

Einführung in die Elektrotechnik - Elektronik

Prof. Dr. sc. techn. Horst Elschner

Prof. Dr.-Ing. habil. Albrecht Möschwitzer

3., bearbeitete Auflage

Verlag Technik GmbH Berlin • München

Inhaltsverzeichnis

Die wichtigsten Formelzeichen	.016
1. Grundbegriffe elektrischer Schaltungen	.019
1.1. Physikalische Größen und Maßeinheiten	.019
1.1.1. Maßeinheiten	.019
1.1.2. Größengleichungen	.020
1.1.3. Schreibweise der verwendeten elektrotechnischen Größen	.021
1.2. Elektrische Ladung	.021
1.2.1. Grundlagen	.021
1.2.2. Kräfte zwischen Ladungen	.022
1.2.3. Kraft und elektrische Feldstärke	.024
1.3. Elektrischer Strom	.025
1.3.1. Wirkungen des elektrischen Stromes	.025
1.3.2. Elektrische Stromstärke	.026
1.3.3. Leiter, Halbleiter und Nichtleiter	.028
1.3.4. Erstes Kirchhoffsches Gesetz (Knotensatz)	.030
1.3.5. Anwendung des ersten Kirchhoffschen Gesetzes auf Bauelemente bzw. Netzwerke	.031
1.4. Elektrisches Potential und Spannung	.033
1.4.1. Definition von Potential und Spannung	.033
1.4.2. Zweites Kirchhoffsches Gesetz (Maschensatz)	.038
1.5. Ideale Spannungs- bzw. Stromquellen	.039
1.6. Widerstand	.040
1.6.1. Definition des Widerstandes	.040
1.6.2. Ohmsche Widerstände	.041
1.6.2.1. Grundlagen	.041
1.6.2.2. Bauformen ohmscher Widerstände	.043
1.6.2.3. Temperaturabhängigkeit ohmscher Widerstände	.044
1.6.3. Nichtlineare Widerstände	.045
1.7. Kondensator	.047
1.7.1. Grundlagen	.047
1.7.2. Bauformen von Kondensatoren	.049
1.8. Spule	.051
1.8.1. Induktionsgesetz und Maschensatz	.051
1.8.2. Induktivität	.054
1.9. Ersatzschaltbilder aktiver Bauelemente	.057
1.9.1. Spannungs- und Stromquellenersatzschaltbilder aktiver Zweipole	.057
1.9.2. Ersatzschaltbilder mit gesteuerten Quellen	.059
1.10. Schaltungsberechnung mit den Kirchhoffschen Gesetzen	.060

1.10.1.	Reihen-und Parallelschaltung gleichartiger Bauelemente	.061
1.10.2.	Überblick über Verfahren der Schaltungsberechnung	.062
1.11.	Leistung und Energie	.067
1.11.1.	Energieerhaltungssatz in Schaltungen	.067
1.11.2.	Leistung und Energie bei Bauelementen	.068
2.	Resistive Schaltungen	.074
2.1.	Grundstromkreis	.074
2.2.	Spannungsteilung mit linearen Widerständen	.077
2.3.	Stromteilung mit linearen Widerständen	.079
2.4.	Überlagerungssatz	.080
2.5.	Zweipol-Ersatzschaltungen	.081
2.5.1.	Zweipol-Ersatzschaltungen linearer Widerstände	.081
2.5.2.	Ersatzschaltungen für lineare aktive Zweipole	.083
2.5.2.1.	Reihen-und Parallelschaltung von Spannungsquellen	.083
2.5.2.2.	Satz von Helmholtz	.083
2.6.	Lösungsverfahren für Schaltungen mit nichtlinearen Bauelementen	.086
3.	Wechselstromschaltungen	.089
3.1.	Grundbegriffe sinusförmiger Zeitfunktionen	.089
3.2.	Wechselstromverhalten linearer Bauelemente	.091
3.3.	Wechselstromverhalten von ÄZ,C-Schaltungen - ein Überblick	.094
3.3.1.	Addition sinusförmiger Zeitfunktionen gleicher Frequenz und einige Schlußfolgerungen	.094
3.3.2.	Differentialgleichungen als Berechnungsgrundlage	.096
3.4.	Berechnung von Wechselstromschaltungen im stationären Zustand	.097
3.4.1.	Eigenschaften komplexer Größen	.097
3.4.1.1.	Darstellung komplexer Zahlen	.098
3.4.1.2.	Rechenoperationen bei komplexen Zahlen bzw. Größen	.099
3.4.2.	Netzwerkanalyse mittels komplexer Rechnung	.100
3.4.2.1.*	Funktionaltransformation	.100
3.4.2.2.*	Komplexe Dgln. bzw. Integro-Dgln.	.102
3.4.2.3.	Einführung des komplexen Widerstandes	.103
3.4.2.4.	Netzwerkberechnung mit komplexen Knoten- und Maschengleichungen sowie Strom-Spannungs-Relationen	.106
3.4.2.5.	Netzwerkberechnung mit vereinfachten Methoden	.109
3.5.	Zeigerbilder und Ortskurven	.112
3.5.1.	Grundregeln für Zeigerbilder	.112
3.5.2.*	Inversion von Zeigern	.114
3.5.3.	Ortskurven und ihre Inversion	.115
3.6.	Leistung und Arbeit	.115
3.6.1.	Grundlagen	.115
3.6.2.	Leistung bei R , L und C	.118
3.6.3.	Wirk- und Blindspannungen bzw. -ströme	.118
3.7.	Spezielle Wechselstromschaltungen	.120

3.7.1.	Schaltungen mit Tief- bzw. Hochpaßverhalten	120
3.7.2.	Resonanzkreise (Bandpässe bzw. -sperren)	122
3.7.3.	Frequenzunabhängiger Spannungsteiler	125
3.7.4.	Wechselstrom-Brückenschaltungen	126
3.8.*	Kleinsignalverhalten von Schaltungen	127
3.9.	Vierpole	128
3.9.1.	Widerstands-, Leitwert- und Hybridparameter	128
3.9.2.	Vierpolarten	131
3.9.3.*	Wellenparameter	131
3.9.4.	Vierpol-Ersatzschaltungen	133
3.10.	Dreiphasen-Wechselstrom (Drehstrom)	133
3.10.1.	Einführung	133
3.10.2.	Netze mit Sternschaltung des Generators	134
3.10.3.	Netze mit Dreieckschaltung des Generators	137
3.10.4.	Leistung in Dreiphasen-Systemen	138
3.10.5.	Einige Beispiele zum Drehstrom-Vierleiternetz	139
3.11.	Schaltungen bei mehrwelliger Erregung	141
3.11.1.	Analyse linearer Netzwerke bei mehrwelliger Erregung	141
3.11.2.	Fourierreihendarstellung periodischer Zeitfunktionen	142
3.11.3.	Kenngrößen nichtsinusförmiger periodischer Zeitfunktionen	145
4.	Schaltungen bei beliebiger Erregung	148
4.1.	Schaltvorgänge	148
4.1.1.	Schaltverhalten von R , L und C	148
4.1.2.	Schaltvorgänge in linearen Schaltungen	149
4.1.2.1.	Netzwerke mit einem Energiespeicher bei konstanter Erregungsfunktion	149
4.1.2.2.*	Netzwerke mit einem Energiespeicher bei beliebiger Erregungsfunktion	155
4.1.2.3.	Netzwerke mit zwei Energiespeichern	157
4.2.*	Übertragungsfunktion eines linearen Systems	160
4.2.1.	Grundlagen	160
4.2.2.	Übertragungsfunktion linearer elektrischer Netzwerke	162
4.3.	Analyse des dynamischen Verhaltens nichtlinearer Schaltungen	164
4.4.	Übersicht über die Schaltungsberechnung	165
5.	Analogien zwischen elektrischen und nichtelektrischen Systemen	166
5.1.	Einführung	166
5.2.	Thermisch-elektrische Analogien	166
5.2.1.	Thermische Knoten- und Maschengleichungen	166
5.2.2.	Thermische Widerstände	168
5.2.3.	Übersicht und Beispiele	171
5.3.	Mechanisch-elektrische Analogien	173
5.3.1.	Mechanisch-translatorische Systeme	173
5.3.2.	Mechanisch-rotatorische Systeme	176
5.4.	Weitere Analogien	176

6. Elektrische Felder und Stromflußmechanismen	178
6.1. Grundgleichungen elektromagnetischer Felder	178
6.2. Kontinuitätsgleichung für den Stromfluß	180
6.3. Elektrische Feldgrößen an Grenzflächen	182
6.4. Einteilung von Feldtypen	183
6.5. Elektrische Spannung und Potential	184
6.6. Elektrostatische Felder	185
6.6.1. Feldberechnung bei vorgegebener Ladungsverteilung	185
6.6.2. Grenzfläche Leiter-Nichtleiter	186
6.6.3. Kapazitätsberechnung	187
6.7. Spezielle stationäre Strömungsfelder	188
6.7.1. Strömungsfeld	188
6.7.2. Widerstandsberechnung	189
6.7.3. Analogie zwischen elektrostatischem Feld und Strömungsfeld	189
6.8. Energie und Kraft im elektrischen Feld	190
6.8.1. Energiedichte und Energie	190
6.8.2. Kraft auf Ladungen	190
6.8.3. Kraft an Grenzflächen Dielektrikum-Leiter	193
6.8.4. Kraft an der Grenzfläche zweier Dielektrika	194
6.8.5.* Kraft auf elektrische Dipole	195
6.9. Elektrische Polarisation	195
6.10. Allgemeines zum Stromfluß	196
6.11. Stromfluß in Halbleitern	197
6.11.1. Energetische Verteilung der Ladungsträger in Eigen- und Störstellenhalbleitern	197
6.11.2. Feldstrom	200
6.11.3. Feld- und Diffusionsstrom	200
6.11.4.* Konvektions- und Verschiebungsstrom	201
6.11.5. Eindimensionale Kontinuitätsgleichungen	201
6.11.6. Eindimensionale phänomenologische Grundgleichungen	202
6.12. Stromfluß in Metallen	203
6.13. Stromfluß in isolierenden Festkörpern	203
6.14. Stromfluß in ionisierten Gasen	204
6.15. Stromfluß im Vakuum	205
6.16. Stromfluß in Flüssigkeiten - elektrochemische Prozesse	206
6.16.1. Grundlagen	206
6.16.1.1. Mechanismus der Stromleitung	206
6.16.1.2. Spannungen zwischen Elektroden und Elektrolyt	208
6.16.1.3. Stofftransport	209
6.16.2. Überblick über technische Anwendungen mit Elektroenergieverbrauch	210
6.16.3. Elektrochemische Spannungsquellen	211
6.16.4. Korrosion und Korrosionsschutz	213

7.	Magnetische und elektromagnetische Felder .	215
7.1.	Grundlagen der Berechnung magnetischer Feldgrößen.	215
7.2.	Magnetischer Fluß und Spannungsabfall.	218
7.3.	Magnetische Eigenschaften von Materialien.	222
7.4.	Grafische Analyse ferromagnetischer Kreise.	224
7.5.*	Bewegte Koordinatensysteme.	225
7.6.	Lorentzkraft.	225
7.7.	Induktionsgesetz sowie technische Anwendungen.	226
7.7.1.	Grundlagen.	226
7.7.2.	Induktion von Wirbelströmen in massivem Leitermaterial.	228
7.7.3.	Einführung in die Spannungsinduktion in elektrischen Generatoren.	229
7.7.4.	Selbst-und Gegeninduktion.	231
7.7.5.	Transformator.	234
7.7.5.1.	Idealer Transformator.	234
7.7.5.2.	Verhalten technischer Transformatoren.	235
7.7.5.3.	Anwendungen und Bauformen von Transformatoren.	236
7.7.6.	Weitere Anwendungen des Induktionsgesetzes.	238
7.8.	Energiedichte und Energie des magnetischen Feldes.	239
7.9.	Kräfte in magnetischen Feldern.	241
7.9.1.	Kraft auf bewegte Ladungen.	241
7.9.2.	Kraft auf Ströme bzw. stromdurchflossene Leiter.	242
7.9.2.1.	Grundlagen.	242
7.9.2.2.	Anwendungen des elektrodynamischen Kraftgesetzes.	245
7.9.3.	Kraft an Grenzflächen zwischen Stoffen unterschiedlicher Permeabilität.	249
7.9.3.1.	Grundlagen.	249
7.9.3.2.	Anwendungen ungepolter Kraftwirkungen.	250
7.9.3.3.	Anwendungen gepolter Kraftwirkungen (Vormagnetisierung).	251
7.9.4.*	Kraft auf magnetische Dipole.	252
7.10.*	Maxwellsche Gleichungen in Differentialform.	253
7.11.	Feld- und Stromverdrängung bei schnellen Stromänderungen in massiven Leitern (Skinneffekt).	255
7.12.	Wellenausbreitung.	256
8.	Bauelemente und einfache Schaltungen der Elektronik.	261
8.1.	Widerstände.	261
8.1.1.	Lineare Widerstände.	261
8.1.2.	Temperatur-und spannungsabhängige Widerstände.	261
8.2.	Kondensatoren (Kapazitäten).	263
8.3.	Spulen (Induktivitäten) und Übertrager.	263
8.4.	Halbleiterdioden.	264
8.4.1.	Herstellungsverfahren und Bauformen.	264
8.4.2.	Richtdioden.	264
8.4.3.	Z-Dioden.	267
8.4.4.	Varaktordioden (Kapazitätsdioden).	268
8.4.5.	Schaltdioden.	269

8.5.	Bipolartransistoren.	270
8.5.1.	Herstellungsverfahren, Bauformen	270
8.5.2.	Wirkungsweise der Bipolartransistoren sowie Stromverstärkungen	271
8.5.3.	Strom-Spannungs-Kennlinien	274
8.5.4.	Bipolartransistoren als Kleinsignalverstärker.	275
8.5.5.	Bipolartransistor als Schalter.	279
8.6.	Feldeffekttransistoren.	280
8.6.1.	Funktionsprinzipien	280
8.6.1.1.	Sperrschicht-Feldeffekttransistoren.	280
8.6.1.2.	MOS-Feldeffekttransistoren (MOSFET).	281
8.6.2.	Feldeffekttransistoren als Verstärker.	283
8.6.3.	MOS-Feldeffekttransistoren als Schalter.	284
8.7.	Thyristoren.	284
8.8.	Optoelektronische Bauelemente.	286
8.8.1.	Fotowiderstände.	286
8.8.2.	Fotodioden und-transistoren.	286
8.8.3.	Lichtemitterdioden, Displays.	287
8.8.4.	Optoelektronische Koppler sowie Reflexkoppler.	287
8.8.5.	Flüssigkristalldisplays.	288
8.9.	Kontakte und Relais.	288
9.	Technologie elektronischer Schaltungen.	291
9.1.	Monolithisch integrierte Schaltkreise.	291
9.2.	Hybridschaltkreise.	295
9.3.	Gedruckte Schaltungen (bestückte Leiterplatten).	296
10.	Elektronische Systeme.	299
10.1.	Analogschaltungen.	299
10.1.1.	Vergleich analoger und digitaler Signale.	299
10.1.2.	Allgemeines zu Verstärkern.	300
10.1.2.1.	Überblick über die Eigenschaften von Verstärkern.	300
10.1.2.2.	Spannungsverstärkung, Frequenzverhalten sowie weitere Kenngrößen .	301
10.1.2.3.	Rückkopplung	303
10.1.3.*	Einige Grundsaltungen der Analogtechnik mit Bipolartransistoren . .	305
10.1.4.	Operationsverstärker.	307
10.1.4.1.	Einführung	307
10.1.4.2.	Kenngrößen realer Operationsverstärker.	309
10.1.4.3.	Anwendungen des OV.	310
10.1.5.	Weitere Analogschaltungen.	312
10.2.	Digitalschaltungen.	313
10.2.1.	Einführung	313
10.2.2.	Grundlagen der binären Digitaltechnik	314
10.2.2.1.	Informationsdarstellung in der binären Digitaltechnik	314
10.2.2.2.	Grundzüge der Schaltalgebra.	315
10.2.2.3.	Arithmetik mit Binärzahlen (Dualzahlen).	318
10.2.3.	Kombinatorische Grundsaltungen mit Feldeffekt- und Bipolartransi- storen.	319
10.2.3.1.	MOS-Technik	320

10.2.3.2.	CMOS-Technik	322
10.2.3.3.	TTL-Technik	323
10.2.3.4.	ECL-Technik	325
10.2.4.	Kipp- und Speicherschaltungen	325
10.2.4.1.	Speicherelemente (Flipflops)	325
10.2.4.2.	Monostabiler Multivibrator (Monoflop)	326
10.2.4.3.	Astabile Vibratoren	327
10.2.4.4.	Schmitt-Trigger	327
10.2.5.	Komplexe Digitalschaltungen	328
10.2.5.1.	Dekoder	328
10.2.5.2.	Rechenschaltungen (Adder)	329
10.2.5.3.	Register/Speicher	330
10.2.5.4.	Schieberegister	332
10.2.5.5.	Zähler und Teiler	334
10.3.	D/A- und A/D-Konverter	336
10.4.	Mikrorechner	337
10.4.1.	Allgemeiner Systemaufbau und Anwendung	337
10.4.2.	Funktionsprinzip eines Mikroprozessors	339
10.4.3.	Anwendung eines Mikroprozessorschaltkreises in einer einfachen Mikrorechnerschaltung (Hardwareentwurf)	340
10.4.4.	Programmierung des Mikrorechners (Softwareentwurf)	342
10.5.	Standard- und Kundens Schaltkreise (ASIC)	345
11.	Elektrische Energietechnik	346
11.1.	Anlagen zur Erzeugung, Übertragung und Nutzung von Elektroenergie	346
11.1.1.	Erzeugung von Elektroenergie	346
11.1.2.	Übertragung und Verteilung von Elektroenergie	347
11.1.3.	Bestandteile von Elektroenergieanlagen	348
11.1.4.	Personen- und Anlagenschutz in Niederspannungsanlagen	348
11.2.	Umformung elektrischer Energie	352
11.2.1.	Überblick	352
11.2.2.	Bauelemente der Stromrichtertechnik	353
11.2.3.	Stromrichterschaltungen	354
11.2.3.1.	Wechselstromsteller mit einem Triac	354
11.2.3.2.	Gleichrichterschaltungen	355
11.2.3.3.	Gleichstromsteller als Beispiel eines selbstgeführten Stromrichters	356
11.2.3.4.	Wechsel- bzw. Drehstromsteller	357
11.3.	Elektrische Maschinen und Antriebe	357
11.3.1.	Aufbau von Antrieben	357
11.3.2.	Bewegungsgleichung für Antriebe	358
11.3.3.	Übersicht über die Drehzahl-Drehmoment-Kennlinien von Arbeitsmaschinen	361
11.3.4.	Übersicht über ausgewählte Eigenschaften elektrischer Maschinen	361
11.3.5.	Kennzeichnung und Auswahl von Elektromotoren	365
11.3.6.	Gleichstrommaschinen	368
11.3.6.1.	Aufbau und Wirkungsweise	368
11.3.6.2.	Anwendungen	369
11.3.7.	Synchronmaschinen	369
11.3.7.1.	Drehstrom-Synchrongenerator	369
11.3.7.2.	Drehstrom-Synchronmotoren	371

11.3.8.	Asynchronmaschinen	372
11.3.8.1.	Drehstrom-Asynchronmotoren	372
11.3.8.2.	Wechselstrom-(Einphasen-)Asynchronmotoren	374
11.3.9.	Wechselstrom-Kommutatormaschinen	374
11.3.10.	Drehstrom-Kommutatormaschinen	375
11.3.11.	Weitere Typen rotierender elektrischer Maschinen	375
11.3.12.	Rotatorische Schrittmotoren	375
11.3.13.	Linearmotoren	376
11.4.	Elektrotechnologie	378
12.	Elektrische Meßtechnik	380
12.1.	Grundbegriffe	380
12.2.	Allgemeine Eigenschaften von Meßverfahren	382
12.3.	Elektrische Meßgeräte	385
12.3.1.	Nichtelektronische analoge Meßgeräte	385
12.3.2.	Elektronische Meßgeräte	387
12.4.	Elektrische Messung elektrischer Größen	388
12.4.1.	Strom-, Spannungs- und Leistungsmessung	388
12.4.2.	Messung weiterer elektrischer Größen	390
12.5.	Elektrische Messung nichtelektrischer Größen	390
12.5.1.	Grundlagen	390
12.5.2.	Elektrische Messung mechanischer Größen	391
12.5.3.	Elektrische Messung thermischer Größen	392
12.5.4.	Elektrische Messung optischer Größen	392
12.6.	Weitere Probleme der elektrischen Meßtechnik	392
13.	Automatisierungstechnik	394
13.1.	Einige Grundbegriffe	394
13.2.	Steuerung	394
13.3.	Regelung	395
13.3.1.	Prinzip der Regelung	395
13.3.2.	Grundstruktur eines Regelkreises	396
13.3.3.	Benennung von Regelungen	398
13.3.4.	Vergleich elektrischer und nichtelektrischer Regelungen	398
13.3.5.*	Beschreibung von Regelungen im Zeit- und Frequenzbereich	400
14.	Zuverlässigkeit	404
14.1.	Ausfallrate	404
14.2.	Zuverlässigkeitsfunktion (Überlebenswahrscheinlichkeit)	405
14.3.	Mittlere Lebensdauer	406
14.4.	Ausfall eines Systems mit n Komponenten	406
14.5.	Maßnahmen zur Vermeidung von Ausfällen	407
14.6.	Hinweis auf weiterführende Untersuchungen	407

Anhang A1	409
A 1.1. Definition der Basiseinheiten	409
A 1.2. Definition der ergänzenden SI-Einheiten	409
A 1.3. Abgeleitete SI-Einheiten mit selbständigem Namen	410
A 1.4. SI-fremde Einheiten	410
A1. 5. Weitere Größenarten.....	412
A 1.5.1. Verhältnisgrößen	412
A 1.5.2. Logarithmierte Verhältnisgrößen	412
A 1.5.3. Größen der Informationstheorie	413
 Anhang A 2	 414
A 2.1. Knotenspannungsanalyse	414
A 2.2. Maschenstromanalyse	418
A2.3. Weitere Gleichungssysteme für die Netzwerkanalyse	419
 Anhang A3	 420
A 3.1. Herstellerangaben zu elektronischen Bauelementen	420
A 3.2. Darstellung elektrotechnischer Einrichtungen bzw. Anlagen	420
 Literaturverzeichnis	 421
 Sachwörterverzeichnis	 424