

Inhalt

1	Elektrischer Strom	17
1.1	Der Aufbau der Materie.....	17
1.1.1	Stoffe	17
1.1.1.1	Stoffgemische	18
1.1.1.2	Reinstoffe.....	18
1.1.1.3	Verbindung	18
1.1.1.4	Molekül	18
1.1.1.5	Element.....	18
1.1.1.6	Atom	18
1.1.2	Zusammenfassung: Stoffe	19
1.1.3	Beispiel zur Zerlegung der Materie	19
1.1.4	Denkmodell für Atom und Molekül	20
1.1.5	Der Atombau.....	21
1.1.5.1	Das Bohrsche Atommodell	21
1.1.5.2	Beispiele für Atome.....	23
1.1.6	Zusammenfassung: Der Atombau	24
1.2	Der elektrische Strom	24
1.2.1	Elektrische Ladung	24
1.2.2	Elektrischer Strom	25
1.2.3	Nichtleiter, Leiter und Halbleiter	27
1.2.4	Widerstand und Leitfähigkeit.....	27
1.2.5	Elektrische Spannung.....	28
1.2.6	Zusammenfassung: Der elektrische Strom	30
1.2.7	Halbleiter.....	30
1.2.7.1	Elektrizitätsleitung in festen Stoffen (Wiederholung).....	30
1.2.7.2	Elektrizitätsleitung in reinen Halbleitern (Eigenleitung)	31
1.2.7.3	Elektrizitätsleitung in dotierten Halbleitern (Störstellenleitung)	34
1.2.8	Zusammenfassung: Halbleiter	35
2	Der unverzweigte Gleichstromkreis	37
2.1	Größen im Gleichstromkreis	37
2.1.1	Allgemeines zu physikalischen Größen und Einheiten	37
2.1.2	Die Größe für den elektrischen Strom	39
2.1.3	Die Größe für die elektrische Spannung	40
2.1.4	Die Größe für den elektrischen Widerstand	41
2.1.5	Zusammenfassung: Größen im Gleichstromkreis	42
2.2	Das OHMsche Gesetz	42
2.2.1	Aussage des Ohmschen Gesetzes.....	42
2.2.2	Rechnen mit dem Ohmschen Gesetz	44
2.2.3	Grafische Darstellung des Ohmschen Gesetzes	45
2.2.4	Zusammenfassung: Das OHMsche Gesetz.....	45
2.3	Definitionen	46
2.3.1	Gleichstrom, Gleichspannung, Wechselstrom, Wechselspannung.....	46
2.3.2	Verbraucher.....	47
2.3.3	Reihenschaltung	47
2.3.4	Parallelschaltung	47
2.3.5	Unverzweigter und verzweigter Stromkreis.....	47
2.3.6	Schaltzeichen und Schaltbild	48
2.3.7	Werte von Strömen und Spannungen in Schaltbildern	50
2.3.7.1	Angabe der Spannungen unter Bezug auf Masse (als Potential)	50
2.3.7.2	Angabe der Spannungen mit Zählpfeilen.....	51
2.3.7.3	Angabe von Strömen in Schaltbildern.....	52
2.3.7.4	Erzeuger- und Verbraucher- Zählpfeilsystem	52
2.3.8	Kurzschluß.....	53
2.3.9	Passive Bauelemente	54
2.3.10	Aktive Elemente	54
2.3.11	Zusammenfassung: Definitionen	54
2.4	Arbeit und Leistung.....	55
2.4.1	Elektrische Arbeit.....	55
2.4.2	Elektrische Leistung.....	55
2.5	Wirkungsgrad.....	57

3	Lineare Bauelemente im Gleichstromkreis	59
3.1	Definition des Begriffes "linear"	59
3.2	Der ohmsche Widerstand	60
3.2.1	Wirkungsweise des Widerstandes	60
3.2.2	Spezifischer Widerstand	61
3.2.3	Verwendungszweck von Widerständen	65
3.2.3.1	Strombegrenzung durch einen Vorwiderstand	65
3.2.3.2	Aufteilung einer Spannung	66
3.2.3.3	Aufteilung des Stromes	66
3.2.4	Widerstand als Bauelement	66
3.2.4.1	Festwiderstände	67
3.2.4.2	Veränderbare Widerstände	72
3.2.4.3	Spezielle Widerstände	74
3.2.5	Zusammenfassung: Der ohmsche Widerstand	75
3.3	Der Kondensator	75
3.3.1	Wirkungsweise des Kondensators	75
3.3.2	Größe für die Kapazität	76
3.3.3	Plattenkondensator	77
3.3.4	Dielektrikum	79
3.3.5	Verwendungszweck von Kondensatoren	82
3.3.5.1	Stützen von Spannungen	82
3.3.5.2	Glättung von Spannungen	84
3.3.5.3	Trennen von Gleich- und Wechselspannung	84
3.3.5.4	Entstörung mittels Kondensatoren	85
3.3.6	Kondensator als Bauelement	85
3.3.6.1	Festkondensatoren	85
3.3.6.2	Veränderbare Kondensatoren	87
3.3.7	Kenngößen von Kondensatoren	87
3.3.7.1	Nennspannung	87
3.3.7.2	Kapazitätstoleranz	87
3.3.7.3	Kapazitätsänderung	88
3.3.7.4	Ersatzschaltbild	88
3.3.8	Zusammenfassung: Der Kondensator	88
3.4	Die Spule	88
3.4.1	Grundlagen des Magnetismus	88
3.4.2	Zusammenfassung: Grundlagen des Magnetismus	91
3.4.3	Elektromagnetismus	91
3.4.4	Wirkungsweise der Spule	92
3.4.4.1	Magnetwirkung des Stromes	92
3.4.4.2	Induktion	96
3.4.4.3	Kraft auf stromdurchflossene Leiter	99
3.4.4.4	Selbstinduktion	99
3.4.4.5	Induktivität	100
3.4.4.6	Induktive Kopplung	100
3.4.4.7	Induktiver Widerstand	102
3.4.5	Aufbau der Spule	102
3.4.5.1	Luftspule	102
3.4.5.2	Spule mit Kern	103
3.4.6	Verwendungszweck von Spulen	104
3.4.6.1	Verwendung von Spulen im Gleichstromkreis	104
3.4.6.2	Verwendung von Spulen im Wechselstromkreis	104
3.4.7	Spule als Bauelement	104
3.4.7.1	Feste Induktivität	104
3.4.7.2	Veränderliche Induktivität	105
3.4.8	Kenngößen von Spulen	105
3.5	Zusammenfassung: Die Spule	105
4	Gleichspannungsquellen	107
4.1	Primärelemente (galvanische Elemente, Batterien)	107
4.1.1	Wirkungsweise des galvanischen Elements	107
4.1.2	Batterien	108
4.2	Sekundärelemente (Akkumulatoren)	109
4.2.1	Der Bleiakкумуляtor	109
4.2.2	Nickel-Cadmium-Akkumulatoren	110
4.2.3	Nickel-Metallhydrid-Akkumulatoren	110
4.2.4	Technische Eigenschaften von Akkumulatoren	110
4.3	Netzgeräte	111
4.4	Störungsfreie Versorgung mit Gleichspannung	112
4.5	Die belastete Gleichspannungsquelle	113

4.5.1	Ersatzspannungsquelle	113
4.5.2	Ermittlung des Innenwiderstandes	115
4.5.3	Kurzschlußstrom	115
4.5.4	Leerlauf	116
4.5.5	Anpassungen	116
4.5.5.1	Spannungsanpassung	116
4.5.5.2	Stromanpassung	117
4.5.5.3	Leistungsanpassung	117
4.6	Ersatzstromquelle	117
4.7	Zusammenfassung: Gleichspannungsquellen	118
5	Berechnungen im unverzweigten Gleichstromkreis	121
5.1	Reihen- und Parallelschaltung von Zweipolen	121
5.2	Reihenschaltung von ohmschen Widerständen	122
5.3	Reihenschaltung von Kondensatoren	126
5.4	Reihenschaltung von Spulen	127
5.5	Reihenschaltung von Gleichspannungsquellen	128
5.6	Reihenschaltung von Widerständen, Kondensatoren und Spulen	128
5.6.1	Zusammenfassung von Bauelementen	128
5.6.2	Reihenschaltung von Kondensator und R oder L	129
5.6.3	Reihenschaltung einer Spule mit R oder C	129
5.7	Reihenschaltung in der Praxis	129
5.7.1	Ersatz von Bauteilen	129
5.7.2	Vorwiderstand	130
5.7.3	Spannungsabfall an Leitungen	131
5.7.4	Spannungsteiler	131
5.8	Zusammenfassung: Berechnungen im unverzweigten Gleichstromkreis	131
6	Messung von Spannung und Strom	133
6.1	Voltmeter und Amperemeter	133
6.2	Erweiterung des Meßbereiches eines Voltmeters	136
6.3	Indirekte Messung von Widerstand und Leistung	137
7	Schaltvorgänge im unverzweigten Gleichstromkreis	139
7.1	Schaltvorgang beim ohmschen Widerstand	139
7.1.1	Widerstand einschalten	139
7.1.2	Widerstand ausschalten	139
7.2	Schaltvorgang beim Kondensator	140
7.2.1	Kondensator laden (einschalten)	140
7.2.2	Kondensator ausschalten	142
7.2.3	Kondensator entladen	142
7.2.4	Exponentialfunktion von Spannung und Strom	143
7.3	Schaltvorgang bei der Spule	147
7.3.1	Spule einschalten	147
7.3.2	Spule ausschalten (mit Abschalt-Induktionsstromkreis)	148
7.3.3	Spule ausschalten (ohne Abschalt-Induktionsstromkreis)	149
7.3.4	Zeitverlauf von Spannung und Strom	151
7.4	Zusammenfassung: Schaltvorgänge im unverzweigten Gleichstromkreis	152
8	Der verzweigte Gleichstromkreis	153
8.1	Die Kirchhoffschen Gesetze	153
8.1.1	Die Knotenregel (1. Kirchhoffsches Gesetz)	153
8.1.2	Die Maschenregel (2. Kirchhoffsches Gesetz)	154
8.2	Berechnung von Parallelschaltungen	155
8.2.1	Parallelschaltung von ohmschen Widerständen	155
8.2.2	Parallelschaltung von Kondensatoren	157
8.2.3	Parallelschaltung von Spulen	157
8.2.4	Parallelschaltung von Gleichspannungsquellen	158
8.3	Parallelschaltung in der Praxis	159
8.3.1	Ersatz von Bauteilen	159
8.3.2	Erweiterung des Meßbereiches eines Amperemeters	159
8.3.3	Der belastete Spannungsteiler	161
8.3.3.1	Berechnung des belasteten Spannungsteilers	161
8.4	Gemischte Schaltungen	163
8.5	Stern-Dreieck- und Dreieck-Stern-Umwandlung	164
8.6	Umwandlung von Quellen	167
8.7	Analyse von Netzwerken	168
8.7.1	Die Maschenanalyse	169
8.7.2	Die Knotenanalyse	174

8.7.3	Der Überlagerungssatz	177
8.7.4	Der Satz von der Ersatzspannungsquelle	179
8.8	Vierpole	184
8.9	Zusammenfassung: Der verzweigte Gleichstromkreis	185
9	Wechselspannung und Wechselstrom	187
9.1	Grundlegende Betrachtungen	187
9.2	Entstehung der Sinuskurve	190
9.3	Kennwerte von Wechselgrößen	191
9.3.1	Periodendauer	191
9.3.2	Frequenz	191
9.3.3	Kreisfrequenz	192
9.3.4	Wellenlänge	192
9.3.5	Amplitude	193
9.3.6	Spitze-Spitze-Wert	193
9.3.7	Effektivwert	193
9.3.8	Gleichrichtwert ^(M)	196
9.3.9	Phase	198
9.4	Zusammenfassung: Kennwerte von Wechselgrößen	199
9.5	Zeigerdarstellung von Sinusgrößen	200
9.6	Zusammensetzung von Wechselspannungen	202
9.7	Oberschwingungen	204
9.7.1	Fourierreihen ^(M)	205
9.7.2	Beispiel zur Fourier-Analyse ^(M)	207
9.7.3	Bedeutung der Fourier-Analyse	210
9.7.3.1	Störungen	210
9.7.3.2	Nichtsinusförmige Vorgänge in linearen Schaltungen	211
9.7.4	Klirrfaktor	211
10	Komplexe Darstellung von Sinusgrößen	213
10.1	Grundbegriffe der komplexen Rechnung	213
10.1.1	Rechenregeln für imaginäre Zahlen	214
10.1.2	Rechenregeln für komplexe Zahlen	215
10.1.3	Vorteil komplexer Zahlen	217
10.1.4	Sinusförmige Wechselspannung in komplexer Darstellung	220
10.1.5	Der komplexe Widerstand	221
10.2	Zusammenfassung: Komplexe Darstellung von Sinusgrößen	221
11	Einfache Wechselstromkreise	223
11.1	Ohmscher Widerstand im Wechselstromkreis	223
11.2	Spule im Wechselstromkreis	225
11.3	Kondensator im Wechselstromkreis	227
11.4	Reihenschaltung aus ohmschen Widerstand und Spule	230
11.4.1	Komplexe Frequenz "s"	230
11.4.2	Anwendung von s bei der RL-Reihenschaltung	231
11.5	Reihenschaltung aus ohmschen Widerstand und Kondensator	236
11.6	RC-Reihenschaltung in der Praxis	238
11.6.1	Die Übertragungsfunktion	238
11.6.2	Pegel	242
11.6.3	Bodediagramm	243
11.6.4	Dämpfung	244
11.6.5	Grenzfrequenz	244
11.6.6	Normierte Übertragungsfunktion	244
11.6.7	Der RC-Tiefpaß	245
11.6.8	Bodediagramme mit Mathcad	249
11.6.9	Filterung eines gestörten Sinussignals	252
11.6.10	Der RC-Hochpaß	253
11.7	Reihenschaltung aus Spule, Widerstand und Kondensator	255
11.8	Parallelschaltung aus Widerstand und Spule	256
11.9	Parallelschaltung aus Widerstand und Kondensator	257
11.10	Zusammenfassung: Einfache Wechselstromkreise	258
12	Ersatzschaltungen für Bauelemente	259
12.1	Die elektrische Leitung	259
12.2	Widerstand mit Eigenkapazität und Eigeninduktivität	260
12.3	Verluste in Spulen	261
12.3.1	Wicklungsverluste	261
12.3.2	Verluste durch den Skineffekt	262
12.3.3	Hystereseverluste	263

12.3.4	Wirbelstromverluste	263
12.4	Verluste im Kondensator.....	263
12.5	Zusammenfassung: Ersatzschaltungen für Bauelemente.....	264
13	Leistung im Wechselstromkreis.....	265
13.1	Reine Wirkleistung	265
13.2	Reine Blindleistung	266
13.3	Wirk- und Blindleistung	267
13.4	Scheinleistung	268
13.5	Blindleistungskompensation	269
13.6	Zusammenfassung: Leistung im Wechselstromkreis.....	271
14	Transformatoren (Übertrager)	273
14.1	Grundprinzip	273
14.2	Transformator mit Eisenkern.....	274
14.3	Der verlustlose streufreie Transformator.....	275
14.3.1	Transformation der Spannungen	276
14.3.2	Transformation der Stromstärken	276
14.3.3	Transformation des Widerstandes	277
14.4	Der verlustlose Übertrager mit Streuung.....	278
14.5	Der reale Transformator.....	280
14.6	Übertrager zwischen ohmschen Widerständen	281
14.7	Spezielle Ausführungen von Transformatoren.....	285
14.8	Zusammenfassung: Transformatoren (Übertrager)	285
15	Schwingkreise	287
15.1	Reihenschwingkreis ohne Verluste.....	287
15.2	Reihenschwingkreis mit Verlusten	289
15.3	Parallelschwingkreis ohne Verluste	299
15.4	Parallelschwingkreis mit Verlusten	301
15.5	Zeitverhalten elektrischer Schwingkreise.....	308
15.6	Grundsätzliche Kopplungsarten	309
15.6.1	Galvanische Kopplung.....	309
15.6.2	Induktive Kopplung	309
15.6.3	Kapazitive Kopplung	310
15.6.4	Fußpunktkopplung	310
15.7	Bandfilter.....	310
15.8	Kopplungsarten bei Bandfiltern.....	312
15.8.1	Transformatorische Kopplung.....	312
15.8.2	Induktive Kopplung mit Koppelspule.....	312
15.8.3	Kapazitive Kopfpunktkopplung.....	313
15.8.4	Kapazitive Fußpunktkopplung.....	314
15.9	Zusammenschaltung von Schwingkreisen.....	314
15.9.1	LC-Bandpaß	314
15.9.2	LC-Bandsperre	315
15.10	Zusammenfassung: Schwingkreise	316
16	Mehrphasensysteme	317
16.1	Erzeugung von Drehstrom	317
16.1.1	Sternschaltung des Generators	318
16.1.2	Dreieckschaltung des Generators.....	319
16.2	Verbraucher im Drehstromsystem	320
16.2.1	Sternschaltung des Verbrauchers mit Mittelleiter.....	320
16.2.2	Sternschaltung des Verbrauchers ohne Mittelleiter	321
16.2.3	Dreieckschaltung des Verbrauchers	324
16.3	Leistung bei Drehstrom.....	326
16.4	Zusammenfassung: Mehrphasensysteme	327
17	Analyse allgemeiner Wechselstromnetze	329
18	Halbleiterdioden	341
18.1	Der PN-Übergang ohne äußere Spannung.....	341
18.2	Der PN-Übergang mit äußerer Spannung.....	343
18.2.1	Äußere Spannung in Durchlaßrichtung.....	343
18.2.2	Äußere Spannung in Sperrichtung.....	344
18.2.3	Vollständige Kennlinie eines PN-Überganges	347
18.3	Eigenschaften von Dioden	348
18.3.1	Die ideale Diode	348
18.3.2	Die reale Diode	348

18.3.2.1	Ersatzschaltungen der Diode.....	348
18.3.2.2	Kennwerte von Dioden	350
18.3.2.3	Temperaturabhängigkeit der Diodenkennlinie	353
18.4	Diode und Verlustleistung.....	355
18.5	Arten von Dioden	359
18.5.1	Universaldioden	359
18.5.2	Spezialdioden	360
18.5.2.1	Schottkydiode (hot carrier-Diode)	360
18.5.2.2	Gunndiode	360
18.5.2.3	PIN-Diode	360
18.5.2.4	Kapazitätsvariationsdiode	360
18.5.2.5	Tunnelodiode.....	362
18.5.2.6	Photodiode.....	363
18.5.2.7	Lumineszenzdiode.....	363
18.5.2.8	Z-Diode (Zener-Diode).....	364
18.5.2.9	Suppressor-Dioden.....	370
18.6	Arbeitspunkt und Widerstandsgerade	370
18.7	Anwendungen von Dioden.....	376
18.7.1	Gleichrichtung von Wechselspannungen.....	376
18.7.2	Schutzdiode.....	379
18.7.3	Eingangsschutzschaltung	380
18.7.4	Dioden in der Digitaltechnik	381
18.7.5	Begrenzung einer Wechselspannung	383
18.7.6	Stabilisierung kleiner Gleichspannungen	384
18.8	Zusammenfassung: Halbleiterdioden	385
19	Bipolare Transistoren	387
19.1	Definition und Klassifizierung von Transistoren	387
19.2	Aufbau des Transistors	388
19.3	Richtung von Strömen und Spannungen beim Transistor.....	389
19.4	Wirkungsweise.....	390
19.5	Die drei Grundsaltungen des Transistors.....	394
19.6	Betriebsarten	395
19.7	Kennlinien des Transistors.....	398
19.7.1	Eingangskennlinie.....	398
19.7.2	Ausgangskennlinie.....	399
19.7.3	Steuerkennlinie	400
19.7.4	Vierquadranten-Kennlinienfeld, Arbeitspunkt, Lastgerade	403
19.8	Die Stromverstärkung a, b und g	405
19.9	Abhängigkeiten der Stromverstärkung.....	406
19.10	Wahl des Arbeitspunktes	408
19.11	Die Grundsaltungen im Detail	411
19.11.1	Die Emitterschaltung.....	411
19.11.1.1	Eingangsimpedanz	411
19.11.1.2	Ausgangsimpedanz	412
19.11.1.3	Wechselspannungsverstärkung.....	412
19.11.1.4	Leistungsverstärkung.....	413
19.11.1.5	Verhalten bei hohen Frequenzen.....	415
19.11.2	Die Basisschaltung	416
19.11.2.1	Eingangsimpedanz	416
19.11.2.2	Ausgangsimpedanz	416
19.11.2.3	Wechselspannungsverstärkung.....	416
19.11.2.4	Leistungsverstärkung.....	417
19.11.2.5	Verhalten bei hohen Frequenzen.....	417
19.11.3	Die Kollektorschaltung	417
19.11.3.1	Eingangsimpedanz	417
19.11.3.2	Ausgangsimpedanz	418
19.11.3.3	Wechselspannungsverstärkung.....	419
19.11.3.4	Leistungsverstärkung.....	419
19.11.3.5	Verhalten bei hohen Frequenzen.....	419
19.12	Rückkopplung	420
19.13	Emitterstufe mit Gegenkopplung.....	425
19.14	Ersatzschaltungen des Transistors.....	427
19.14.1	Die formale Ersatzschaltung	428
19.14.2	Die physikalische Ersatzschaltung.....	431
19.15	Spezielle Schaltungen mit Bipolartransistoren.....	437
19.15.1	Darlington-Schaltung	437
19.15.2	Bootstrap-Schaltung	437
19.15.3	Kaskodeschaltung	438

19.15.4	Konstantstromquelle	439
19.15.5	Differenzverstärker	440
19.15.6	Selektivverstärker	443
19.15.7	Oszillatoren	443
19.16	Der Transistor als Schalter	444
19.16.1	Schalttransistor im Sperrzustand	445
19.16.2	Schalttransistor im Durchlaßzustand	446
19.16.3	Dynamisches Schaltverhalten	446
19.16.4	Verkürzung der Schaltzeiten	447
19.16.5	Beispiele für die Anwendung von Schalttransistoren	448
19.16.5.1	Schalten einer Last	448
19.16.5.2	Astabile Kippschaltung (Multivibrator)	450
19.16.5.3	Monostabile Kippschaltung (Univibrator, Monoflop)	451
19.16.5.4	Bistabile Kippschaltung (Flipflop)	452
19.16.5.5	Schmitt-Trigger	453
19.17	Transistoren in der Digitaltechnik	454
19.17.1	Kodes, Logische Funktionen, Schaltalgebra	454
19.17.2	Schaltungstechnische Realisierung der logischen Grundfunktionen	459
19.18	Zusammenfassung: Bipolare Transistoren	465
20	Feldeffekt-Transistoren	469
20.1	Bezeichnungen und Klassifizierung	469
20.2	Sperrschicht-FET mit N-Kanal	472
20.2.1	Aufbau und Arbeitsweise	472
20.2.2	Kennlinien und Arbeitsbereiche	473
20.3	Schaltungstechnik mit FETs (Beispiele)	475
20.3.1	Verstärkerbetrieb	476
20.3.1.1	Sourceschaltung	476
20.3.1.2	Gateschaltung	476
20.3.1.3	Drainschaltung	476
20.3.1.4	Verstärkung mit Gegenkopplung	477
20.3.2	Betrieb als steuerbarer Widerstand	477
20.3.3	Konstantstromquelle mit FET	478
20.3.4	Der FET als Schalter	478
20.4	Zusammenfassung: Feldeffekt-Transistoren	481
21	Operationsverstärker	483
21.1	Interner Aufbau von Operationsverstärkern	483
21.2	Eigenschaften des Operationsverstärkers	484
21.2.1	Leerlaufverstärkung	484
21.2.2	Übertragungskennlinie	485
21.2.3	Gleichtaktaussteuerung	486
21.2.4	Offsetspannung	486
21.2.5	Frequenzverhalten	487
21.2.6	Sprungverhalten	487
21.3	Betriebsarten	488
21.4	Grundsaltungen, Anwendungsbeispiele	489
21.4.1	Nichtinvertierender Verstärker	489
21.4.2	Invertierender Verstärker	490
21.4.3	Impedanzwandler (Spannungsfolger)	491
21.4.4	Differenzverstärker (Subtrahierer)	491
21.4.5	Addierer (Summierer)	492
21.4.6	Aktive Filter	492
21.5	Zusammenfassung: Operationsverstärker	493
22	Literaturverzeichnis	495
	Anhang	497
A.1	Die Stromteilerregel	497
A.2	Bestimmung des Innenwiderstandes eines Netzwerkes	498
A.3	Harmonische Schwingung	500
A.4	Die Stromdichte	504
A.5	Magnetische Kreise	506
A.6	Phasenwinkel zwischen Strom und Spannung	511
	Sachverzeichnis	513