

Ekbert Hering · Jürgen Gutekunst · Rolf Martin

Elektrotechnik für Maschinenbauer

Grundlagen

Mit 318 Abbildungen

Unter Mitarbeit von:

Dipl.-Ing. Klaus Bressler

Dipl.-Ing. Alois Vogt



Springer

Prof. Dr. rer. nat. Dr. rer. pol. Ekbert Hering
Fachhochschule Aalen
Im Bürglesbühl 41
73540 Heubach-Lautern

Dipl.-Ing. Jürgen Gutekunst
Eichenweg 18
72622 Nürtingen

Prof. Dr. Rolf Martin
Fachhochschule Esslingen
Wolf-Hirth-Weg 7
73257 Köngen

ISBN 978-3-662-06993-6

Die Deutsche Bibliothek – CIP-Einheitsaufnahme

Hering, Ekbert:
Elektrotechnik für Maschinenbauer : Grundlagen / Ekbert Hering ;
Jürgen Gutekunst ; Rolf Martin

(VDI-Buch)

ISBN 978-3-662-06993-6 ISBN 978-3-662-06992-9 (eBook)
DOI 10.1007/978-3-662-06992-9

Dieses Werk ist urheberrechtlich geschützt. Die dadurch begründeten Rechte, insbesondere die der Übersetzung, des Nachdrucks, des Vortrags, der Entnahme von Abbildungen und Tabellen, der Funksendung, der Mikroverfilmung oder der Vervielfältigung auf anderen Wegen und der Speicherung in Datenverarbeitungsanlagen, bleiben, auch bei nur auszugsweiser Verwertung, vorbehalten. Eine Vervielfältigung dieses Werkes oder von Teilen dieses Werkes ist auch im Einzelfall nur in den Grenzen der gesetzlichen Bestimmungen des Urheberrechtsgesetzes der Bundesrepublik Deutschland vom 9. September 1965 in der jeweils geltenden Fassung zulässig. Sie ist grundsätzlich vergütungspflichtig. Zuwiderhandlungen unterliegen den Strafbestimmungen des Urheberrechtsgesetzes.

© Springer-Verlag Berlin Heidelberg 1999

Ursprünglich erschienen bei Springer-Verlag Berlin Heidelberg New York 1999
Softcover reprint of the hardcover 1st edition 1999

Die Wiedergabe von Gebrauchsnamen, Handelsnamen, Warenbezeichnungen usw. in diesem Buch berechtigt auch ohne besondere Kennzeichnung nicht zu der Annahme, daß solche Namen im Sinne der Warenzeichen- und Markenschutz-Gesetzgebung als frei zu betrachten wären und daher von jedermann benutzt werden dürften.

Sollte in diesem Werk direkt oder indirekt auf Gesetze, Vorschriften oder Richtlinien (z.B. DIN, VDI, VDE) Bezug genommen oder aus ihnen zitiert worden sein, so kann der Verlag keine Gewähr für die Richtigkeit, Vollständigkeit oder Aktualität übernehmen. Es empfiehlt sich, gegebenenfalls für die eigenen Arbeiten die vollständigen Vorschriften oder Richtlinien in der jeweils gültigen Fassung hinzuzuziehen.

Herstellung: ProduServ GmbH Verlagsservice, Berlin

SPIN: 10568408

68/3020 – 5 4 3 2 1 0 – Gedruckt auf säurefreiem Papier

Vorwort

Im Maschinenbau hält die Elektrotechnik und die Elektronik immer mehr Einzug. Deshalb ist grundlegendes Wissen in diesem Bereich unerlässlich. Das vorliegende Werk bietet in seinem ersten Band diese Grundlagen in bewährter strukturierter und praxisorientierter Form.

Das Kapitel A befaßt sich mit den physikalischen Grundlagen der Elektrotechnik, einschließlich der Grundlagen der Leitungsmechanismen. Kapitel B gibt eine kompakte Übersicht über die elektrische Meßtechnik und deren praktische Einsatzgebiete. Im Kapitel C wird ausführlich die Halbleitertechnik besprochen, neben den elektronischen Bauelementen werden die Eigenschaften und Anwendungen der analogen integrierten Schaltungen und der Optoelektronik abgehandelt. Das Kapitel D ist den Bauelementen der Leistungselektronik und deren Anwendungen gewidmet. Im abschließenden Kapitel E des Grundlagenbandes werden die Sensoren und Aktoren in ihrer Funktionsweise und ihrem Anwendungsspektrum vorgestellt.

Jedes Kapitel enthält Übungsaufgaben, mit denen der Leser seine Kenntnisse überprüfen und vertiefen kann und verweist auf die entsprechende, vertiefende Literatur. Das Buch schließt mit den Lösungen der Übungsaufgaben.

Jeder Abschnitt ist in gleicher Weise gegliedert: Eine strukturierte Übersicht zeigt die Zusammenhänge auf, Beispiele verdeutlichen die Rechnungen und die Gedankengänge, Diagramme und Fotos geben Hinweise für den praktischen Einsatz.

Der nachfolgende zweite Band wird die maschinenbaulichen Anwendungen der Elektrotechnik behandeln und insbesondere einen Schwerpunkt bei den elektrischen Maschinen und Anlagen setzen.

Zu danken haben wir zahlreichen Firmen für die Bereitstellung aktueller Fotos und Praxisbeispiele. Ganz besonderer Dank gebührt dem Springer-Verlag, speziell Herrn *Thomas Lehnert* und Herrn Dr. *Hubertus v. Riedesel*, die in hervorragender Weise dieses Werk betreut haben. Ein herzliches Dankeschön entbieten wir Frau *Regina Peters* von ProduServ, die in bewährter Weise die komplizierten Bilder gestaltete und für einen professionellen Umbruch sorgte. Nicht vergessen möchten wir unsere Ehefrauen und Kinder, die uns mit viel Verständnis bei der Arbeit begleitet haben.

Wir hoffen, daß dieses Werk den Studierenden der Ingenieurwissenschaften eine gute Hilfe bei der Erarbeitung des Wissens bietet und den Ingenieuren in der Praxis bei ihrer täglichen Arbeit wertvolle Kenntnisse vermittelt. Gerne nehmen wir Kritik und Verbesserungsvorschläge aus dem Leserkreis entgegen.

Heubach, Nürtingen und Esslingen
August 1998

*Ekbert Hering
Jürgen Gutekunst
Rolf Martin*

Inhalt

A	Grundlagen der Elektrotechnik	1
A.1	Physikalische Grundgesetze und Definitionen	1
A.1.1	Ladung	1
A.1.2	Spannung	1
A.1.3	Strom	2
A.1.4	Ohmsches Gesetz	4
A.1.5	Widerstand	4
A.1.6	Arbeit und Leistung	6
A.1.7	Kirchhoffsche Regeln	6
	Übungsaufgaben	8
A.2	Gleichstromkreise mit linearen Komponenten	9
A.2.1	Zweipolquellen	9
A.2.2	Reihenschaltung von Widerständen	12
A.2.3	Parallelschaltung von Widerständen	13
A.2.4	Gemischte Schaltungen	14
A.2.5	Messung elektrischer Größen	18
A.2.5.1	Strommessung	18
A.2.5.2	Spannungsmessung	19
A.2.5.3	Widerstandsmessung	19
	Übungsaufgaben	21
A.3	Elektrisches Feld	22
A.3.1	Feldbegriff	22
A.3.2	Kondensator	23
A.3.3	Laden und Entladen von Kondensatoren	26
A.3.4	Energieinhalt des elektrischen Feldes	26
	Übungsaufgaben	27
A.4	Magnetisches Feld	28
A.4.1	Feldbegriff	28
A.4.2	Kraftwirkungen im Magnetfeld	31
A.4.3	Materie im Magnetfeld	34
A.4.4	Magnetischer Kreis	38
A.4.5	Elektromagnetische Induktion	45
A.4.6	Selbstinduktion	48
A.4.7	Ein- und Ausschalten von Stromkreisen mit Induktivitäten	49
A.4.8	Energieinhalt des magnetischen Feldes	51
	Übungsaufgaben	51
A.5	Wechselstromkreise	52
A.5.1	Benennungen und Definitionen	52

A.5.2	Sinusförmige Ströme und Spannungen	55
A.5.3	Zeigerdiagramm	57
A.5.4	Widerstand, Spule und Kondensator bei sinusförmigem Wechselstrom	62
A.5.5	Wechselstromschaltungen von Widerstand, Spule und Kondensator . .	64
A.5.6	Blindleistungskompensation	73
A.5.7	Schwingkreise	75
A.5.8	Ortskurven	80
A.5.9	Transformator	81
	Übungsaufgaben	91
A.6	Drehstrom	92
A.6.1	Entstehung der Dreiphasenwechselspannung	92
A.6.2	Sternschaltung	94
A.6.3	Dreieckschaltung	98
	Übungsaufgaben	100
A.7	Leitungsphänomene	101
A.7.1	Elektrische Leitung in Metallen	101
A.7.2	Elektrische Leitung in Halbleitern	102
	Übungsaufgaben	107

B Elektrische Meßtechnik

B.1	Grundlagen	108
B.1.1	Definitionen und Begriffe	108
B.1.2	Einteilung elektrischer Meßgeräte	114
B.1.3	Übersicht über die Darstellung der Meßwerte	114
B.1.4	Meßfehler, Genauigkeit und Empfindlichkeit	116
B.2	Messung von Spannung und Strom	121
B.2.1	Gleichstromkreis	121
B.2.2	Wechselstromkreis	124
B.2.3	Zeitlich veränderliche Spannungen	126
B.3	Messung von Widerständen	127
B.3.1	Messung ohmscher Widerstände im Gleichstromkreis	127
B.3.2	Messung von Blind- und Scheinwiderständen im Wechselstromkreis . .	127
B.4	Arbeitsmessung	133
B.5	Leistungsmessung	134
B.6	Zeit- und Frequenzmessung	136
B.6.1	Elektronischer Zähler	136
B.6.2	Zeit- und Frequenzmessung	136

C Halbleitertechnik 139

C.1	Halbleiter	139
C.1.1	Vorsichtsmaßnahmen beim Umgang mit Halbleiterbauelementen . . .	140
C.2	Dioden	141

C.2.1	Schaltdioden	143
C.2.2	Gleichrichterioden	146
C.2.3	Netzgleichrichter	146
C.2.4	Schnelle Gleichrichterioden	148
C.2.4.1	Sperrerholzeit t_{rr}	148
C.2.4.2	Vorwärtserholzeit t_{fr}	149
C.2.5	Schottky-Leistungsioden	149
C.2.6	Z-Dioden	150
C.3	Transistoren	152
C.3.1	Arten von Transistoren und deren Aufbau	152
C.3.2	Beschaltung und Funktion des Transistors	154
C.3.3	Wichtige Kennwerte von Transistoren	155
C.3.3.1	Eingangswiderstand	155
C.3.3.2	Stromverstärkung	156
C.3.3.3	Ausgangsleitwert und Spannungsrückwirkung	158
C.3.3.4	Rauschen	158
C.3.4	Transistor-Grenzwerte	160
C.3.4.1	Sperrspannungen U_{max}	160
C.3.4.2	Ströme I_{max}	160
C.3.4.3	Temperaturen	160
C.3.4.4	Verlustleistung P_v	160
C.3.5	Typenschlüssel für Halbleiter	161
C.3.6	Analoge Grundschaltungen mit bipolaren Transistoren	161
C.3.6.1	Emitterschaltung	163
C.3.6.2	Emitterschaltung mit Stromgegenkopplung	166
C.3.6.3	Einstellung des Arbeitspunktes	167
C.3.7	Kollektorschaltung	168
C.3.8	Stromquelle	169
C.3.9	Differenzverstärker	169
C.3.10	Darlingtonschaltung	170
C.4	Feldeffekttransistoren (FET)	171
C.4.1	Sperrschicht-Feldeffekttransistor (JFET)	171
C.4.1.1	Kennlinien und Arbeitsbereiche des Feldeffekttransistors	173
C.4.1.2	Ohmscher Bereich	174
C.4.1.3	Triodenbereich	174
C.4.1.4	Abschnürbereich	174
C.4.1.5	Durchbruchbereich	175
C.4.2	MOS-Feldeffekttransistoren	175
C.4.2.1	Eingangswiderstand	177
C.4.2.2	Steilheit	177
C.4.2.3	Ausgangsleitwert	178
C.4.3	Weitere Kennwerte der Feldeffekttransistoren	178
C.4.3.1	Rauschen	178
C.4.3.2	Grenzfrequenz	178
C.4.3.3	Schaltzeiten	178
C.4.4	Grenzwerte der Feldeffekttransistoren	179
C.4.4.1	Ströme	179
C.4.4.2	Sperrspannungen	179
C.4.4.3	Temperaturen	179

C.4.4.4	Verlustleistung und erlaubter Arbeitsbereich	179
C.4.5	Schaltungstechnik mit Feldeffekttransistoren	180
C.4.5.1	Übergang vom bipolaren Transistor zum Feldeffekttransistor	180
C.4.5.2	Beispiele für die Anwendung von FET und MOSFET	181
C.4.5.3	Stabilisierung des Arbeitspunktes und der Verstärkung durch Gegenkopplung in analog arbeitenden Verstärkern	181
C.4.5.4	Steuerbare Spannungsteiler mit Feldeffekttransistoren	185
C.4.5.5	Feldeffekttransistoren als Schalter für analoge Signale	186
C.4.6	MOSFET-Leistungstransistoren für Schalter	186
C.4.6.1	Schwellspannung	187
C.4.6.2	Schaltzeit	187
C.4.6.3	Treiber	188
C.4.6.4	Gate-Source-Überspannungen	188
C.4.6.5	Maximaler Drain-Strom	188
C.4.6.6	Parallelschalten	189
C.4.6.7	Einschaltwiderstand $R_{DS(on)}$	189
C.4.6.8	Avalanche-Durchbruchspannung	189
C.5	Analoge integrierte Schaltungen	189
C.5.1	Herstellung und Technologie	189
C.5.2	Operationsverstärker	191
C.5.2.1	Idealer und realer Operationsverstärker	192
C.5.2.2	Schaltungstechnischer Aufbau	193
C.5.2.3	Operationsverstärker für höhere Anforderungen	193
C.5.2.4	Stabilitätsbetrachtung	193
C.5.3	Operationsverstärker mit statischer Beschaltung	195
C.5.3.1	Invertierender Spannungsverstärker	197
C.5.3.2	Nicht invertierender Spannungsverstärker	198
C.5.3.3	Subtrahierverstärker	199
C.5.3.4	Schmitt-Trigger	200
C.5.3.5	Addierender Verstärker, invertierend	202
C.5.3.6	Konstantstrom-Quellen	203
C.5.3.7	Idealer Einweggleichrichter	204
C.5.4	Operationsverstärker mit dynamischer Beschaltung	205
C.5.4.1	Integrator	205
C.5.5	Weitere wichtige integrierte Analogschaltungen	209
C.5.5.1	Komparatoren	209
C.5.5.2	Spannungsregler	211
C.5.5.3	Bandgap-Referenzelement	211
C.6	Thyristoren und Triacs	212
C.6.1	Thyristor	214
C.6.1.1	Statische Kennlinien	214
C.6.2	Triac	215
C.6.3	Abschaltthyristor (GTO)	216
C.6.4	Insulated Gate Bipolar Transistor (IGBT)	216
C.7	Optoelektronik	216
C.7.1	Halbleiter-Emitter	216
C.7.1.1	Strahlungsemission aus Halbleitern	216
C.7.1.2	Lumineszenzdiode	218

C.7.1.3	Halbleiter-Laser	222
C.7.2	Halbleiter-Detektoren	226
C.7.2.1	Strahlungsabsorption in Halbleitern	226
C.7.2.2	Fotodiode	226
C.7.2.3	Fototransistor	230
C.7.2.4	Fotothyristor	231
	Übungsaufgaben	231
C.7.3	Datenübertragung über Lichtwellenleiter	232
C.7.3.1	Optischer Sender	235
C.7.3.2	Optischer Empfänger	237
C.7.3.3	Übertragungsstrecke	238
C.7.3.4	Lichtleistungsbilanz (optical power budget)	242
C.7.3.5	Dynamikbereich	246
C.7.3.6	Übertragungsbandbreite	247
	Übungsaufgaben	250
C.8	Logikbausteine	252
C.8.1	Logische Verknüpfungen und Schaltzeichen	252
C.8.2	Logikfamilien	255
C.8.3	Bauformen und Gehäuse der Logikbauteile	262
	Übungsaufgaben	264
Literatur	265
D	Leistungselektronik	266
D.1	Bauelemente der Leistungselektronik	266
D.1.1	Passive Bauelemente	267
D.1.1.1	Induktivitäten	267
D.1.1.2	Stromtransformatoren	271
D.1.1.3	Kondensatoren	273
D.1.1.3.1	Selbstheilende Kondensatoren	278
D.1.1.3.2	Kondensator als Energiespeicher	279
D.1.1.3.2	Entstörkondensatoren	280
D.1.1.3.3	Anlaufkondensatoren	280
D.1.1.4	Hochleistungswiderstände	284
D.1.1.5	Hochleistungsdioden	285
D.1.1.6	Schutzelemente	285
D.1.2	Aktive Bauelemente	288
D.1.2.1	Darlingtonschaltung	288
D.1.2.2	Power MOS-FET	291
D.1.2.3	Smart Power ICs	291
D.1.2.4	IGBT	295
D.1.2.5	Thyristoren und artverwandte Bauelemente	296
D.1.2.5.1	Thyristor	297
D.1.2.5.2	GTO	301
D.1.2.5.3	SITAC	301
D.1.2.5.4	Triac	303
D.2	Leistungselektronik in der Praxis	304
D.2.1	Anwendung passiver Bauelemente	304
D.2.1.1	Netzfilter	304

D.2.1.2	Dreiphasen Netzfilter	305
D.2.2	Aktorsteuerung	307
D.2.2.1	Aktoransteuerung mit einem einfachen Leistungstransistor	308
D.2.2.2	Aktoransteuerung mit Smart Power ICs	309
D.2.2.3	Pulsweitenmodulation (PWM) für quasianaloge Ausgänge	310
D.2.3	Brückenschaltungen	313
D.2.3.1	Halbbrücke	313
D.2.3.2	Vollbrücke	314
D.2.3.3	Drehstrombrücke	316
D.2.3.4	Stromumrichter	317
D.2.4	Unterbrechungsfreie Stromversorgungen (USV)	319
D.2.4.1	Aufbau der USV	321
D.2.4.2	Störunterdrückung durch die USV	324
D.2.5	Spannungswandler	326
D.2.5.1	Prinzip der getakteten Stromversorgung	327
D.2.5.1.1	Steuerung durch Pulsbreitenmodulation	327
D.2.5.2	Durchflußwandler	330
D.2.5.2.1	Tiefsetzsteller	330
D.2.5.2.2	Eintakt-Flußwandler	332
D.2.5.3	Sperrwandler	333
D.2.6	Hochleistungslaser	335
D.2.6.1	Laserschneidtechnik	335
D.2.6.2	Leistungsverstärker für CO ₂ -Laser	336
Literatur		337

E Sensoren und Aktoren 338

E.1	Sensoren	338
E.1.1	Grundlagen	338
E.1.2	Weg- und Positions-Sensoren	340
E.1.2.1	Endschalter	341
E.1.2.1.1	Induktive Sensoren	342
E.1.2.1.2	Kapazitive Sensoren	345
E.1.2.1.3	Optische Sensoren	346
E.1.2.2	Wegmeßsysteme	348
E.1.2.2.1	Akustische Längenmessung	348
E.1.2.2.2	Hall Sensoren	349
E.1.2.2.3	Optische Meßverfahren	350
E.1.2.2.4	Hochauflösende Absolutgeber	355
E.2	Aktuatoren	364
E.2.1	Hydraulische Aktuatoren	365
E.2.1.1	Schaltventile	365
E.2.1.2	Proportionalventile	366
E.2.2	Pneumatische Aktoren	367
E.2.3	Piezo Steller	368
E.2.3.1	Piezoelektrische Translatoren	368
E.2.3.2	Hauptanwendungsgebiete, Eigenschaften und Ansteuerung	369
E.2.3.3	Piezoelektrische Kippspiegel	370
E.2.3.4	Hexapod, Mikropositioniersystem mit sechs Freiheitsgraden	370

E.2.3.5	Aktive Piezo-Schwingungsisolierung mit einem Hexapod	371
E.2.3.6	200 µm Piezo-Lineartisch	371
E.3	Eigenüberwachte Aktuatoren und Sensoren	372
E.4	Anschlußtechnik	372
E.4.1	Aktorstecker	372
E.4.2	Sensorstecker	374
E.4.3	Standardisierung der Steckerbelegung und die Vorteile	374
	Weiterführende Literatur	375
 Lösungen der Übungsaufgaben		 377
 Sachverzeichnis		 385