

**Ekbert Hering · Rolf Martin · Jürgen Gutekunst ·  
Joachim Kempkes  
(Hrsg.)**

# **Elektrotechnik und Elektronik für Maschinenbauer**

**4., aktualisierte und verbesserte Auflage**

## **Inhaltsverzeichnis**

<b>A</b>	<b>Grundlagen der Elektrotechnik</b>	1
A.1	Physikalische Grundgesetze und Definitionen	1
A.1.1	Ladung	1
A.1.2	Spannung	2
A.1.3	Strom	3
A.1.4	Ohm'sches Gesetz	4
A.1.5	Widerstand	5
A.1.6	Arbeit und Leistung	6
A.1.7	Kirchhoff'sche Regeln	7
A.2	Gleichstromkreise mit linearen Komponenten	10
A.2.1	Zweipolquellen	10
A.2.2	Reihenschaltung von Widerständen	14
A.2.3	Parallelschaltung von Widerständen	15
A.2.4	Gemischte Schaltungen	16
A.2.5	Messung elektrischer Größen	25
A.3	Elektrisches Feld	30
A.3.1	Feldbegriff	30
A.3.2	Kondensator	31
A.3.3	Laden und Entladen von Kondensatoren	34
A.3.4	Energieinhalt des elektrischen Feldes	34
A.4	Magnetisches Feld	37
A.4.1	Feldbegriff	37
A.4.2	Kraftwirkungen im Magnetfeld	41
A.4.3	Materie im Magnetfeld	44
A.4.4	Magnetischer Kreis	47
A.4.5	Elektromagnetische Induktion	55
A.4.6	Selbstinduktion	61
A.4.7	Gegeninduktion	63
A.4.8	Ein- und Ausschalten von Stromkreisen mit Induktivitäten	64
A.4.9	Energieinhalt des magnetischen Feldes	66
A.5	Wechselstromkreise	68
A.5.1	Benennungen und Definitionen	68
A.5.2	Sinusförmige Ströme und Spannungen	71
A.5.3	Zeigerdiagramm	74

<b>A.5.4</b>	<b>Widerstand, Spule und Kondensator bei sinusförmigem Wechselstrom . . . . .</b>	<b>80</b>
<b>A.5.5</b>	<b>Wechselstromschaltungen von Widerstand, Spule und Kondensator . . . . .</b>	<b>83</b>
<b>A.5.6</b>	<b>Blindstromkompensation . . . . .</b>	<b>92</b>
<b>A.5.7</b>	<b>Schwingkreise . . . . .</b>	<b>95</b>
<b>A.5.8</b>	<b>Ortskurven . . . . .</b>	<b>102</b>
<b>A.5.9</b>	<b>Transformator . . . . .</b>	<b>104</b>
<b>A.6</b>	<b>Drehstrom . . . . .</b>	<b>118</b>
<b>A.6.1</b>	<b>Entstehung der Dreiphasenwechselspannung . . . . .</b>	<b>118</b>
<b>A.6.2</b>	<b>Generatorschaltungen . . . . .</b>	<b>119</b>
<b>A.6.3</b>	<b>Verbraucher-Sternschaltung . . . . .</b>	<b>121</b>
<b>A.6.4</b>	<b>Verbraucher-Dreieckschaltung . . . . .</b>	<b>127</b>
<b>A.6.5</b>	<b>Stern-Dreieck-Umschaltung . . . . .</b>	<b>130</b>
<b>A.6.6</b>	<b>Leistungsmessung . . . . .</b>	<b>132</b>
<b>Literatur</b>	<b>  . . . . .</b>	<b>135</b>
<b>B</b>	<b>Halbleitertechnik . . . . .</b>	<b>137</b>
<b>B.1</b>	<b>Bauelemente . . . . .</b>	<b>137</b>
<b>B.1.1</b>	<b>Leitungsmechanismen . . . . .</b>	<b>137</b>
<b>B.1.2</b>	<b>Dioden . . . . .</b>	<b>146</b>
<b>B.1.3</b>	<b>Transistoren . . . . .</b>	<b>155</b>
<b>B.1.4</b>	<b>Feldeffekttransistoren (FET) . . . . .</b>	<b>164</b>
<b>B.1.5</b>	<b>Thyristoren und Triacs . . . . .</b>	<b>177</b>
<b>B.1.6</b>	<b>Optoelektronik . . . . .</b>	<b>181</b>
<b>B.2</b>	<b>Analoge integrierte Schaltungen . . . . .</b>	<b>202</b>
<b>B.2.1</b>	<b>Operationsverstärker . . . . .</b>	<b>202</b>
<b>B.2.2</b>	<b>Weitere analoge integrierte Schaltungen . . . . .</b>	<b>206</b>
<b>B.2.3</b>	<b>DA- und AD-Wandler . . . . .</b>	<b>209</b>
<b>B.3</b>	<b>Digitale integrierte Schaltungen . . . . .</b>	<b>219</b>
<b>B.3.1</b>	<b>Logische Verknüpfungen und Schaltzeichen . . . . .</b>	<b>220</b>
<b>B.3.2</b>	<b>Logikfamilien . . . . .</b>	<b>224</b>
<b>Literatur</b>	<b>  . . . . .</b>	<b>229</b>
<b>C</b>	<b>Leistungselektronik . . . . .</b>	<b>231</b>
<b>C.1</b>	<b>Bauelemente der Leistungselektronik . . . . .</b>	<b>231</b>
<b>C.1.1</b>	<b>Passive Bauelemente . . . . .</b>	<b>232</b>
<b>C.1.2</b>	<b>Aktive Bauelemente . . . . .</b>	<b>253</b>
<b>C.2</b>	<b>Leistungselektronik in der Praxis . . . . .</b>	<b>265</b>
<b>C.2.1</b>	<b>Anwendung passiver Bauelemente . . . . .</b>	<b>265</b>
<b>C.2.2</b>	<b>Aktorsteuerung . . . . .</b>	<b>269</b>
<b>C.2.3</b>	<b>Brückenschaltungen . . . . .</b>	<b>275</b>
<b>C.2.4</b>	<b>Unterbrechungsfreie Stromversorgungen (USV) . . . . .</b>	<b>282</b>
<b>C.2.5</b>	<b>Spannungswandler . . . . .</b>	<b>288</b>
<b>Literatur</b>	<b>  . . . . .</b>	<b>300</b>

<b>D Elektrische Maschinen . . . . .</b>	301
D.1 Wirkungsprinzipien elektromechanischer Energiewandler . . . . .	301
D.1.1 Elektrodynamisches Prinzip . . . . .	301
D.1.2 Kräfte auf Grenzflächen . . . . .	302
D.1.3 Prinzipieller Aufbau rotierender elektrischer Maschinen . . . . .	303
D.2 Leistungsbilanz . . . . .	306
D.3 Ausführungsvarianten . . . . .	307
D.4 Ausnutzung und Baugröße . . . . .	312
D.5 Gleichstrommotor . . . . .	314
D.5.1 Prinzipieller Aufbau . . . . .	315
D.5.2 Aufbau des Ankers . . . . .	316
D.5.3 Kommutierung . . . . .	318
D.5.4 Induzierte Spannung und Drehmoment . . . . .	320
D.5.5 Betriebsverhalten . . . . .	323
D.5.6 Reihenschlussmaschine/Universalmotor . . . . .	327
D.5.7 Drehzahlverstellung des Universalmotors . . . . .	329
D.5.8 Typische Daten von Gleichstrommaschinen . . . . .	330
D.6 Synchronmotor . . . . .	333
D.6.1 Synchronmotor als elektronisch kommutierter Gleichstrommotor	334
D.6.2 Wechselfelder und Drehfelder . . . . .	339
D.6.3 Drehfeldwicklungen . . . . .	342
D.6.4 Ersatzschaltbild und Zeigerdiagramm . . . . .	345
D.6.5 Drehmoment der Vollpolmaschine . . . . .	347
D.6.6 Permanent erregter Synchroservomotor . . . . .	349
D.6.7 Synchronmotoren mit Zahnpulsenwicklung . . . . .	353
D.6.8 Reluktanzmotor . . . . .	354
D.6.9 Schrittmotoren . . . . .	356
D.6.10 Klauenpolgenerator („Lichtmaschine“) . . . . .	358
D.7 Asynchronmotor . . . . .	360
D.7.1 Bedeutung der Asynchronmaschine . . . . .	360
D.7.2 Aufbau und Ersatzschaltbild . . . . .	360
D.7.3 Stromortskurve der Asynchronmaschine . . . . .	365
D.7.4 Drehmoment und Kloss'sche Formel . . . . .	368
D.7.5 Drehzahlverstellung der Asynchronmaschine . . . . .	370
D.7.6 Einphasen-Asynchronmotor . . . . .	374
Literatur . . . . .	377
<b>E Antriebstechnik . . . . .</b>	379
E.1 Prozessbeeinflussung durch elektrische Antriebe . . . . .	379
E.2 System „Arbeitsmaschine – Antriebsmaschine“ . . . . .	380
E.3 Betriebsarten . . . . .	381
E.4 Bauformen, Schutzarten, Kühlung, Isolation . . . . .	383
E.4.1 Bauformen . . . . .	383
E.4.2 Schutzarten . . . . .	383
E.4.3 Wärmeklassen und Kühlung . . . . .	385

E.5	Wirkungsgradklassen . . . . .	388
E.6	Optimale Getriebeübersetzung . . . . .	389
E.6.1	Optimale Getriebeübersetzung ohne Drehzahl-Begrenzung . . . . .	390
E.6.2	Optimale Getriebeübersetzung mit begrenzter Lastdrehzahl . . . . .	392
E.6.3	Optimale Getriebeübersetzung mit begrenzter Motordrehzahl . . . . .	394
E.7	Servoantriebe . . . . .	394
E.7.1	Struktur und Komponenten eines Servoantriebs . . . . .	396
E.7.2	Anforderungen . . . . .	397
E.7.3	Sensoren . . . . .	398
E.8	Aktorsysteme für Massenströme (Stellantriebe) . . . . .	401
E.9	Generatorkonzepte für Windkraftanlagen . . . . .	407
E.9.1	Grundlagen . . . . .	407
E.9.2	Polumschaltbare Asynchrongeneratoren . . . . .	409
E.9.3	Doppelt-gespeister Asynchrongenerator . . . . .	410
E.9.4	Synchrongenerator . . . . .	413
E.10	Elektrische Fahrzeugantriebe . . . . .	414
Literatur	.....	417
<b>F</b>	<b>Elektrische Energieversorgung</b> . . . . .	419
F.1	Energieerzeugung . . . . .	420
F.1.1	Primärenergie . . . . .	420
F.1.2	Belastungskurven . . . . .	421
F.1.3	Kraftwerke . . . . .	423
F.2	Energieübertragung . . . . .	431
F.2.1	Übertragungssysteme . . . . .	431
F.2.2	Drehstromnetze . . . . .	432
F.2.3	Gleichspannungsnetze . . . . .	433
F.2.4	Netzstrukturen . . . . .	436
F.2.5	Verbundbetrieb . . . . .	437
F.3	Schutzmaßnahmen . . . . .	438
F.4	Niederspannungsschaltanlagen . . . . .	442
Literatur	.....	445
<b>G</b>	<b>Sensoren und Aktoren</b> . . . . .	447
G.1	Sensoren . . . . .	447
G.1.1	Grundlagen . . . . .	447
G.1.2	Weg- und Positions-Sensoren . . . . .	449
G.2	Aktoren . . . . .	474
G.2.1	Hydraulische Aktoren . . . . .	474
G.2.2	Pneumatische Aktoren . . . . .	476
G.2.3	Piezo-Steller . . . . .	477
G.3	Anschlusstechnik . . . . .	480
G.3.1	Aktorstecker . . . . .	480
G.3.2	Sensorstecker . . . . .	482
G.3.3	Standardisierung der Steckerbelegung und die Vorteile . . . . .	482
Literatur	.....	482

<b>H Feldbusse</b>	483
H.1 Grundlagen zu Feldbussen	486
H.1.1 Topologie von Feldbussen	486
H.1.2 Allgemeine Anforderungen an Feldbussysteme	487
H.2 Standard-Feldbusse	488
H.2.1 Profibus	490
H.2.2 CAN-Bus/DeviceNet	494
H.2.3 AS-Interface	500
H.2.4 Interbus-S	502
H.2.5 CC-Link	505
H.3 Ethernet basierende Feldbusse	506
H.3.1 Grundlegendes zur Ethernet-Kommunikation	508
H.3.2 TCP/IP	515
H.3.3 ProfiNet	516
H.3.4 Ethernet/IP	519
H.4 IO-Link	521
Literatur	526
<b>I Elektrische Messtechnik</b>	527
I.1 Grundlagen	527
I.1.1 Definitionen und Begriffe	527
I.1.2 Einteilung elektrischer Messgeräte	532
I.1.3 Übersicht über die Darstellung der Messwerte	533
I.1.4 Messfehler, Genauigkeit und Empfindlichkeit	534
I.2 Messung von Spannung und Strom	539
I.2.1 Gleichstromkreis	539
I.2.2 Wechselstromkreis	541
I.2.3 Zeitlich veränderliche Spannungen	544
I.3 Messung von Widerständen	545
I.3.1 Messung Ohm'scher Widerstände im Gleichstromkreis	545
I.3.2 Messung von Blind- und Scheinwiderständen im Wechselstromkreis	547
I.4 Arbeitsmessung	549
I.5 Leistungsmessung	550
I.6 Zeit- und Frequenzmessung	552
I.6.1 Elektronischer Zähler	552
I.6.2 Zeit- und Frequenzmessung	553
Literatur	555
<b>Lösungen der Übungsaufgaben</b>	557
<b>Sachverzeichnis</b>	575