
Leonhard Stiny

Grundwissen Elektrotechnik und Elektronik

Eine leicht verständliche Einführung

7., vollständig überarbeitete und erweiterte Auflage

117 Aufgaben mit Lösungswegen
622 Abbildungen



Springer Vieweg

Inhaltsverzeichnis

1	Elektrischer Strom	1
1.1	Der Aufbau der Materie	2
1.1.1	Stoffe	2
1.1.2	Zusammenfassung: Stoffe	3
1.1.3	Beispiel zur Zerlegung der Materie	4
1.1.4	Denkmodell für Atom und Molekül	4
1.1.5	Der Atombau	6
1.1.6	Zusammenfassung: Der Atombau	8
1.2	Elektrische Ladung und elektrischer Strom	9
1.2.1	Elektrische Ladung	9
1.2.2	Elektrischer Strom	10
1.3	Nichtleiter, Leiter und Halbleiter	11
1.4	Widerstand und Leitfähigkeit	12
1.5	Elektrische Spannung	13
1.6	Zusammenfassung: Der elektrische Strom	15
1.7	Halbleiter	16
1.7.1	Elektrizitätsleitung in festen Stoffen (Wiederholung)	16
1.7.2	Zusammenfassung: Halbleiter	21
2	Der unverzweigte Gleichstromkreis	23
2.1	Größen im Gleichstromkreis	23
2.1.1	Allgemeines zu physikalischen Größen und Einheiten	23
2.1.2	Die Größe für den elektrischen Strom	27
2.1.3	Die Größe für die elektrische Spannung	31
2.1.4	Die Größe für den elektrischen Widerstand	32
2.1.5	Zusammenfassung: Größen im Gleichstromkreis	33
2.2	Das Ohm'sche Gesetz	34
2.2.1	Aussage des ohmschen Gesetzes	34
2.2.2	Rechnen mit dem ohmschen Gesetz	35
2.2.3	Grafische Darstellung des ohmschen Gesetzes	36
2.2.4	Zusammenfassung: Das ohmsche Gesetz	37

2.3	Definitionen	37
2.3.1	Gleichstrom, Gleichspannung, Wechselstrom, Wechselspannung	37
2.3.2	Verbraucher	38
2.3.3	Reihenschaltung	39
2.3.4	Parallelschaltung	39
2.3.5	Unverzweigter und verzweigter Stromkreis	39
2.3.6	Schaltzeichen und Schaltbild	40
2.3.7	Werte von Strömen und Spannungen in Schaltbildern	42
2.3.8	Kurzschluss	46
2.3.9	Passive Bauelemente	47
2.3.10	Aktive Bauelemente	47
2.3.11	Zusammenfassung: Definitionen	47
2.4	Arbeit und Leistung	48
2.4.1	Elektrische Arbeit	48
2.4.2	Elektrische Leistung	49
2.5	Wirkungsgrad	51
2.6	Die Stromdichte	53
2.6.1	Homogener Stromfluss	53
2.6.2	Inhomogener Stromfluss	55
2.6.3	Praktische Bedeutung der Stromdichte	56
3	Lineare Bauelemente im Gleichstromkreis	59
3.1	Definition des Begriffes „linear“	59
3.2	Der ohmsche Widerstand	61
3.2.1	Wirkungsweise des Widerstandes	62
3.2.2	Spezifischer Widerstand	63
3.2.3	Verwendungszweck von Widerständen	67
3.2.4	Widerstand als Bauelement	69
3.2.5	Zusammenfassung: Der ohmsche Widerstand	78
3.3	Der Kondensator	79
3.3.1	Wirkungsweise des Kondensators	79
3.3.2	Größe für die Kapazität	80
3.3.3	Plattenkondensator	81
3.3.4	Dielektrikum	83
3.3.5	Verwendungszweck von Kondensatoren	86
3.3.6	Kondensator als Bauelement	90
3.3.7	Kenngößen von Kondensatoren	92
3.3.8	Elektrisches Feld	93
3.3.9	Zusammenfassung: Der Kondensator	96
3.4	Die Spule	96
3.4.1	Grundlagen des Magnetismus	96

3.4.2	Zusammenfassung: Grundlagen des Magnetismus	99
3.4.3	Elektromagnetismus	99
3.4.4	Wirkungsweise der Spule	102
3.4.5	Aufbau der Spule	113
3.4.6	Verwendungszweck von Spulen	115
3.4.7	Spule als Bauelement	116
3.4.8	Kenngößen von Spulen	116
3.4.9	Magnetische Kreise	117
3.5	Zusammenfassung: Die Spule	124
4	Gleichspannungsquellen	127
4.1	Primärelemente (galvanische Elemente, Batterien)	128
4.1.1	Wirkungsweise des galvanischen Elements	128
4.1.2	Batterien	129
4.2	Sekundärelemente (Akkumulatoren)	130
4.2.1	Der Bleiakkumulator	130
4.2.2	Nickel-Cadmium-Akkumulatoren	130
4.2.3	Nickel-Metallhydrid- und Lithium-Ionen-Akkumulatoren	131
4.2.4	Technische Eigenschaften von Akkumulatoren	131
4.3	Netzgeräte	132
4.4	Störungsfreie Versorgung mit Gleichspannung	133
4.5	Die belastete Gleichspannungsquelle	135
4.5.1	Reale Spannungsquelle	135
4.5.2	Ermittlung des Innenwiderstandes	137
4.5.3	Kurzschlussstrom	138
4.5.4	Leerlauf	139
4.5.5	Anpassungen	139
4.6	Stromquelle	141
4.7	Zusammenfassung: Gleichspannungsquellen	142
5	Berechnungen im unverzweigten Gleichstromkreis	145
5.1	Reihen- und Parallelschaltung von Zweipolen	145
5.2	Reihenschaltung von ohmschen Widerständen	146
5.3	Reihenschaltung von Kondensatoren	151
5.4	Reihenschaltung von Spulen	153
5.5	Reihenschaltung von Gleichspannungsquellen	153
5.6	Reihenschaltung von Widerständen, Kondensatoren und Spulen	154
5.6.1	Zusammenfassung von Bauelementen	154
5.6.2	Reihenschaltung von Kondensator und R oder L	154
5.6.3	Reihenschaltung einer Spule mit R oder C	154
5.7	Reihenschaltung in der Praxis	155
5.7.1	Ersatz von Bauteilen	155

	5.7.2	Vorwiderstand	155
	5.7.3	Spannungsabfall an Leitungen	156
	5.7.4	Spannungsteiler	157
5.8		Zusammenfassung: Berechnungen im unverzweigten Gleichstromkreis	157
6		Messung von Spannung und Strom	159
6.1		Voltmeter und Amperemeter	159
6.2		Erweiterung des Messbereiches eines Voltmeters	163
6.3		Indirekte Messung von Widerstand und Leistung	164
7		Schaltvorgänge im unverzweigten Gleichstromkreis	165
7.1		Schaltvorgang beim ohmschen Widerstand	166
	7.1.1	Widerstand einschalten	166
	7.1.2	Widerstand ausschalten	166
7.2		Schaltvorgang beim Kondensator	167
	7.2.1	Kondensator laden (einschalten)	167
	7.2.2	Kondensator ausschalten	169
	7.2.3	Kondensator entladen	170
	7.2.4	Exponentialfunktion von Spannung und Strom	171
7.3		Schaltvorgang bei der Spule	175
	7.3.1	Spule einschalten	175
	7.3.2	Spule ausschalten (mit Abschalt-Induktionsstromkreis)	177
	7.3.3	Spule ausschalten (ohne Abschalt-Induktionsstromkreis)	179
	7.3.4	Zeitverlauf von Spannung und Strom	182
7.4		Zusammenfassung: Schaltvorgänge im unverzweigten Gleichstromkreis	183
8		Der verzweigte Gleichstromkreis	185
8.1		Die Kirchhoff'schen Gesetze	186
	8.1.1	Die Knotenregel (1. Kirchhoff'sches Gesetz)	186
	8.1.2	Die Maschenregel (2. Kirchhoff'sches Gesetz)	187
8.2		Berechnung von Parallelschaltungen	188
	8.2.1	Parallelschaltung von ohmschen Widerständen	188
	8.2.2	Die Stromteilerregel	190
	8.2.3	Parallelschaltung von Kondensatoren	192
	8.2.4	Parallelschaltung von Spulen	192
	8.2.5	Parallelschaltung von Gleichspannungsquellen	193
8.3		Parallelschaltung in der Praxis	194
	8.3.1	Ersatz von Bauteilen	194
	8.3.2	Erweiterung des Messbereiches eines Amperemeters	194
	8.3.3	Der belastete Spannungsteiler	196
	8.3.4	Berechnung des belasteten Spannungsteilers	197

8.4	Gemischte Schaltungen	199
8.5	Stern-Dreieck- und Dreieck-Stern-Umwandlung	201
8.6	Umwandlung von Quellen	204
8.7	Analyse von Netzwerken	205
8.7.1	Die Maschenanalyse	207
8.7.2	Die Knotenanalyse	214
8.7.3	Der Überlagerungssatz	217
8.7.4	Der Satz von der Ersatzspannungsquelle	220
8.7.5	Bestimmung des Innenwiderstandes eines Netzwerkes	226
8.8	Vierpole	228
8.9	Zusammenfassung: Der verzweigte Gleichstromkreis	229
9	Wechselspannung und Wechselstrom	231
9.1	Grundlegende Betrachtungen	231
9.2	Entstehung der Sinuskurve, Liniendiagramm	238
9.3	Relevanz sinusförmiger Wechselgrößen	240
9.4	Kennwerte von Wechselgrößen	242
9.4.1	Periodendauer	242
9.4.2	Frequenz	242
9.4.3	Kreisfrequenz	243
9.4.4	Wellenlänge	244
9.4.5	Amplitude	244
9.4.6	Spitze-Spitze-Wert	245
9.4.7	Effektivwert	245
9.4.8	Gleichrichtwert	249
9.4.9	Nullphasenwinkel	252
9.4.10	Phasenverschiebung	253
9.5	Zusammenfassung: Kennwerte von Wechselgrößen	256
9.6	Zeigerdiagramm	257
9.6.1	Zeigerdarstellung von Sinusgrößen	257
9.6.2	Phasenverschiebungswinkel im Zeigerdiagramm	261
9.7	Zusammenfassung: Zeigerdiagramm	262
9.8	Zusammensetzung von Wechselspannungen	263
9.9	Oberschwingungen	266
9.9.1	Fourier-Reihen	267
9.9.2	Beispiel zur Fourier-Analyse	271
9.9.3	Bedeutung der Fourier-Analyse	274
9.9.4	Klirrfaktor	275
10	Komplexe Darstellung von Sinusgrößen	277
10.1	Grundbegriffe der komplexen Rechnung	277
10.1.1	Rechenregeln für imaginäre Zahlen	282

10.1.2	Rechenregeln für komplexe Zahlen	282
10.1.3	Vorteile komplexer Zahlen	287
10.1.4	Sinusförmige Wechselspannung in komplexer Darstellung	290
10.1.5	Der komplexe Widerstand	296
10.2	Zusammenfassung: Komplexe Darstellung von Sinusgrößen	299
11	Einfache Wechselstromkreise	301
11.1	Ohm'scher Widerstand im Wechselstromkreis	302
11.2	Spule im Wechselstromkreis	305
11.3	Kondensator im Wechselstromkreis	308
11.4	Reihenschaltung aus ohmschem Widerstand und Spule	312
11.4.1	Komplexer Frequenzparameter „ s “	312
11.4.2	Anwendung von s bei der RL -Reihenschaltung	313
11.5	Reihenschaltung aus ohmschem Widerstand und Kondensator	319
11.6	RC -Reihenschaltung in der Praxis	322
11.6.1	Die Übertragungsfunktion	322
11.6.2	Verstärkungsmaß, Dezibel	326
11.6.3	Bode-Diagramm	327
11.6.4	Dämpfung	328
11.6.5	Grenzfrequenz	329
11.6.6	Normierte Übertragungsfunktion	329
11.6.7	Der RC -Tiefpass	330
11.6.8	Bode-Diagramme mit Mathcad	334
11.6.9	Filterung eines gestörten Sinussignals	337
11.6.10	Der RC -Hochpass	338
11.7	Reihenschaltung aus Spule, Widerstand und Kondensator	341
11.8	Parallelschaltung aus Widerstand und Spule	342
11.9	Parallelschaltung aus Widerstand und Kondensator	343
11.10	Bode-Diagramm mit Excel-Tool	344
11.11	Zusammenfassung: Einfache Wechselstromkreise	344
12	Ersatzschaltungen für Bauelemente	347
12.1	Die elektrische Leitung	348
12.2	Widerstand mit Eigenkapazität und Eigeninduktivität	349
12.3	Verluste in Spulen	349
12.3.1	Wicklungsverluste	349
12.3.2	Verluste durch den Skineneffekt	350
12.3.3	Hystereseverluste	351
12.3.4	Wirbelstromverluste	352
12.4	Verluste im Kondensator	352
12.5	Zusammenfassung: Ersatzschaltungen für Bauelemente	353

13	Leistung im Wechselstromkreis	355
13.1	Reine Wirkleistung	355
13.2	Reine Blindleistung	356
13.3	Wirk- und Blindleistung	359
13.4	Scheinleistung	360
13.5	Blindleistungskompensation	361
13.6	Zusammenfassung: Leistung im Wechselstromkreis	364
14	Transformatoren (Übertrager)	365
14.1	Grundprinzip	365
14.2	Transformator mit Eisenkern	366
14.3	Der verlustlose, streufreie Transformator	368
14.3.1	Transformation der Spannungen	369
14.3.2	Transformation der Stromstärken	369
14.3.3	Transformation des Widerstandes	370
14.4	Der verlustlose Transformator mit Streuung	371
14.5	Der reale Transformator	373
14.6	Frequenzverhalten des NF-Übertragers	373
14.7	Übertrager zwischen ohmschen Widerständen	374
14.7.1	Idealer Übertrager unter Vernachlässigung der Wicklungswiderstände	374
14.7.2	Idealer Übertrager mit Wicklungswiderständen	375
14.8	Spezielle Ausführungen von Transformatoren	379
14.9	Zusammenfassung: Transformatoren (Übertrager)	379
15	Schwingkreise	381
15.1	Reihenschwingkreis ohne Verluste	381
15.2	Reihenschwingkreis mit Verlusten	384
15.3	Parallelschwingkreis ohne Verluste	396
15.4	Parallelschwingkreis mit Verlusten	398
15.5	Zeitverhalten elektrischer Schwingkreise	409
15.6	Grundsätzliche Kopplungsarten	409
15.6.1	Galvanische Kopplung	410
15.6.2	Induktive Kopplung	410
15.6.3	Kapazitive Kopplung	411
15.6.4	Fußpunktkopplung	411
15.7	Bandfilter	411
15.8	Kopplungsarten bei Bandfiltern	413
15.8.1	Transformatorische Kopplung	413
15.8.2	Induktive Kopplung mit Koppelspule	414
15.8.3	Kapazitive Kopfpunktkopplung	415
15.8.4	Kapazitive Fußpunktkopplung	415

15.9	Zusammenschaltung von Schwingkreisen	416
15.9.1	LC-Bandpass	416
15.9.2	LC-Bandsperre	417
15.10	Zusammenfassung: Schwingkreise	418
16	Mehrphasensysteme	419
16.1	Erzeugung von Drehstrom	419
16.1.1	Sternschaltung des Generators	421
16.1.2	Dreieckschaltung des Generators	423
16.2	Verbraucher im Drehstromsystem	424
16.2.1	Sternschaltung des Verbrauchers mit Mittelleiter	424
16.2.2	Sternschaltung des Verbrauchers ohne Mittelleiter	425
16.2.3	Dreieckschaltung des Verbrauchers	430
16.3	Leistung bei Drehstrom	432
16.4	Zusammenfassung: Mehrphasensysteme	434
17	Analyse allgemeiner Wechselstromnetze	435
18	Halbleiterdioden	449
18.1	Der pn-Übergang ohne äußere Spannung	449
18.2	Der pn-Übergang mit äußerer Spannung	453
18.2.1	Äußere Spannung in Durchlassrichtung	453
18.2.2	Äußere Spannung in Sperrrichtung	455
18.2.3	Vollständige Kennlinie eines pn-Übergangs	458
18.3	Beschreibung der Diode durch Gleichungen	460
18.3.1	Shockley-Gleichung	460
18.3.2	Vereinfachung für den Durchlassbereich	461
18.3.3	Vereinfachung für den Sperrbereich	462
18.4	Linearisierung der Durchlasskennlinie in einem Arbeitspunkt	464
18.4.1	Arbeitspunkt	464
18.4.2	Gleichstromwiderstand	465
18.4.3	Wechselstromwiderstand	465
18.5	Näherungen für die Diodenkennlinie	466
18.5.1	Die ideale Diode	466
18.5.2	Berücksichtigung der Schleusenspannung	467
18.5.3	Berücksichtigung des Bahnwiderstandes	467
18.6	Kenn- und Grenzwerte von Dioden	475
18.7	Schaltverhalten von Dioden	475
18.7.1	Diode einschalten	476
18.7.2	Diode ausschalten	477
18.8	Temperaturabhängigkeit der Diodenkennlinie	478
18.8.1	Temperaturabhängigkeit des Sperrstromes	478

18.8.2	Temperaturabhängigkeit der Durchlassspannung	480
18.9	Diode und Verlustleistung	480
18.10	Arten von Dioden	486
18.10.1	Universaldioden	486
18.10.2	Spezialdioden	487
18.11	Arbeitspunkt und Widerstandsgerade	503
18.11.1	Widerstandsgerade, einfache Anleitung	504
18.11.2	Widerstandsgerade, rechnerisches Verfahren	506
18.11.3	Widerstandsgerade, Strahlensatz	507
18.11.4	Mathematische Näherungslösung durch Iteration	508
18.12	Anwendungen von Dioden	512
18.12.1	Gleichrichtung von Wechselspannungen	513
18.12.2	Schutzdiode, Freilaufdiode	526
18.12.3	Eingangsschutzschaltung einer Baugruppe	527
18.12.4	Dioden in der Digitaltechnik	529
18.12.5	Begrenzung einer Wechselspannung	531
18.13	Zusammenfassung: Halbleiterdioden	532
19	Bipolare Transistoren	535
19.1	Definition und Klassifizierung von Transistoren	535
19.2	Aufbau des Bipolartransistors	537
19.3	Richtung von Strömen und Spannungen beim Transistor	539
19.4	Wirkungsweise	540
19.5	Die drei Grundschaltungen des Transistors	545
19.6	Betriebsarten	546
19.6.1	Verstärkerbetrieb	546
19.6.2	Schalterbetrieb	547
19.7	Kennlinien des Transistors	550
19.7.1	Eingangskennlinie	550
19.7.2	Übertragungskennlinie (Steuerkennlinie)	555
19.7.3	Ausgangskennlinien	563
19.7.4	Vierquadranten-Kennlinienfeld, Arbeitspunkt, Lastgerade	570
19.8	Abhängigkeiten der Stromverstärkung	573
19.8.1	Stromverstärkung in Abhängigkeit von Arbeitspunkt und Temperatur	573
19.8.2	Stromverstärkung in Abhängigkeit der Grundschaltung	575
19.8.3	Stromverstärkung in Abhängigkeit der Frequenz, Grenzfrequenzen	577
19.9	Wahl des Arbeitspunktes	580
19.9.1	Erlaubter Arbeitsbereich	580
19.9.2	Betriebsarten als Verstärker	581
19.10	Die Grundschaltungen im Detail	583

19.10.1	Die Emitterschaltung	583
19.10.2	Die Basisschaltung	589
19.10.3	Die Kollektorschaltung	591
19.11	Rückkopplung	594
19.11.1	Allgemeine Folgen der Gegenkopplung	596
19.11.2	Emitterstufe mit Gegenkopplung	601
19.12	Ersatzschaltungen des Transistors	603
19.12.1	Die formale Ersatzschaltung	604
19.12.2	Die physikalische Ersatzschaltung	609
19.13	Spezielle Schaltungen mit Bipolartransistoren	614
19.13.1	Darlington-Schaltung	614
19.13.2	Bootstrap-Schaltung	614
19.13.3	Kaskodeschaltung	615
19.13.4	Konstantstromquelle	616
19.13.5	Differenzverstärker	618
19.13.6	Selektivverstärker	621
19.13.7	Oszillatoren	621
19.14	Der Transistor als Schalter	623
19.14.1	Schaltransistor im Sperrzustand	624
19.14.2	Schaltransistor im Durchlasszustand	625
19.14.3	Dynamisches Schaltverhalten	626
19.14.4	Verkürzung der Schaltzeiten	628
19.14.5	Beispiele für die Anwendung von Schaltransistoren	628
19.15	Transistoren in der Digitaltechnik	635
19.15.1	Kodes, Logische Funktionen, Schaltalgebra	635
19.15.2	Schaltungstechnische Realisierung der logischen Grundfunktionen	641
19.16	Zusammenfassung: Bipolare Transistoren	647
20	Feldeffekttransistoren	651
20.1	Bezeichnungen und Klassifizierung	651
20.2	Sperrschicht-FET (JFET) mit n-Kanal	655
20.2.1	Aufbau und Arbeitsweise	655
20.2.2	Kennlinien und Arbeitsbereiche des JFETs	657
20.3	Isolierschicht-FET (MOSFET) mit n-Kanal	661
20.3.1	Aufbau und Arbeitsweise	661
20.3.2	Kennlinien und Arbeitsbereiche des MOSFETs	664
20.4	Schaltungstechnik mit FETs (Beispiele)	667
20.4.1	Die drei Grundsaltungen des Feldeffekttransistors	667
20.4.2	Verstärkerbetrieb	668
20.4.3	Betrieb als steuerbarer Widerstand	670
20.4.4	Konstantstromquelle mit FET	671

20.4.5	Der FET als Schalter	671
20.4.6	Inversdiode	672
20.4.7	Lowside-, Highside-Schalter	673
20.5	Zusammenfassung: Feldeffekttransistoren	680
21	Operationsverstärker	683
21.1	Begriffe, Anwendungsbereiche	683
21.2	Interner Aufbau von Operationsverstärkern	684
21.3	Eigenschaften des Operationsverstärkers	686
21.3.1	Leerlaufspannungsverstärkung	686
21.3.2	Eingangswiderstände, Eingangsströme	687
21.3.3	Ausgangswiderstand	687
21.3.4	Übertragungskennlinie	687
21.3.5	Gleichtaktverstärkung, Gleichtaktunterdrückung	689
21.3.6	Offsetspannung	690
21.3.7	Frequenzverhalten	691
21.3.8	Sprungverhalten	694
21.4	Der ideale Operationsverstärker	695
21.5	Einsatz von Operationsverstärkern	696
21.5.1	Beschalteter Operationsverstärker	696
21.5.2	Grundsaltungen	701
21.5.3	Anwendungsbeispiele	711
21.6	Zusammenfassung: Operationsverstärker	717
	Liste verwendeter Formelzeichen	719
	Literatur	725
	Sachverzeichnis	727