiter.....	56
2.8 Übungsaufgaben.....	58
3 Die passiven Bauelemente der Elektrotechnik.....	62
4 Berechnung von Stromkreisen bei Gleichstrom.....	63
4.1 Der unverzweigte Gleichstromkreis.....	63
4.1.1 Der elektrische Widerstand.....	63
4.1.2 Lineare und nichtlineare Widerstände.....	64
4.1.3 Energie und Leistung im Gleichstromkreis.....	65

4.1.4	Der Grundstromkreis.....	66
4.1.5	Leistungsumsatz im Stromkreis.....	70
4.2	Der verzweigte Gleichstromkreis.....	72
4.2.1	Vereinfachung von Widerstandsnetzwerken.....	72
4.2.2	Teilerregeln.....	76
4.2.2.1	Die Stromteilerregel.....	76
4.2.2.2	Die Spannungsteilerregel.....	77
4.2.3	Berechnung verzweigter Stromkreise mittels der Gesetze von Kirchhoff.....	79
4.3	Übungsaufgaben.....	82
5	Berechnung von Stromkreisen bei Wechselstrom.....	85
5.1	Erzeugung von Wechselstrom. Bestimmungsgrößen.....	85
5.2	Kenngrößen.....	86
5.2.1	Zeitliche Mittelwerte.....	86
5.2.2	Zählpfeile.....	88
5.3	Darstellung sinusförmiger elektrischer Größen im Zeigerdiagramm.....	89
5.4	Spannungs- und Stromzeiger bei den Grundschaltelementen.....	91
5.5	Zeigerdiagramme bei gemischten Wechselstromschaltungen.....	92
5.5.1	Reihenschaltung von Kondensator und Widerstand.....	92
5.5.2	Parallelschaltung von Spule und Widerstand.....	93
5.5.3	Gemischte Schaltung.....	94
5.6	Die komplexe Darstellung von Zeigern.....	95
5.7	Komplexe Zeiger der Grundschaltelemente.....	97
5.8	Komplexer Widerstand und komplexer Leitwert.....	99
5.8.1	Komplexer Widerstand.....	99
5.8.2	Komplexer Leitwert.....	104
5.9	Wirk- und Blindkomponenten von Spannung und Strom.....	105
5.10	Wechselstromleistung.....	106
5.11	Drehstrom (Dreiphasenwechselstrom).....	110
5.11.1	Erzeugung von Drehstrom.....	110
5.11.2	Die Verkettung des Drehstromsystems.....	112
5.11.3	Spannungen und Ströme im symmetrischen Drehstromsystem.....	114
5.11.4	Drehstromleistung.....	117
5.12	Übungsaufgaben.....	118
6	Ausgleichsvorgänge in Stromkreisen.....	123
6.1	Die Schaltgesetze.....	123
6.2	Aufladung eines Kondensators.....	124
6.3	Kurzschluss einer stromdurchflossenen Spule.....	127
6.4	Entladung eines Kondensators in einem Reihenschwingkreis.....	129
6.5	Schlussbemerkungen.....	132
6.6	Übungsaufgaben.....	132
Teil B: Anwendungen der Elektrotechnik.....		134
7	Elektronik.....	134
7.1	Einleitende Bemerkungen.....	134
7.2	Physikalische Grundlagen.....	135

7.2.1	Eigenleitung.....	135
7.2.2	Störstellenleitung.....	137
7.2.3	Eigen- und Störstellenleitung im Bändermodell.....	138
7.2.4	Der pn-Übergang.....	141
7.3	Elektronische Bauelemente.....	143
7.3.1	Halbleiterwiderstände.....	143
7.3.2	Halbleiterdioden.....	144
	7.3.2.1 Aufbau. Kennlinien. Typen.....	144
	7.3.2.2 Diode als Gleichrichter.....	147
7.3.3	Transistoren.....	149
	7.3.3.1 Bipolartransistoren.....	150
	7.3.3.2 Feldeffekttransistoren.....	154
	7.3.3.3 Insulated Gate Bipolar Transistors (IGBTs).....	157
	7.3.3.4 Betriebsarten von Transistoren.....	158
	7.3.3.5 Transistoren als Verstärker.....	160
	7.3.3.6 Transistoren als Schalter.....	163
7.3.4	Thyristoren.....	164
	7.3.4.1 Aufbau und Wirkungsweise. Typen.....	164
	7.3.4.2 Thyristoren als gesteuerte Gleichrichter.....	167
7.3.5	Optoelektronische Bauelemente.....	170
	7.3.5.1 Lichtempfangende Bauelemente.....	170
	7.3.5.2 Lichtaussendende Bauelemente.....	172
	7.3.5.3 Andere optoelektronische Bauelemente.....	173
7.4	Leistungselektronik.....	174
7.4.1	Einführung. Arten und Wirkungsweise von Stromrichtern.....	174
7.4.2	Gleichrichter.....	177
	7.4.2.1 Gleichrichter mit Dioden (Ungesteuerte Gleichrichter).....	177
	7.4.2.1.1 Einphasengleichrichter.....	177
	7.4.2.1.2 Dreiphasengleichrichter.....	179
	7.4.2.2 Gleichrichter mit Thyristoren (Gesteuerte Gleichrichter).....	179
	7.4.2.2.1 Gesteuerte Einphasengleichrichter.....	179
	7.4.2.2.2 Gesteuerte Dreiphasengleichrichter (B6C,B6H).....	183
	7.4.2.2.3 Zusammenfassung gesteuerte Gleichrichter.....	183
	7.4.2.2.4 Umkehrstromrichter.....	185
7.4.3	Wechselrichter.....	187
7.4.4	Gleichstromumrichter.....	188
7.4.5	Wechselstromumrichter. Frequenzumrichter.....	189
7.5	Informationselektronik.....	192
7.5.1	Einführung.....	192
7.5.2	Analoge und digitale Größen und Signale.....	193
7.5.3	Analogschaltungen.....	196
	7.5.3.1 Wechselspannungsverstärker.....	196
	7.5.3.2 Operationsverstärker.....	197
	7.5.3.3 Schwingungserzeuger.....	198
7.5.4	Digitalschaltungen.....	199
	7.5.4.1 Kombinatorische Schaltungen.....	199
	7.5.4.1.1 Logische Verknüpfungen.....	199
	7.5.4.1.2 Gatter.....	201

7.5.4.2	Sequenzielle Schaltungen.....	203
7.5.4.2.1	Kippschaltungen.....	203
7.5.4.2.2	Flipflops.....	204
7.6	Mikroelektronik.....	206
7.6.1	Schaltungsintegration.....	206
7.6.2	Schaltkreisfamilien.....	208
7.6.3	Mikroprozessoren und Mikrorechner.....	209
7.6.3.1	Komponenten des Mikrorechnersystems.....	209
7.6.3.2	Mikrorechner als Prozessrechner.....	217
7.6.3.3	Weitere Ergebnisse der Mikrorechentechnik.....	222
7.7	Übungsaufgaben.....	223
Elektrische Maschinen und Antriebe.....		227
8.1	Einleitung.....	227
8.2	Die Gleichstrommaschine.....	228
8.2.1	Aufbau und Funktionsprinzip.....	228
8.2.2	Erregung der Gleichstrommaschine.....	230
8.2.3	Der Gleichstromnebenschlussmotor.....	231
8.2.3.1	Ersatzschaltbild und Kennlinien.....	231
8.2.3.2	Drehzahlstellung.....	234
8.2.3.3	Anlassen und Bremsen.....	235
8.2.4	Der Gleichstromreihenschlussmotor.....	238
8.2.5	Spezielle Typen.....	239
8.3	Der Transformator.....	239
8.3.1	Grundsätzlicher Aufbau und Funktionsprinzip.....	239
8.3.2	Der ideale Transformator.....	240
8.3.2.1	Definition und Ersatzschaltbild.....	240
8.3.2.2	Induzierte Spannung und Klemmenspannung.....	241
8.3.2.3	Zeigerdiagramme und Wirkungsweise.....	242
8.3.2.4	Widerstandstransformation.....	245
8.3.3	Der technische Transformator.....	246
8.3.3.1	Ersatzschaltbild.....	246
8.3.3.2	Spezielle Betriebsfälle.....	248
8.3.3.3	Betriebsverhalten.....	251
8.3.4	Drehstromtransformatoren.....	254
8.3.5	Spezielle Transformatortypen.....	256
8.4	Rotierende Drehstrommaschinen.....	257
8.4.1	Das Drehfeld.....	257
8.4.2	Arten von Drehfeldmaschinen.....	259
8.4.3	Der Drehstromasynchronmotor.....	261
8.4.3.1	Aufbau.....	261
8.4.3.2	Ersatzschaltbild.....	263
8.4.3.3	Drehzahl-Drehmomenten-Kennlinie.....	264
8.4.3.4	Drehzahlstellung.....	266
8.4.3.5	Anlassen von Asynchronmotoren.....	268
8.4.3.6	Spezielle Typen von Asynchronmotoren.....	269
8.4.4	Die Synchronmaschine.....	269
8.4.4.1	Ersatzschaltbild.....	269

8.4.4.2	Betrieb am starren Drehstromnetz.....	271
8.4.4.3	Inselbetrieb des Synchrongenerators.....	276
8.4.4.4	Spezielle Typen von Synchronmotoren.....	277
8.5	Elektrische Antriebstechnik.....	278
8.5.1	Mechanische Struktur elektrischer Antriebe.....	278
8.5.2	Grundgesetze elektrischer Antriebe.....	278
8.5.2.1	Die Bewegungsgleichung.....	278
8.5.2.2	Stabilität stationärer Arbeitspunkte.....	281
8.5.2.3	Wellenlast bei Übertragungsgliedern.....	282
8.5.3	Betriebsarten elektrischer Maschinen.....	283
8.5.3.1	Motorwicklungserwärmung.....	283
8.5.3.2	Nennbetriebsarten.....	285
8.5.3.3	Motorauswahl.....	286
8.5.4	Ein- und Mehrquadrantenantriebe.....	287
8.5.5	Regelung elektrischer Antriebe.....	289
8.5.6	Ergänzende Bemerkungen.....	291
8.6	Übungsaufgaben.....	292
Elektrische Energieversorgung.....		295
9.1	Einleitung.....	295
9.2	Überblick zu Kraftwerken.....	296
9.3	Elektrotechnische Komponenten eines Kraftwerkes.....	302
9.4	Übertragungssysteme für elektrische Energie.....	306
9.5	Drehstromnetze.....	307
9.5.1	Spannungsebenen.....	307
9.5.2	Drehstromleitungen.....	308
9.5.2.1	Die Leitungsgleichungen.....	308
9.5.2.2	Übertragung auf Hoch- und Höchstspannungsleitungen (Fernübertragung).....	310
9.5.2.3	Übertragung auf Mittel- und Niederspannungsleitungen.....	313
9.5.2.4	Praktische Ausführung von Drehstromleitungen.....	316
9.5.3	Netzgestaltung.....	321
9.5.3.1	Sternpunktbehandlung in Drehstromnetzen.....	321
9.5.3.2	Netzstrukturen.....	321
9.6	Schaltanlagen.....	324
9.6.1	Arten von Schaltanlagen.....	324
9.6.2	Schaltgeräte der elektrischen Energietechnik.....	325
9.6.2.1	Schalten von Wechselstrom.....	325
9.6.2.2	Niederspannungsschaltgeräte.....	326
9.6.2.3	Schaltgeräte für Spannungen > 1000 V.....	329
9.6.2.4	Hochleistungssicherungen.....	329
9.6.3	Praktische Ausführung von Schaltanlagen.....	330
9.7	Personenschutz in Niederspannungsnetzen.....	332
9.7.1	Gefährdung des Menschen.....	332
9.7.2	Schutzmaßnahmen.....	333
9.8	Übungsaufgaben.....	335

10 Elektrische Messtechnik	338
10.1 Einleitung	338
10.2 Grundlegende Begriffe der elektrischen Messtechnik	338
10.3 Elektrische Messwerke	341
10.3.1 Drehspulmesswerk	341
10.3.2 Dreheisenmesswerk	342
10.3.3 Elektrodynamisches Messwerk	343
10.3.4 Induktionsmesswerk	343
10.4 Messgeräte	344
10.4.1 Vielfachmesser	344
10.4.2 Elektronenstrahloszilloskope	346
10.4.3 Registriergeräte	349
10.4.4 Zählmessgeräte	351
10.5 Messverfahren für elektrische Größen	353
10.5.1 Messung von Strom und Spannung	353
10.5.2 Messung von Widerständen und Impedanzen	354
10.5.3 Messung der elektrischen Leistung	355
10.5.4 Zeit- und Frequenzmessung	357
10.6 Elektrische Messung nichtelektrischer Größen	358
10.6.1 Allgemeines	358
10.6.2 Messung von Wegen und Winkeln	358
10.6.3 Messung von Kräften und Momenten	360
10.6.4 Drehzahlmessung	361
10.6.5 Temperaturmessung	362
10.7 Störbeeinflussung von Messkreisen	363
10.8 Übungsaufgaben	365
Lösungen der Übungsaufgaben	367
Literatur	382
Sachwortverzeichnis	384