

**H. Linse/R. Fischer**

**Elektrotechnik  
für Maschinenbauer**

# **Elektrotechnik für Maschinenbauer**

Von Professor Dipl.-Ing. Hermann Linse  
Bearbeitet von Professor Dr.-Ing. Rolf Fischer  
Fachhochschule Esslingen  
Hochschule für Technik

10., überarbeitete Auflage  
Mit 413 Bildern



**Springer Fachmedien Wiesbaden GmbH**

Die Deutsche Bibliothek – CIP-Einheitsaufnahme  
Ein Titeldatensatz für diese Publikation ist bei  
Der Deutschen Bibliothek erhältlich.

10. Auflage September 2000

Alle Rechte vorbehalten  
© Springer Fachmedien Wiesbaden  
Originally published by B. G. Teubner GmbH, Stuttgart · Leipzig · Wiesbaden in 2000

Der Verlag Teubner ist ein Unternehmen der Fachverlagsgruppe BertelsmannSpringer.



Das Werk einschließlich aller seiner Teile ist urheberrechtlich geschützt. Jede Verwertung außerhalb der engen Grenzen des Urheberrechtsgesetzes ist ohne Zustimmung des Verlages unzulässig und strafbar. Das gilt insbesondere für Vervielfältigungen, Übersetzungen, Mikroverfilmungen und die Einspeicherung und Verarbeitung in elektronischen Systemen.

[www.teubner.de](http://www.teubner.de)

Gedruckt auf säurefreiem Papier  
Satz und Umschlaggestaltung: pp typo & grafik Peter Pfitz, Stuttgart

ISBN 978-3-519-26325-8      ISBN 978-3-322-92712-5 (eBook)  
DOI 10.1007/978-3-322-92712-5

## Vorwort

Das neue Format und die jetzt einheitliche Schriftart ohne Sperrungen einzelner Begriffe zeigen schon an, daß mit dieser 10. Auflage ein Neusatz des Buches vorliegt. Auch das geänderte Titelbild mit einem Beispiel modernster Antriebstechnik im Maschinenbau soll die Überarbeitung zeigen.

Die Entwicklung des Fachgebietes Elektrotechnik und die Vielzahl der zu berücksichtigenden neuen Entwicklungen machten eine Straffung des Inhalts unumgänglich. Diesem Zwang mußte leider der seitherige Abschnitt zur Energie- und Elektrizitätswirtschaft geopfert werden. Dabei wird von der Annahme ausgegangen, daß dieser Bereich im Vergleich mit den übrigen Themen des Inhalts am ehesten entbehrlich ist.

Das Buch gliedert sich jetzt in fünf Hauptabschnitte. Die Grundlagen der Elektrotechnik als Basis aller Anwendungsgebiete mit ihrer klassischen Gliederung wurden in einer Reihe von Teilgebieten wie Spannungsteiler, Erzeugung elektrischer Energie, Ersatzspannungsquelle, Influenz und andere vertieft oder abgerundet. Der Abschnitt Elektronik enthält jetzt auch das Teilgebiet Leistungselektronik, das seither der Steuerungstechnik angegliedert war. Auch hier wurden Teilbereiche vertieft.

Die Abschnitte 3 und 4 erfuhren die erforderliche Aktualisierung, die auch den Ersatz der bewährten Begriffe Nennleistung, Nennspannung usw. durch die Angaben Bemessungsleistung, Bemessungsspannung umfaßt. Weitgehend neugestaltet wurde im Abschnitt 5 der Teil Elektronische Steuerungen mit Aussagen zu den Themen SPS und Mikrocomputertechnik. Beides ist Inhalt ganzer Lehrbücher, so daß dem Leser hier nur ein fundierter erster Einblick in die Prinzipien dieser heute sehr bedeutenden Fachgebiete geboten werden kann.

Der Abschnitt 6 ist aus erwähnten Gründen auf die in DIN VDE 0100 festgelegten Schutzmaßnahmen in elektrischen Anlagen geschrumpft. Der Schutz vor gefährlichen Körperströmen ist von so grundlegender Bedeutung für den Einsatz jedweder Elektrotechnik, daß auf die einschlägigen Vorschriften nicht verzichtet werden kann.

Prof. Hermann Linse konnte an der Gestaltung dieser 10. Auflage seines Werkes nicht mehr mitwirken. Er ist Ende 1999 im Alter von 85 Jahren verstorben. Seine Schaffenskraft galt jahrzehntelang in Hochschule, Gremien und Verbänden dem Wohle der Ingenieurausbildung. Der Name Linse bleibt daher nicht nur im Titel dieses Buches unvergessen.

Der Verfasser dankt allen, die an der Gestaltung dieser neuen Auflage mitgewirkt haben. Möge auch diese 10. Auflage den Studenten der Ingenieurwissenschaften eine nützliche Hilfe sein, sowie dem Praktiker aus dem Gewerbe und der Industrie die immer wichtigere Weiterbildung erleichtern. Verlag und Autor sind auch künftig allen Lesern für Anregungen und auch Kritik sehr dankbar.

# Inhalt

## 1 Grundlagen der Elektrotechnik

1.1 Gleichstrom	13
1.1.1 Elektrische Größen und Grundgesetze	13
1.1.1.1 Physikalische Grundlagen	13
1.1.1.2 Stromkreis, Wirkungen des elektrischen Stromes	18
1.1.1.3 Elektrischer Widerstand	19
1.1.1.4 Kirchhoffsche Regeln	24
1.1.1.5 Zahlenbeispiele	27
1.1.2 Gleichstromkreise	28
1.1.2.1 Widerstandsschaltungen	28
1.1.2.2 Elektrische Spannungsquellen	32
1.1.2.3 Berechnung von Gleichstrom-Netzwerken	35
1.1.2.4 Messungen im elektrischen Stromkreis	39
1.1.2.5 Zahlenbeispiele	41
1.2 Elektrisches und magnetisches Feld	45
1.2.1 Elektrisches Feld	45
1.2.1.1 Größen des elektrischen Feldes, Kondensator	45
1.2.1.2 Influenz und Polarisierung	47
1.2.1.3 Schaltung von Kondensatoren	48
1.2.1.4 Ladung von Kondensatoren, Energie des elektrischen Feldes	49
1.2.1.5 Zahlenbeispiele	52
1.2.2 Magnetisches Feld	53
1.2.2.1 Wirkungen im magnetischen Feld	53
1.2.2.2 Magnetische Feldstärke	54
1.2.2.3 Magnetische Flußdichte (Induktion)	56
1.2.2.4 Magnetischer Fluß, Durchflutungsgesetz	58
1.2.2.5 Magnetische Hysterese, Energie des Magnetfeldes	60
1.2.2.6 Zahlenbeispiele	62
1.2.3 Kräfte und Spannungserzeugung im magnetischen Feld	64
1.2.3.1 Kräfte im Magnetfeld	64
1.2.3.2 Lenzsche Regel, Induktionsgesetz	66
1.2.3.3 Spannungserzeugung durch Selbstinduktion, Induktivität	68
1.2.3.4 Transformatorische und rotatorische Spannungserzeugung	70
1.2.3.5 Wirbelströme	72
1.2.3.6 Elektromagnetisches Feld	73
1.2.3.7 Zahlenbeispiele	75
1.3 Wechsel- und Drehstrom	77
1.3.1 Wechselgrößen und Grundgesetze	77
1.3.1.1 Sinusförmige Wechselgrößen (Sinusgrößen)	77
1.3.1.2 Belastungsarten im Wechselstromkreis	78
1.3.1.3 Darstellung von Wechselgrößen im Zeigerbild	82
1.3.1.4 Leistung, Leistungsfaktor, Arbeit	84

1.3.2	Wechselstromkreise	87
1.3.2.1	Kirchhoffsche Regeln bei Wechselstrom	87
1.3.2.2	Wechselstromschaltungen mit $R$ , $L$ und $C$	88
1.3.2.3	Schwingkreise	92
1.3.2.4	Komplexe Berechnung von Wechselstromschaltungen	95
1.3.2.5	Messungen bei Wechselstrom	100
1.3.2.6	Zahlenbeispiele	101
1.3.3	Drehstrom	106
1.3.3.1	Drehstromsysteme	106
1.3.3.2	Elektrische Größen bei Stern- und Dreieckschaltung	108
1.3.3.3	Messungen im Drehstromnetz	113
1.3.3.4	Zahlenbeispiele	114

## 2 Elektronik

2.1	Grundlagen und Bauelemente der Elektronik	119
2.1.1	Allgemeine elektrische Bauelemente	119
2.1.1.1	Widerstände	119
2.1.1.2	Spulen	120
2.1.1.3	Kondensatoren	121
2.1.2	Grundbegriffe der Halbleitertechnik	123
2.1.2.1	Trägerbewegung in Halbleitern	123
2.1.2.2	Störstellenleitfähigkeit	123
2.1.2.3	PN-Übergang	124
2.1.2.4	Eigenschaften des PN-Übergangs	125
2.1.3	Halbleiterbauelemente ohne Sperrschicht	126
2.1.3.1	Thermistoren	126
2.1.3.2	Varistoren	127
2.1.3.3	Fotowiderstände	128
2.1.3.4	Magnetfeldabhängige Bauelemente	129
2.1.3.5	Flüssigkristallzellen	130
2.1.4	Halbleiterbauelemente mit Sperrschichten	131
2.1.4.1	Dioden	131
2.1.4.2	Bipolare Transistoren	134
2.1.4.3	Feldeffekttransistoren	138
2.1.4.4	Optoelektronische Bauelemente	140
2.1.4.5	Thyristoren	140
2.1.5	Elektronen- und Gasentladungsröhren	144
2.1.5.1	Elektronenröhren	144
2.1.5.2	Gasentladungsröhren	147
2.1.6	Kühlung und Schutzmaßnahmen bei Halbleiterbauelementen	148
2.1.6.1	Verluste und Erwärmung	148
2.1.6.2	Kühlkörper	149
2.1.6.3	Schutzmaßnahmen für Halbleiter	150
2.2	Baugruppen der Elektronik	151
2.2.1	Gleichrichterschaltungen	151
2.2.1.1	Wechselstromschaltungen	151
2.2.1.2	Drehstromschaltungen	153
2.2.1.3	Glättungs- und Siebglieder	154
2.2.1.4	Netzteile	157

2.2.2	Spannungsumformung mit RC-Gliedern	158
2.2.2.1	Differenzierglied	158
2.2.2.2	Integrierglied	159
2.2.2.3	Weitwinkelphasenschieber	159
2.2.3	Verstärker	160
2.2.3.1	Transistorgrundschaltungen	160
2.2.3.2	Emitterschaltung	161
2.2.3.3	Mehrstufige Verstärker	163
2.2.3.4	Differenzverstärker	164
2.2.3.5	Steuerschaltungen mit Transistoren	165
2.2.4	Generator- und Kippschaltungen	166
2.2.4.1	Schalterbetrieb des Transistors	166
2.2.4.2	Kippschaltungen	168
2.2.4.3	Sinusgeneratoren	169
2.2.5	Integrierte Schaltungen	171
2.2.5.1	Aufbau elektronischer Schaltungen	171
2.2.5.2	Operationsverstärker	173
2.2.5.3	Beschaltung von Operationsverstärkern	175
2.2.5.4	Einsatz einer integrierten Schaltung	178
2.3	Leistungselektronik	180
2.3.1	Stromrichterschaltungen für Gleichstromantriebe	181
2.3.1.1	Netzgeführte Stromrichter	181
2.3.1.2	Gleichstromsteller	185
2.3.1.3	Zahlenbeispiele	186
2.3.2	Stromrichterschaltungen für Wechsel- und Drehstromantriebe	187
2.3.2.1	Wechsel- und Drehstromsteller	188
2.3.2.2	Untersynchrone Stromrichtererkaskade	189
2.3.2.3	Frequenzumrichter	190
2.3.3	Netzurückwirkungen von Stromrichteranlagen	191
2.3.3.1	Steuerblindleistung	191
2.3.3.2	Oberschwingungen	192
2.3.3.3	Störspannungen und EMV	194
2.3.3.4	Zahlenbeispiele	195

### 3 Elektrische Meßtechnik

3.1	Grundlagen der elektrischen Meßtechnik	197
3.1.1	Allgemeine Angaben	197
3.1.1.1	Meßwerterfassung	197
3.1.1.2	Betriebsdaten von Meßgeräten	198
3.1.1.3	Übersicht der wichtigsten Meßwerke	199
3.1.2	Einsatz elektrischer Meßgeräte	199
3.1.2.1	Strom- und spannungsrichtige Messung	199
3.1.2.2	Innenwiderstände von Meßgeräten	200
3.1.2.3	Meßbereichserweiterung	201
3.2	Elektrische Meßwerke und Meßgeräte	203
3.2.1	Elektrische Meßwerke	203
3.2.1.1	Elektronenstrahlröhren	203
3.2.1.2	Dreheisenmeßwerke	203
3.2.1.3	Drehspulmeßwerke	204

3.2.1.4	Elektrodynamische Meßwerke	206
3.2.1.5	Induktions-(Ferraris-)Meßwerk	207
3.2.2	Elektrische Meßgeräte	208
3.2.2.1	Widerstandsmeßgeräte	208
3.2.2.2	Zangenstrommesser	208
3.2.2.3	Vielfachinstrumente	209
3.2.2.4	Schreibende Meßgeräte	209
3.2.2.5	Oszilloskope	210
3.2.2.6	Meßwandler	212
3.3	Digital-Meßtechnik	213
3.3.1	Baugruppen digitaler Meßgeräte	213
3.3.1.1	Analog/Digital-Umsetzer	213
3.3.1.2	Codierung	214
3.3.1.3	Speicher- und Zähler-schaltungen	215
3.3.2	Digitale Meßgeräte	216
3.3.2.1	Zähler	216
3.3.2.2	Multimeter	217
3.3.2.3	Transientenspeicher	218
3.4	Elektrische Messung nichtelektrischer Größen	219
3.4.1	Meßwertaufnehmer für mechanische Beanspruchungen	220
3.4.1.1	Verfahren der Drehzahlmessung	220
3.4.1.2	Verfahren der Drehmomentbestimmung	221
3.4.1.3	Bestimmung von Kraft, Druck und Schwingungen	223
3.4.2	Meßwertaufnehmer für nichtmechanische Größen	225
3.4.2.1	Bestimmung der Beleuchtungsstärke	225
3.4.2.2	Bestimmung von Temperaturen	225
3.4.2.3	Zeitmessung	226
3.4.2.4	Bestimmung von Geräuschen	227
<b>4</b>	<b>Elektrische Maschinen</b>	
4.1	Gleichstrommaschinen	229
4.1.1	Aufbau und Wirkungsweise	229
4.1.1.1	Aufbau	229
4.1.1.2	Motor- und Generatorbetrieb	233
4.1.1.3	Leistungsbilanz	234
4.1.1.4	Anschlußbezeichnungen und Schaltungen	235
4.1.2	Betriebsverhalten und Drehzahlsteuerung	236
4.1.2.1	Gleichstromgeneratoren	236
4.1.2.2	Gleichstrommotoren mit Fremderregung	237
4.1.2.3	Verfahren der Drehzahlsteuerung	239
4.1.2.4	Gleichstrom-Reihenschlußmotoren	244
4.1.2.5	Zahlenbeispiele	245
4.2	Transformatoren	248
4.2.1	Wechselstromtransformatoren	248
4.2.1.1	Aufbau	248
4.2.1.2	Kenngrößen und Ersatzschaltbild	249
4.2.1.3	Betriebsverhalten	251
4.2.1.4	Sondertransformatoren	254
4.2.1.5	Zahlenbeispiele	255



4.2.2	Drehstromtransformatoren	257
4.2.2.1	Bauart und Schaltung	257
4.2.2.2	Kenngrößen und Betriebsverhalten	259
4.2.2.3	Zahlenbeispiele	261
4.3	Drehstrom-Asynchronmaschinen	262
4.3.1	Aufbau und Wirkungsweise	262
4.3.1.1	Ständer und Drehstromwicklung	262
4.3.1.2	Läufer	265
4.3.1.3	Asynchrones Drehmoment	266
4.3.1.4	Linearmotoren	267
4.3.2	Betriebsverhalten und Drehzahlsteuerung	268
4.3.2.1	Kennlinien und Kenngrößen	268
4.3.2.2	Anlassen	274
4.3.2.3	Drehzahlsteuerung	277
4.3.2.4	Zahlenbeispiele	279
4.4	Drehstrom-Synchronmaschinen	282
4.4.1	Aufbau und Wirkungsweise	282
4.4.1.1	Ständer und Läufer	282
4.4.1.2	Kennlinien und Ersatzschaltung	283
4.4.2	Betriebsverhalten im Netzbetrieb	285
4.4.2.1	Synchronisation	285
4.4.2.2	Wirk- und Blindlaststeuerung	286
4.4.2.3	Drehzahlsteuerung	288
4.4.2.4	Positionierantriebe	288
4.5	Wechselstrommotoren	290
4.5.1	Universalmotoren	290
4.5.1.1	Schaltung und Einsatz	290
4.5.1.2	Betriebsverhalten	291
4.5.2	Wechselstrommotoren mit Hilfswicklung	291
4.5.2.1	Spaltpolmotoren	291
4.5.2.2	Kondensatormotoren	292
4.5.3	Schrittmotoren	293
4.5.3.1	Aufbau und Wirkungsweise	293
4.5.3.2	Betriebsdaten	295
<b>5</b>	<b>Elektrische Antriebe und Steuerungen</b>	
5.1	Standardisierung und Normvorschriften	296
5.1.1	Äußere Gestaltung	296
5.1.1.1	Baugrößen	296
5.1.1.2	Bauformen	297
5.1.1.3	Schutzarten	297
5.1.2	Betriebsbedingungen	298
5.1.2.1	Betriebsarten	298
5.1.2.2	Leistungsschild	299
5.1.2.3	Prüfung elektrischer Maschinen	300
5.2	Planung und Berechnung von Antrieben	301
5.2.1	Stationärer Betrieb	301
5.2.1.1	Momentengleichung des elektrischen Antriebs	301
5.2.1.2	Betriebskennlinien von Elektromotoren	303

5.2.1.3	Betriebskennlinien von Arbeitsmaschinen . . . . .	304
5.2.1.4	Schwungmassen von Motor und Arbeitsmaschine . . . . .	308
5.2.2	Dynamik des Antriebs . . . . .	310
5.2.2.1	Anlauf . . . . .	310
5.2.2.2	Bremsen . . . . .	312
5.2.2.3	Umsteuern . . . . .	316
5.2.3	Bemessung des Motors . . . . .	317
5.2.3.1	Zulässiges Motormoment . . . . .	317
5.2.3.2	Berechnung der Erwärmung . . . . .	317
5.2.3.3	Zahlenbeispiele . . . . .	321
5.3	Steuerungstechnik . . . . .	325
5.3.1	Schaltgeräte und Kontaktsteuerungen . . . . .	325
5.3.1.1	Schalter, Schütze und Sicherungen . . . . .	325
5.3.1.2	Schaltpläne . . . . .	328
5.3.1.3	Festverdrahtete Steuerungen . . . . .	330
5.3.2	Grundlagen elektronischer Steuerungen . . . . .	332
5.3.2.1	Logische Grundverknüpfungen . . . . .	332
5.3.2.2	Kombinationen der Grundverknüpfungen . . . . .	334
5.3.2.3	Speicherschaltungen . . . . .	334
5.3.2.4	Schaltungstechnik . . . . .	336
5.3.3	Grundlagen speicherprogrammierbarer Steuerungen . . . . .	337
5.3.3.1	Aufbau einer SPS . . . . .	338
5.3.3.2	Einführung in die Programmierertechnik . . . . .	339
5.3.3.3	Drehrichtungsumkehr eines Motors mit SPS . . . . .	343
5.3.3.4	Feldbussysteme . . . . .	345
5.4	Mikrocomputertechnik . . . . .	346
5.4.1	Informationsdarstellung und Speicherarten . . . . .	346
5.4.1.1	Informationseinheiten und Zahlensysteme . . . . .	346
5.4.1.2	Klassifizierung von Halbleiterspeichern . . . . .	348
5.4.1.3	Aufbau eines Mikrocomputers . . . . .	349
5.4.2	Mikroprozessoren . . . . .	350
5.4.2.1	Struktur eines Mikroprozessors . . . . .	350
5.4.2.2	Ausführung von Mikroprozessoren . . . . .	351
5.4.2.3	Programmierung eines Mikroprozessors . . . . .	352
<b>6</b>	<b>Schutzmaßnahmen in elektrischen Anlagen</b>	
6.1	Allgemeine Grundsätze . . . . .	355
6.2	Schutzmaßnahmen gegen gefährliche Körperströme . . . . .	356
6.3	Betrieb von Starkstromanlagen, Unfallverhütungsvorschriften . . . . .	360
	<b>Physikalische Größen, Gesetzliche Einheiten, Schreibweise von Gleichungen . . .</b>	<b>362</b>
	<b>Formelzeichen . . . . .</b>	<b>365</b>
	<b>Literatur . . . . .</b>	<b>367</b>
	<b>Sachverzeichnis . . . . .</b>	<b>368</b>