

Inhaltsverzeichnis

1	Ladung, Strom und Spannung	1
1.1	Das Wesen der Elektrizität	1
1.2	Der Aufbau der Materie	2
1.2.1	Stoffe	2
1.2.2	Zusammenfassung: Stoffe	4
1.2.3	Beispiel zur Zerlegung der Materie	4
1.2.4	Atome und Moleküle	5
1.2.5	Elektronen, Protonen und Neutronen	6
1.2.6	Zusammenfassung: Der Aufbau der Materie	9
1.3	Elektrischer Strom	9
1.4	Nichtleiter, Leiter und Halbleiter	11
1.5	Elektrische Spannung	12
1.6	Widerstand und Leitfähigkeit	14
1.7	Halbleiter	15
1.7.1	Elektrizitätsleitung in reinen Halbleitern	15
1.7.2	Elektrizitätsleitung in dotierten Halbleitern (Störstellenleitung)	18
1.7.3	Zusammenfassung: Halbleiter	20
1.8	Zusammenfassung: Ladung, Strom und Spannung	20
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	29
2.1.4	Die Größe für den elektrischen Widerstand	31
2.1.5	Zusammenfassung: Größen im Gleichstromkreis	32
2.2	Das Ohm'sche Gesetz	32
2.2.1	Aussage des Ohm'schen Gesetzes	32
2.2.2	Rechnen mit dem Ohm'schen Gesetz	33

2.2.3	Grafische Darstellung des Ohm'schen Gesetzes	35
2.2.4	Zusammenfassung: Das Ohm'sche Gesetz	35
2.3	Definitionen	36
2.3.1	Gleichstrom, Gleichspannung, Wechselstrom, Wechselspannung	36
2.3.2	Verbraucher	37
2.3.3	Reihenschaltung	37
2.3.4	Parallelschaltung	38
2.3.5	Unverzweigter und verzweigter Stromkreis	38
2.3.6	Schaltzeichen und Schaltbild	38
2.3.7	Werte von Strömen und Spannungen in Schaltbildern	41
2.3.8	Kurzschluss	44
2.3.9	Aktive und passive Bauelemente	46
2.3.10	Zusammenfassung: Definitionen	46
2.4	Arbeit und Leistung	47
2.4.1	Elektrische Arbeit	47
2.4.2	Elektrische Leistung	48
2.5	Wirkungsgrad	50
2.6	Die Stromdichte	51
2.6.1	Homogener Stromfluss	52
2.6.2	Inhomogener Stromfluss	54
2.6.3	Praktische Bedeutung der Stromdichte	55
3	Lineare Bauelemente im Gleichstromkreis	57
3.1	Definition des Begriffes „linear“	57
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
3.2.4	Widerstand als Bauelement	67
3.2.5	Zusammenfassung: Der ohmsche Widerstand	77
3.3	Der Kondensator	78
3.3.1	Wirkungsweise des Kondensators	78
3.3.2	Größe für die Kapazität	79
3.3.3	Plattenkondensator	81
3.3.4	Dielektrikum	82
3.3.5	Verwendungszweck von Kondensatoren	86
3.3.6	Kondensator als Bauelement	90
3.3.7	Kenngrößen von Kondensatoren	92
3.3.8	Elektrisches Feld	93
3.3.9	Die allgemeine Bedeutung von \vec{D} , \vec{P} und ϵ_r	96
3.3.10	Zusammenfassung: Der Kondensator	97

3.4	Die Spule	98
3.4.1	Grundlagen des Magnetismus	98
3.4.2	Zusammenfassung: Grundlagen des Magnetismus	103
3.4.3	Felder von stromführenden Leitern	103
3.4.4	Wirkungsweise der Spule.	106
3.4.5	Aufbau der Spule	118
3.4.6	Verwendungszweck von Spulen.	119
3.4.7	Spule als Bauelement.	120
3.4.8	Kenngrößen von Spulen.	121
3.4.9	Magnetische Kreise	122
3.5	Zusammenfassung: Die Spule	129
4	Gleichspannungsquellen.	131
4.1	Primärelemente (galvanische Elemente, Batterien)	132
4.1.1	Wirkungsweise des galvanischen Elements.	132
4.1.2	Batterien.	133
4.2	Sekundärelemente (Akumulatoren)	134
4.2.1	Der Bleiakkumulator	134
4.2.2	Nickel-Cadmium-Akkumulatoren	135
4.2.3	Nickel-Metallhydrid- und Lithium-Ionen-Akkumulatoren	135
4.2.4	Technische Eigenschaften von Akkumulatoren	136
4.3	Netzgeräte	137
4.4	Störungsfreie Versorgung mit Gleichspannung	138
4.5	Die belastete Gleichspannungsquelle	139
4.5.1	Reale Spannungsquelle	139
4.5.2	Ermittlung des Innenwiderstandes	142
4.5.3	Kurzschlussstrom.	143
4.5.4	Leerlauf	144
4.5.5	Anpassungen	144
4.6	Stromquelle	146
4.7	Zusammenfassung: Gleichspannungsquellen	147
5	Berechnungen im unverzweigten Gleichstromkreis	149
5.1	Reihen- und Parallelschaltung von Zweipolen	149
5.2	Reihenschaltung von ohmschen Widerständen	150
5.3	Reihenschaltung von Kondensatoren	155
5.4	Reihenschaltung von Spulen	157
5.5	Reihenschaltung von Gleichspannungsquellen	157
5.6	Reihenschaltung von Widerständen, Kondensatoren und Spulen	158
5.6.1	Zusammenfassung von Bauelementen.	158
5.6.2	Reihenschaltung von Kondensator und R oder L	158
5.6.3	Reihenschaltung einer Spule mit R oder C	159

5.7	Reihenschaltung in der Praxis	159
5.7.1	Ersatz von Bauteilen	159
5.7.2	Vorwiderstand	159
5.7.3	Spannungsabfall an Leitungen	160
5.7.4	Spannungsteiler	161
5.8	Zusammenfassung: Berechnungen im unverzweigten Gleichstromkreis	161
6	Messung von Spannung und Strom	163
6.1	Voltmeter und Amperemeter	163
6.2	Erweiterung des Messbereiches eines Voltmeters	167
6.3	Indirekte Messung von Widerstand und Leistung	168
7	Schaltvorgänge im unverzweigten Gleichstromkreis	171
7.1	Schaltvorgang beim ohmschen Widerstand	172
7.1.1	Widerstand einschalten	172
7.1.2	Widerstand ausschalten	172
7.2	Schaltvorgang beim Kondensator	173
7.2.1	Kondensator laden (einschalten)	173
7.2.2	Kondensator ausschalten	176
7.2.3	Kondensator entladen	176
7.2.4	Exponentialfunktion von Spannung und Strom	177
7.3	Schaltvorgang bei der Spule	182
7.3.1	Spule einschalten	182
7.3.2	Spule ausschalten (mit Abschalt-Induktionsstromkreis)	183
7.3.3	Spule ausschalten (ohne Abschalt-Induktionsstromkreis)	185
7.3.4	Zeitverlauf von Spannung und Strom	189
7.4	Zusammenfassung: Schaltvorgänge im unverzweigten Gleichstromkreis	190
8	Der verzweigte Gleichstromkreis	191
8.1	Die Kirchhoff'schen Gesetze	192
8.1.1	Die Knotenregel (1. Kirchhoff'sches Gesetz)	192
8.1.2	Die Maschenregel (2. Kirchhoff'sches Gesetz)	193
8.2	Berechnung von Parallelschaltungen	194
8.2.1	Parallelschaltung von ohmschen Widerständen	194
8.2.2	Die Stromteilerregel	197
8.2.3	Parallelschaltung von Kondensatoren	199
8.2.4	Parallelschaltung von Spulen	199
8.2.5	Parallelschaltung von Gleichspannungsquellen	199
8.3	Parallelschaltung in der Praxis	200
8.3.1	Ersatz von Bauteilen	200

8.3.2	Erweiterung des Messbereiches eines Amperemeters	201
8.3.3	Der belastete Spannungsteiler	203
8.3.4	Berechnung des belasteten Spannungsteilers.	204
8.4	Gemischte Schaltungen	206
8.5	Stern-Dreieck- und Dreieck-Stern-Umwandlung	208
8.6	Umwandlung von Quellen	211
8.7	Analyse von Netzwerken	213
8.7.1	Die Maschenanalyse	214
8.7.2	Die Knotenanalyse	221
8.7.3	Der Überlagerungssatz.	225
8.7.4	Der Satz von der Ersatzspannungsquelle.	227
8.7.5	Bestimmung des Innenwiderstandes eines Netzwerkes.	234
8.8	Vierpole	236
8.9	Zusammenfassung: Der verzweigte Gleichstromkreis	237
9	Wechselspannung und Wechselstrom	239
9.1	Grundlegende Betrachtungen.	239
9.2	Entstehung der Sinuskurve, Liniendiagramm	246
9.3	Relevanz sinusförmiger Wechselgrößen	249
9.4	Kennwerte von Wechselgrößen	250
9.4.1	Periodendauer	250
9.4.2	Frequenz.	251
9.4.3	Kreisfrequenz.	251
9.4.4	Wellenlänge	252
9.4.5	Amplitude	253
9.4.6	Spitze-Spitze-Wert	253
9.4.7	Effektivwert	254
9.4.8	Gleichrichtwert	258
9.4.9	Nullphasenwinkel.	260
9.4.10	Phasenverschiebung	261
9.5	Zusammenfassung: Kennwerte von Wechselgrößen	265
9.6	Zeigerdiagramm.	266
9.6.1	Zeigerdarstellung von Sinusgrößen	266
9.6.2	Phasenverschiebungswinkel im Zeigerdiagramm	269
9.7	Zusammenfassung: Zeigerdiagramm.	271
9.8	Zusammensetzung von Wechselspannungen	271
9.9	Oberschwingungen	274
9.9.1	Fourier-Reihen	276
9.9.2	Beispiel zur Fourier-Analyse	279
9.9.3	Bedeutung der Fourier-Analyse	282
9.9.4	Klirrfaktor	284

10 Komplexe Darstellung von Sinusgrößen	285
10.1 Grundbegriffe der komplexen Rechnung	285
10.1.1 Rechenregeln für imaginäre Zahlen	290
10.1.2 Rechenregeln für komplexe Zahlen	291
10.1.3 Vorteile komplexer Zahlen	295
10.1.4 Sinusförmige Wechselspannung in komplexer Darstellung	299
10.1.5 Der komplexe Widerstand	305
10.2 Zusammenfassung: Komplexe Darstellung von Sinusgrößen	308
11 Einfache Wechselstromkreise	311
11.1 Ohm'scher Widerstand im Wechselstromkreis	312
11.2 Spule im Wechselstromkreis	315
11.3 Kondensator im Wechselstromkreis	319
11.4 Reihenschaltung aus ohmschem Widerstand und Spule	323
11.4.1 Komplexer Frequenzparameter „ <i>s</i> “	323
11.4.2 Anwendung von <i>s</i> bei der <i>RL</i> -Reihenschaltung	324
11.5 Reihenschaltung aus ohmschem Widerstand und Kondensator	330
11.6 <i>RC</i> -Reihenschaltung in der Praxis	333
11.6.1 Die Übertragungsfunktion	333
11.6.2 Verstärkungsmaß, Dezibel	337
11.6.3 Bode-Diagramm	339
11.6.4 Dämpfung	340
11.6.5 Grenzfrequenz	340
11.6.6 Normierte Übertragungsfunktion	340
11.6.7 Der <i>RC</i> -Tiefpass	341
11.6.8 Bode-Diagramme mit Mathcad	345
11.6.9 Filterung eines gestörten Sinussignals	349
11.6.10 Der <i>RC</i> -Hochpass	350
11.7 Reihenschaltung aus Spule, Widerstand und Kondensator	353
11.8 Parallelschaltung aus Widerstand und Spule	354
11.9 Parallelschaltung aus Widerstand und Kondensator	355
11.10 Zusammenfassung: Einfache Wechselstromkreise	356
12 Ersatzschaltungen für Bauelemente	359
12.1 Die elektrische Leitung	360
12.2 Widerstand mit Eigenkapazität und Eigeninduktivität	361
12.3 Verluste in Spulen	361
12.3.1 Wicklungsverluste	361
12.3.2 Verluste durch den Skineffekt	362
12.3.3 Hystereseverluste	363
12.3.4 Wirbelstromverluste	364

12.4	Verluste im Kondensator	364
12.5	Zusammenfassung: Ersatzschaltungen für Bauelemente	365
13	Leistung im Wechselstromkreis	367
13.1	Reine Wirkleistung	367
13.2	Reine Blindleistung	369
13.3	Wirk- und Blindleistung	371
13.4	Scheinleistung	372
13.5	Blindleistungskompensation	374
13.6	Zusammenfassung: Leistung im Wechselstromkreis	376
14	Transformatoren (Übertrager)	379
14.1	Grundprinzip	379
14.2	Transformator mit Eisenkern	380
14.3	Der ideale Transformator	382
14.3.1	Transformation der Spannungen	383
14.3.2	Transformation der Stromstärken	384
14.3.3	Transformation des Widerstandes	384
14.4	Der verlustlose Transformator ohne Streuung	385
14.5	Der verlustlose Transformator mit Streuung	386
14.6	Der reale Transformator	388
14.7	Frequenzverhalten des NF-Übertragers	388
14.8	Übertrager zwischen ohmschen Widerständen	389
14.8.1	Idealer Übertrager unter Vernachlässigung der Wicklungswiderstände	389
14.8.2	Idealer Übertrager mit Wicklungswiderständen	390
14.9	Spezielle Ausführungen von Transformatoren	394
14.10	Zusammenfassung: Transformatoren (Übertrager)	394
15	Schwingkreise	397
15.1	Reihenschwingkreis ohne Verluste	397
15.2	Reihenschwingkreis mit Verlusten	401
15.3	Parallelschwingkreis ohne Verluste	413
15.4	Parallelschwingkreis mit Verlusten	414
15.5	Zeitverhalten elektrischer Schwingkreise	425
15.6	Grundsätzliche Kopplungsarten	426
15.6.1	Galvanische Kopplung	427
15.6.2	Induktive Kopplung	427
15.6.3	Kapazitive Kopplung	427
15.6.4	Fußpunktikopplung	427
15.7	Bandfilter	428
15.8	Kopplungsarten bei Bandfiltern	430
15.8.1	Transformatorische Kopplung	430

15.8.2	Induktive Kopplung mit Koppelspule	431
15.8.3	Kapazitive Kopfpunktkopplung	431
15.8.4	Kapazitive Fußpunktkopplung	432
15.9	Zusammenschaltung von Schwingkreisen	432
15.9.1	<i>RLC</i> -Bandpass	432
15.9.2	<i>RLC</i> -Bandsperre	433
15.10	Zusammenfassung: Schwingkreise	434
16	Mehrphasensysteme	437
16.1	Erzeugung von Drehstrom	437
16.1.1	Sternschaltung des Generators	439
16.1.2	Dreieckschaltung des Generators	442
16.2	Verbraucher im Drehstromsystem	442
16.2.1	Sternschaltung des Verbrauchers mit Mittelleiter	442
16.2.2	Sternschaltung des Verbrauchers ohne Mittelleiter	444
16.2.3	Dreieckschaltung des Verbrauchers	449
16.3	Leistung bei Drehstrom	451
16.4	Zusammenfassung: Mehrphasensysteme	452
17	Analyse allgemeiner Wechselstromnetze	455
18	Halbleiterdioden	469
18.1	Der pn-Übergang ohne äußere Spannung	469
18.2	Der pn-Übergang mit äußerer Spannung	473
18.2.1	Äußere Spannung in Durchlassrichtung	473
18.2.2	Äußere Spannung in Sperrrichtung	476
18.2.3	Vollständige Kennlinie eines pn-Übergangs	479
18.3	Beschreibung der Diode durch Gleichungen	481
18.3.1	Shockley-Gleichung	481
18.3.2	Vereinfachung für den Durchlassbereich	482
18.3.3	Vereinfachung für den Sperrbereich	483
18.4	Linearisierung der Durchlasskennlinie in einem Arbeitspunkt	485
18.4.1	Arbeitspunkt	485
18.4.2	Gleichstromwiderstand	486
18.4.3	Wechselstromwiderstand	486
18.5	Näherungen für die Diodenkennlinie	488
18.5.1	Die ideale Diode	488
18.5.2	Berücksichtigung der Schleusenspannung	488
18.5.3	Berücksichtigung des Bahnwiderstandes	489
18.6	Kenn- und Grenzwerte von Dioden	496
18.7	Schaltverhalten von Dioden	497
18.7.1	Diode einschalten	498
18.7.2	Diode ausschalten	498

18.8	Temperaturabhängigkeit der Diodenkennlinie	500
18.8.1	Temperaturabhängigkeit des Sperrstromes	500
18.8.2	Temperaturabhängigkeit der Durchlassspannung	501
18.9	Diode und Verlustleistung	502
18.10	Arten von Dioden	508
18.10.1	Universaldioden	508
18.10.2	Spezialdioden	509
18.11	Arbeitspunkt und Widerstandsgerade	526
18.11.1	Widerstandsgerade, einfache Anleitung	527
18.11.2	Widerstandsgerade, rechnerisches Verfahren	529
18.11.3	Widerstandsgerade, Strahlensatz	530
18.11.4	Mathematische Näherungslösung durch Iteration	531
18.12	Anwendungen von Dioden	536
18.12.1	Gleichrichtung von Wechselspannungen	536
18.12.2	Schutzdiode, Freilaufdiode	551
18.12.3	Eingangsschutzschaltung	552
18.12.4	Begrenzung einer Wechselspannung	553
18.13	Zusammenfassung: Halbleiterdioden	554
19	Bipolare Transistoren	557
19.1	Definition und Klassifizierung von Transistoren	557
19.2	Aufbau des Bipolartransistors	559
19.3	Richtung von Strömen und Spannungen beim Transistor	561
19.4	Wirkungsweise	562
19.5	Die drei Grundschaltungen des Transistors	568
19.6	Betriebsarten	568
19.6.1	Verstärkerbetrieb	568
19.6.2	Schalterbetrieb	570
19.7	Kennlinien des Transistors in Emitterschaltung	573
19.7.1	Eingangskennlinie	573
19.7.2	Übertragungskennlinie (Steuerkennlinie)	578
19.7.3	Ausgangskennlinien	586
19.7.4	Vierquadranten-Kennlinienfeld, Arbeitspunkt, Lastgerade	594
19.8	Abhängigkeiten der Stromverstärkung	596
19.8.1	Stromverstärkung in Abhängigkeit von Arbeitspunkt und Temperatur	596
19.8.2	Stromverstärkung in Abhängigkeit der Grundschaltung . . .	598
19.8.3	Stromverstärkung in Abhängigkeit der Frequenz, Grenzfrequenzen	600
19.9	Wahl des Arbeitspunktes	603
19.9.1	Erlaubter Arbeitsbereich	603

19.9.2	Betriebsarten als Verstärker	604
19.10	Die Grundschaltungen im Detail	606
19.10.1	Die Emitterschaltung	606
19.10.2	Die Basisschaltung	612
19.10.3	Die Kollektorschaltung	614
19.11	Rückkopplung	617
19.11.1	Allgemeine Folgen der Gegenkopplung	620
19.11.2	Emitterstufe mit Gegenkopplung	624
19.12	Ersatzschaltungen des Transistors	627
19.12.1	Die formale Ersatzschaltung	627
19.12.2	Die physikalische Ersatzschaltung	632
19.13	Spezielle Schaltungen mit Bipolartransistoren	637
19.13.1	Darlington-Schaltung	637
19.13.2	Bootstrap-Schaltung	637
19.13.3	Kaskodeschaltung	638
19.13.4	Konstantstromquelle	639
19.13.5	Differenzverstärker	641
19.13.6	Selektivverstärker	644
19.13.7	Oszillatoren	645
19.14	Der Transistor als Schalter	646
19.14.1	Schalttransistor im Sperrzustand	647
19.14.2	Schalttransistor im Durchlasszustand	648
19.14.3	Dynamisches Schaltverhalten	649
19.14.4	Verkürzung der Schaltzeiten	651
19.14.5	Beispiele für die Anwendung von Schalttransistoren	652
19.15	Transistoren in der Digitaltechnik	659
19.15.1	Kodes, Logische Funktionen, Schaltalgebra	659
19.15.2	Schaltungstechnische Realisierung der logischen Grundfunktionen	664
19.16	Zusammenfassung: Bipolare Transistoren	669
20	Feldeffekttransistoren	673
20.1	Bezeichnungen und Klassifizierung	673
20.2	Sperrsicht-FET (JFET) mit n-Kanal	678
20.2.1	Aufbau und Arbeitsweise	678
20.2.2	Kennlinien und Arbeitsbereiche des JFETs	679
20.3	NMOS Transistor (MOSFET mit n-Kanal)	684
20.3.1	Aufbau und Arbeitsweise	684
20.3.2	Kennlinien des MOSFETs	688
20.4	p-Kanal MOS (PMOS) Transistor	692
20.4.1	Anschlüsse	692
20.4.2	Dynamische Parameter	692

20.5	Schaltungstechnik mit einzelnen FETs (Beispiele)	693
20.5.1	Die drei Grundschaltungen des Feldeffekttransistors	693
20.5.2	Verstärkerbetrieb	694
20.5.3	Betrieb als steuerbarer Widerstand	696
20.5.4	Konstantstromquelle mit FET	697
20.5.5	Der FET als Schalter	697
20.5.6	Inversdiode	698
20.5.7	Lowside-, Highside-Schalter	699
20.6	Grundlagen der CMOS Technik	706
20.6.1	Der CMOS Inverter	706
20.6.2	Das Transfer-Gatter	708
20.7	Zusammenfassung: Feldeffekttransistoren	710
21	Operationsverstärker	713
21.1	Begriffe, Anwendungsbereiche	713
21.2	Interner Aufbau von Operationsverstärkern	714
21.3	Eigenschaften des Operationsverstärkers	716
21.3.1	Leerlaufspannungsverstärkung	716
21.3.2	Eingangswiderstände, Eingangsströme	717
21.3.3	Ausgangswiderstand	717
21.3.4	Übertragungskennlinie	718
21.3.5	Gleichtaktverstärkung, Gleichtaktunterdrückung	719
21.3.6	Offsetspannung	720
21.3.7	Frequenzverhalten	721
21.3.8	Sprungverhalten	724
21.4	Der ideale Operationsverstärker	724
21.5	Einsatz von Operationsverstärkern	725
21.5.1	Grundschaltungen	725
21.5.2	Anwendungsbeispiele	738
21.6	Zusammenfassung: Operationsverstärker	743
Anhang		745
Literatur		755
Stichwortverzeichnis		757