

Inhaltsverzeichnis

1	Gleichstrom	1
1.1	Grundgrößen, Grundgesetze	1
1.1.1	Elektrische Ladung, Elementarladung	1
1.1.2	Elektrischer Strom	1
1.1.3	Spannung und Potenzial	2
1.1.4	Ohm'sches Gesetz	3
1.1.5	Widerstand und Leitwert	3
1.1.6	Temperaturabhängigkeit des Widerstandes	3
1.1.7	Induktivität	4
1.1.8	Kapazität	5
1.1.9	Ideale Spannungsquelle	5
1.1.10	Ideale Stromquelle	6
1.1.11	Kirchhoff'sches Gesetz	6
1.1.11.1	1. Kirchhoff'scher Satz (Knotenpunktregel)	6
1.1.11.2	2. Kirchhoff'scher Satz (Maschenregel)	7
1.1.12	Leistung und Energie	7
1.1.12.1	Energie und Leistung am ohmschen Widerstand	8
1.1.12.2	Energie in einer Induktivität	9
1.1.12.3	Energie in der Kapazität	9
1.1.13	Wirkungsgrad	10
1.1.14	Leistungsanpassung	11
1.2	Grundsaltungen	11
1.2.1	Reale Spannungs- und Stromquellen	11
1.2.1.1	Reale Spannungsquelle	11
1.2.1.2	Reale Stromquelle	12
1.2.1.3	Umrechnung von Spannungs- in Stromquellen und umgekehrt	13
1.2.2	Reihen- und Parallelschaltung von Bauelementen	14
1.2.2.1	Reihenschaltung von Widerständen	14
1.2.2.2	Parallelschaltung von Widerständen	14
1.2.2.3	Reihenschaltung von Leitwerten	15
1.2.2.4	Parallelschaltung von Leitwerten	15
1.2.2.5	Reihenschaltung von Induktivitäten	15
1.2.2.6	Parallelschaltung von Induktivitäten	16
1.2.2.7	Reihenschaltung von Kapazitäten	16
1.2.2.8	Parallelschaltung von Kapazitäten	17
1.2.3	Stern-Dreieck-Umrechnung	17
1.2.4	Spannungs- und Stromteilerregel	18
1.2.4.1	Spannungsteilerregel	18
1.2.4.2	Stromteilerregel	18
1.2.4.3	Kapazitive und induktive Teiler	19
1.2.5	RC - und RL -Kombinationen	19
1.2.5.1	Reihenschaltung von R und C an einer Spannungsquelle	21
1.2.5.2	Reihenschaltung von R und C an einer Stromquelle	21
1.2.5.3	Parallelschaltung von R und C an einer Stromquelle	22
1.2.5.4	Parallelschaltung von R und C an einer Spannungsquelle	22
1.2.5.5	Reihenschaltung von R und L an einer Spannungsquelle	22

1.2.5.6	Reihenschaltung von R und L an einer Stromquelle	23
1.2.5.7	Parallelschaltung von R und L an einer Spannungsquelle	23
1.2.5.8	Parallelschaltung von R und L an einer Stromquelle	24
1.2.6	RLC -Kombinationen	24
1.3	Berechnungsverfahren für lineare Netzwerke	29
1.3.1	Zählpfeile und Vorzeichenregeln	29
1.3.2	Netzwerkberechnung mit Maschen- und Knotenpunktregel	30
1.3.3	Überlagerungssatz (Superposition)	31
1.3.4	Maschenstromanalyse	32
1.3.5	Knotenpotenzialanalyse	33
1.3.6	Aktive und passive Zweipole	34
1.3.7	Zweipolverfahren	34
1.4	Formelzeichen	37
1.5	Weiterführende Literatur	38
2	Elektrische Felder	39
2.1	Elektrostatistisches Feld	39
2.1.1	Coulomb'sches Gesetz	39
2.1.2	Definition der elektrischen Feldstärke	40
2.1.3	Spannung und Potenzial	41
2.1.4	Influenz	42
2.1.5	Verschiebungsdichte (elektrische Erregung)	43
2.1.6	Dielektrikum	44
2.1.7	Coulombintegral	45
2.1.8	Gauß'scher Satz der Elektrostatik	46
2.1.9	Kapazität	47
2.1.10	Elektrostatistisches Feld an Grenzflächen	48
2.1.11	Übersicht: Felder und Kapazitäten verschiedener geometrischer Anordnungen	49
2.1.12	Energie im elektrostatischen Feld	50
2.1.13	Kräfte im elektrostatischen Feld	51
2.1.13.1	Kraft auf eine Ladung	51
2.1.13.2	Kraft auf Grenzflächen	51
2.1.14	Übersicht: Eigenschaften des elektrostatischen Feldes	53
2.1.15	Zusammenhang der elektrostatischen Feldgrößen	54
2.2	Stationäres elektrisches Strömungsfeld	55
2.2.1	Spannung und Potenzial	55
2.2.2	Strom	55
2.2.3	Elektrische Feldstärke	55
2.2.4	Stromdichte	57
2.2.5	Spezifischer Widerstand, spezifischer Leitwert	58
2.2.6	Widerstand und Leitwert	59
2.2.7	Kirchhoff'sches Gesetz	60
2.2.7.1	1. Kirchhoff'scher Satz (Knotenpunktregel)	60
2.2.7.2	2. Kirchhoff'scher Satz (Maschenregel)	61
2.2.8	Das Strömungsfeld an Grenzflächen	62
2.2.9	Übersicht: Felder und Widerstände verschiedener geometrischer Anordnungen	63
2.2.10	Leistung und Energie im stationären elektrischen Strömungsfeld	64
2.2.11	Übersicht: Eigenschaften des stationären elektrischen Strömungsfeldes	65
2.2.12	Zusammenhang der Größen im stationären elektrischen Strömungsfeld	66
2.3	Magnetisches Feld	66
2.3.1	Kraft auf die bewegte Ladung	68

2.3.2	Definition der magnetischen Flussdichte	68
2.3.3	Gesetz von BIOT-SAVART	71
2.3.4	Magnetische Feldstärke	72
2.3.5	Magnetischer Fluss	73
2.3.6	Magnetische Spannung und Durchflutungssatz	74
2.3.7	Magnetischer Widerstand, magnetischer Leitwert, Induktivität	76
2.3.8	Materie im Magnetfeld	78
2.3.9	Das magnetische Feld an Grenzflächen	81
2.3.10	Der magnetische Kreis	81
2.3.11	Magnetischer Kreis mit Permanentmagnet	83
2.3.12	Übersicht: Induktivitäten verschiedener geometrischer Anordnungen	86
2.3.13	Induktion	87
2.3.13.1	Induktion im bewegten elektrischen Leiter	87
2.3.13.2	Das allgemeine Induktionsgesetz	88
2.3.13.3	Selbstinduktion	92
2.3.14	Gegeninduktion	93
2.3.15	Transformatorprinzip	94
2.3.16	Energie im magnetischen Feld	95
2.3.17	Kraft im magnetischen Feld	97
2.3.17.1	Kraft auf den stromdurchflossenen Leiter	97
2.3.17.2	Kraft auf Grenzflächen	98
2.3.18	Übersicht: Eigenschaften des magnetischen Feldes	98
2.3.19	Zusammenhang der magnetischen Feldgrößen	99
2.4	Maxwell'sche Gleichungen	100
2.5	Formelzeichen	101
2.6	Weiterführende Literatur	103
3	Wechselstrom	105
3.1	Mathematische Grundlagen der Wechselstromtechnik	105
3.1.1	Sinus- und Kosinusfunktionen	105
3.1.2	Komplexe Zahlen	107
3.1.2.1	Arithmetik im Komplexen	108
3.1.2.2	Darstellung komplexer Zahlen	109
3.1.2.3	Umrechnung zwischen verschiedenen Darstellungen der komplexen Zahlen	111
3.1.3	Rechenoperationen im Komplexen	111
3.1.3.1	Addition und Subtraktion im Komplexen	111
3.1.3.2	Multiplikation komplexer Zahlen	112
3.1.4	Übersicht: Rechnen mit komplexen Zahlen	113
3.1.5	Die komplexe Exponentialfunktion	114
3.1.5.1	Exponentialfunktion mit imaginärem Exponenten	114
3.1.5.2	Exponentialfunktion mit komplexem Exponenten	115
3.1.6	Trigonometrische Funktionen mit komplexem Argument	115
3.1.7	Von Sinusgrößen zu Zeigergrößen	116
3.1.7.1	Komplexe Amplitude	116
3.1.7.2	Anschauliche Beziehung zwischen Sinusgrößen und Zeigern	117
3.1.7.3	Addition und Subtraktion von Zeigergrößen	117
3.2	Sinusförmige Wechselgrößen	118
3.2.1	Kenngrößen sinusförmiger Wechselgrößen	119
3.2.2	Kenngrößen nicht sinusförmiger Wechselgrößen	122
3.3	Komplexer Widerstands- und Leitwertoperator	123
3.3.1	Widerstandsoperator	123

3.3.2	Komplexe Widerstände der Grundzweipole	124
3.3.2.1	Widerstand	124
3.3.2.2	Induktivität	125
3.3.2.3	Kapazität	125
3.3.3	Leitwertoperator	125
3.3.4	Komplexe Leitwerte der Grundzweipole	127
3.3.5	Übersicht: Komplexe Widerstände	127
3.4	Wechselstromwiderstände der Grundzweipole	128
3.5	Kombinationen von Zweipolen	130
3.5.1	Reihenschaltungen	130
3.5.1.1	Allgemeiner Fall	130
3.5.1.2	Widerstand und Induktivität in Reihe	130
3.5.1.3	Widerstand und Kapazität in Reihe	132
3.5.1.4	Widerstand, Induktivität und Kapazität in Reihe	133
3.5.2	Parallelschaltungen	135
3.5.2.1	Allgemeiner Fall	135
3.5.2.2	Widerstand und Induktivität parallel	136
3.5.2.3	Widerstand und Kapazität parallel	137
3.5.2.4	Widerstand, Induktivität und Kapazität parallel	138
3.5.3	Übersicht: Reihen- und Parallelschaltung	140
3.6	Netzwerkumformungen	142
3.6.1	Umwandlung von Parallel- in Reihenschaltung und umgekehrt	142
3.6.2	Stern-Dreieck-Wandlung und umgekehrt	143
3.6.3	Duale Schaltungen	145
3.7	Einfache Netzwerke	147
3.7.1	Komplexe Strom- und Spannungsteiler	147
3.7.2	Belasteter komplexer Spannungsteiler	148
3.7.3	Widerstandsanpassung	149
3.7.4	Spannungsteiler mit definierten Eingangs- und Ausgangswiderständen	151
3.7.5	Netzwerke zur Phasenverschiebung	152
3.7.5.1	RC-Phasenschieber	153
3.7.5.2	Sonstige Schaltungen zur Phasenverschiebung	154
3.7.6	Wechselstrombrücken	156
3.7.6.1	Abgleichbedingung	156
3.7.6.2	Anwendung: Messtechnik	157
3.8	Leistung im Wechselstromkreis	157
3.8.1	Augenblickleistung	157
3.8.1.1	Leistung am Wirkwiderstand	157
3.8.1.2	Leistung am Blindwiderstand	158
3.8.2	Mittlere Leistung	159
3.8.2.1	Wirkleistung	159
3.8.2.2	Blindleistung	160
3.8.2.3	Scheinleistung	161
3.8.3	Komplexe Leistung	162
3.8.4	Übersicht: Wechselstromleistung	162
3.8.5	Blindstromkompensation	164
3.9	Drehstrom	165
3.9.1	Mehrphasensysteme	165
3.9.2	Dreiphasensystem	165
3.9.3	Generator-Dreieckschaltung	168
3.9.4	Generator-Sternschaltung	169

3.10	Übersicht: Symmetrische Drehstromsysteme	170
3.11	Formelzeichen	172
3.12	Weiterführende Literatur	174
4	Elektrische Maschinen	175
4.1	Grundlagen des magnetischen Feldes	175
4.1.1	Erzeugung eines magnetischen Feldes	175
4.1.2	Motorprinzip	176
4.1.3	Generatorprinzip	176
4.1.4	Allgemeines Induktionsgesetz	177
4.1.5	Ferromagnetische Werkstoffe	178
4.1.6	Streuung	178
4.1.7	Eisenverluste	179
4.1.7.1	Hystereseverluste	179
4.1.7.2	Wirbelstromverluste	179
4.2	Drehmoment, mechanische Leistung und Beschleunigung	179
4.2.1	Typenschildangaben	180
4.2.2	Baugröße, Drehmoment, Leistung	180
4.2.3	Rechtslauf/Linkslauf	181
4.2.4	Drehzahl-Drehmoment-Arbeitspunkt	181
4.2.5	Beschleunigung und Hochlaufzeiten	181
4.2.5.1	Beschleunigung	182
4.2.5.2	Hochlaufzeit	182
4.2.5.3	Beschleunigungsweg	183
4.3	Transformatoren	185
4.3.1	Der ideale Transformator	185
4.3.2	Der reale Transformator	186
4.3.2.1	Messung der Leerlaufverluste P_0	187
4.3.2.2	Messung der Stromwärmeverluste	187
4.3.2.3	Betriebsverluste	188
4.3.3	Parallelschalten von Transformatoren	188
4.3.4	Spartransformatoren	189
4.3.5	Trenntransformatoren	189
4.3.6	Drehstromtransformatoren	189
4.4	Gleichstrommaschinen	191
4.4.1	Aufbau von Gleichstrommaschinen	191
4.4.1.1	Ankerquerfeld	192
4.4.1.2	Kompensationswicklung	192
4.4.1.3	Wendepolwicklung	193
4.4.2	Der drehende Rotor und sein Ersatzschaltbild	193
4.4.3	Nebenschluss- und Reihenschlussmaschinen	194
4.4.4	Nebenschlussmaschinen	195
4.4.5	Drehzahlverstellung beim Gleichstromnebenschlussmotor	196
4.4.5.1	Drehzahlverstellung durch Veränderung der Ankerspannung	196
4.4.5.2	Drehzahlverstellung mittels Feldschwächung	198
4.4.5.3	Drehzahlverstellung mittels Vorwiderstand	198
4.4.6	Reihenschlussmaschinen	198
4.4.7	Drehzahlsteuerung von Universalmotoren	201
4.4.8	Nebenschluss- und Reihenschlussverhalten	201
4.5	Drehstrommotoren	202
4.5.1	Erzeugung des Drehfeldes	202

4.5.2	Synchronmaschinen	203
4.5.3	Asynchronmotoren	204
4.5.3.1	Funktionsprinzip	204
4.5.3.2	Bemessungsdaten (Nenndaten) der Asynchronmaschine	206
4.5.3.3	Elektrisches Ersatzschaltbild der Asynchronmaschine	207
4.5.3.4	Drehzahl-Drehmomentverlauf	208
4.5.3.5	Einfluss des Läuferwiderstandes	209
4.5.3.6	Stromverdrängung	209
4.5.3.7	Einfluss der Speisespannung auf das Drehmoment	210
4.5.4	Die Stromortskurve der Drehstromasynchronmaschine	210
4.5.4.1	Konstruktion der Stromortskurve	212
4.5.4.2	Die reale Stromortskurve	212
4.5.5	Reduzierung des Anlaufstromes	212
4.5.5.1	Stern-Dreieck-Umschaltung	212
4.5.5.2	Sanftanlaufgeräte	213
4.5.6	Drehzahlverstellung von Asynchronmotoren	213
4.5.6.1	Polumschaltung	213
4.5.6.2	Frequenzumrichter	214
4.5.7	Generatorischer Betrieb der Asynchronmaschine	215
4.5.8	Bremsen der Drehstromasynchronmaschine	216
4.5.8.1	Generatorisches Bremsen	216
4.5.8.2	Gleichstrombremsen	216
4.5.9	Linearmotor	216
4.5.10	Einphasig gespeister Drehstromasynchronmotor	217
4.6	Kleinmotoren	218
4.6.1	Kondensatormotor	218
4.6.2	Spaltpolmotor	218
4.6.3	Schrittmotor	219
4.7	Formelzeichen	220
4.8	Weiterführende Literatur	221
5	Messung von Strom, Spannung, Leistung	223
5.1	Elektrische Messwerke	223
5.1.1	Drehspulmesswerk	223
5.1.2	Kreuzspulmesswerk	224
5.1.3	Elektrodynamisches Messwerk	224
5.1.4	Dreheisenmesswerk	225
5.1.5	Weitere Messwerke	225
5.1.6	Übersicht: Elektrische Messwerke	227
5.2	Messung von Gleichstrom und Gleichspannung	228
5.2.1	Drehspulinstrument	228
5.2.2	Messbereichserweiterung für Strommessungen	228
5.2.3	Messbereichserweiterung für Spannungsmessungen	230
5.2.4	Überlastschutz	230
5.2.5	Systematische Messabweichungen	230
5.3	Messung von Wechselspannung und Wechselstrom	231
5.3.1	Drehspulinstrument mit Gleichrichter	231
5.3.2	Dreheiseninstrument	233
5.3.3	Messbereichserweiterung durch Messwandler	233
5.3.4	Effektivwertmessung	234
5.4	Berührungslose Messung von Gleich- und Wechselströmen	235

5.5	Leistungsmessung	237
5.5.1	Leistungsmessung im Gleichstromkreis	237
5.5.2	Leistungsmessung im Wechselstromkreis	238
5.5.2.1	Drei-Voltmeter-Methode	239
5.5.2.2	Leistungsfaktormessung	240
5.5.3	Leistungsmessung im Drehstromkreis	241
5.5.3.1	Messung der Wirkleistung im Drehstromnetz	241
5.5.3.2	Messung der Blindleistung im Drehstromnetz	242
5.5.3.3	Leistungsmesskoffer	243
5.6	Digitale Messung von Gleichspannung	245
5.6.1	Parallel-Umsetzer (Flashconverter)	245
5.6.2	Kompensationsverfahren	246
5.6.3	Nachlauf-Umsetzer	247
5.6.4	Sukzessive Approximation	247
5.6.5	Einrampenverfahren	248
5.6.6	Zweirampenverfahren	249
5.6.7	Abtast-Halte-Kreis	250
5.6.8	Übersicht: Verfahren zur Analog/Digital-Umsetzung	251
5.6.9	Schaltzeichen für Analog/Digital-Umsetzer	251
5.7	Digital/Analog-Umsetzung	251
5.7.1	Schaltzeichen für Digital/Analog-Umsetzer	251
5.7.2	Parallelverfahren	251
5.7.3	Wägeverfahren	252
5.7.4	Deglitching	253
5.7.5	Pulsweitenmodulation	253
5.7.6	Übersicht: Auflösung und Codierung bei ADU und DAU	254
5.8	Messfehler	255
5.8.1	Systematische und zufällige Fehler	255
5.8.2	Garantie-Fehlergrenzen	255
5.9	Übersicht: Hinweiszeichen auf Messinstrumenten	256
5.10	Übersicht: Messverfahren	257
5.11	Formelzeichen	258
5.12	Weiterführende Literatur	259
6	Netzwerke bei veränderlicher Frequenz	261
6.1	Lineare Systeme	261
6.2	Filter	264
6.2.1	Tiefpass	264
6.2.2	Hochpass	265
6.2.3	Bandpass	265
6.2.4	Bandsperre	266
6.2.5	Allpass	266
6.3	Einfache Filter	266
6.3.1	Tiefpass	266
6.3.2	Frequenznormierung	268
6.3.3	Hochpass	270
6.3.4	Filter höherer Ordnung	272
6.3.5	Bandpass	273
6.3.6	Realisierungen von Filtern	275
6.4	Formelzeichen	276
6.5	Weiterführende Literatur	277

7	Signale und Systeme	279
7.1	Signale	279
7.1.1	Definitionen	279
7.1.2	Symmetrie-Eigenschaften von Signalen	280
7.2	FOURIER-Reihe	281
7.2.1	Trigonometrische Form	281
7.2.2	Amplituden-Phasen-Form	283
7.2.3	Exponential-Form	283
7.2.4	Übersicht: FOURIER-Reihendarstellung	285
7.2.5	Nützliche Integrale bei der Berechnung von FOURIER-Koeffizienten	286
7.2.6	Tabelle: FOURIER-Reihen	287
7.2.7	Anwendung der FOURIER-Reihen	289
7.2.7.1	Spektrum eines Rechtecksignals	289
7.2.7.2	Spektrum eines Sägezahnsignals	290
7.2.7.3	Spektrum eines zusammengesetzten Signals	291
7.3	Systeme	292
7.3.1	System-Eigenschaften	292
7.3.1.1	Lineare Systeme	292
7.3.1.2	Kausale Systeme	293
7.3.1.3	Zeitinvariante Systeme	293
7.3.1.4	Stabile Systeme	294
7.3.1.5	LTI-Systeme	294
7.3.2	Elementarsignale	294
7.3.2.1	Die Sprungfunktion	294
7.3.2.2	Die Rechteckfunktion	295
7.3.2.3	Der Dreieckimpuls	295
7.3.2.4	Der Gaußimpuls	295
7.3.2.5	Die Stoßfunktion (DIRAC-Funktion)	296
7.3.3	Verschiebung und Dehnung eines Zeitsignals	297
7.3.4	Systemreaktionen	298
7.3.4.1	Impulsantwort	299
7.3.4.2	Sprungantwort	299
7.3.4.3	Systemantwort bei beliebigem Eingangssignal	300
7.3.4.4	Rechenregeln der Faltung	301
7.3.4.5	Übertragungsfunktion	302
7.3.4.6	Berechnung der Systemantwort im Frequenzbereich	303
7.3.5	Berechnung der Impuls- und Sprungantwort	304
7.3.5.1	Normierung von Schaltkreisen	304
7.3.5.2	Impuls/Sprungantwort von Systemen erster Ordnung	305
7.3.5.3	Impuls-/Sprungantwort von Systemen zweiter Ordnung	306
7.3.6	Ideale Systeme	309
7.3.6.1	Das verzerrungsfreie System	309
7.3.6.2	Der ideale Tiefpass	310
7.3.6.3	Der ideale Bandpass	313
7.4	FOURIER-Transformation	314
7.4.1	Prinzip	314
7.4.2	Definition	315
7.4.3	Darstellung der FOURIER-Transformierten	316
7.4.4	Übersicht: Eigenschaften der FOURIER-Transformation	317
7.4.5	FOURIER-Transformierte von Elementarsignalen	318
7.4.5.1	Spektrum der DIRAC-Funktion	318

7.4.5.2	Spektrum der Signum- und Sprungfunktion	319
7.4.5.3	Spektrum des Rechteckimpulses	320
7.4.5.4	Spektrum des Dreieckimpulses	321
7.4.5.5	Spektrum des Gaußimpulses	321
7.4.5.6	Spektrum harmonischer Zeitfunktionen	322
7.4.6	Tabelle: FOURIER-Transformierte	323
7.4.7	Von der LAPLACE-Transformierten zur FOURIER-Transformierten	326
7.5	LAPLACE-Transformation	327
7.5.1	Prinzip	327
7.5.2	Definition	327
7.5.3	Kausale und stabile Funktionen	328
7.5.4	Übersicht: Eigenschaften der LAPLACE-Transformation	329
7.5.5	Laplace-Transformierte von Elementarsignalen	330
7.5.6	Systemfunktionen im Bildbereich	332
7.5.7	Pol-Nullstellen-Plan (PN-Plan)	333
7.5.8	Von der FOURIER-Transformierten zur LAPLACE-Transformierten	337
7.5.9	Rücktransformation der Laplace-Transformierten	339
7.5.9.1	Verwendung der Tabellen	339
7.5.9.2	Partialbruchzerlegung	339
7.5.9.3	Beispiel für die Ermittlung der Systemantwort unter Verwendung der Korrespondenztabelle	340
7.5.10	Tabelle: LAPLACE-Transformierte von Zeitfunktionen	341
7.5.11	Tabelle: Inverse Laplace-Transformierte von Bildfunktionen	345
7.6	Nichtlineare Systeme	349
7.6.1	Definition	349
7.6.2	Charakterisierung nichtlinearer Systeme	350
7.6.2.1	Kennliniengleichung	350
7.6.2.2	Klirrfaktor	351
7.6.2.3	Intermodulationsabstand	352
7.7	Formelzeichen	354
7.8	Weiterführende Literatur	356
8	Analoge Schaltungstechnik	357
8.1	Berechnungsverfahren	357
8.1.1	Linearisierung im Arbeitspunkt	357
8.1.2	Wechselstromersatzschaltung	358
8.1.3	Ein- und Ausgangsimpedanz	359
8.1.3.1	Bestimmung der Eingangsimpedanz	359
8.1.3.2	Bestimmung der Ausgangsimpedanz	359
8.1.3.3	Zusammenschaltung von Zweipolen	360
8.1.4	Vierpolverfahren	361
8.1.4.1	Vierpolgleichungen	361
8.1.4.2	h -Parameter (Hybrid-Parameter*)	362
8.1.4.3	y -Parameter (Leitwertparameter*)	362
8.1.5	Blockschaltbilder	363
8.1.6	Bode-Diagramm	365
8.2	Silicium- und Germaniumdioden	366
8.2.1	Strom-Spannungsverhalten von Si- und Ge-Dioden	366
8.2.2	Temperaturabhängigkeit der Schleusenspannung	367
8.2.3	Differenzieller Widerstand (dynamischer Widerstand)	367

8.3	Kleinsignalverstärker mit Bipolartransistoren	367
8.3.1	Transistorkenngrößen	368
8.3.1.1	Schalbilder und Zählpfeilrichtungen für Bipolartransistoren	368
8.3.1.2	Ausgangskennlinien	368
8.3.1.3	Steuerkennlinie (Übertragungskennlinie)	369
8.3.1.4	Eingangskennlinie	369
8.3.1.5	Statische Stromverstärkung B	370
8.3.1.6	Differenzielle Stromverstärkung β	370
8.3.1.7	Steilheit S	370
8.3.1.8	Temperaturdrift	371
8.3.1.9	Differenzieller Eingangswiderstand r_{BE}	371
8.3.1.10	Differenzieller Ausgangswiderstand r_{CE}	371
8.3.1.11	Spannungsrückwirkung A_r	372
8.3.1.12	Transitfrequenz f_T	372
8.3.2	Ersatzschaltbilder	372
8.3.2.1	Statisches Ersatzschaltbild	372
8.3.2.2	Wechselstromersatzschaltbild	373
8.3.2.3	Ersatzschaltbild nach GIACOLETTO	373
8.3.3	Darlingtonschaltung	374
8.3.3.1	Quasidarlingtonschaltung	375
8.3.4	Grundsaltungen mit Bipolartransistoren	376
8.3.5	Emitterschaltung	376
8.3.5.1	Vierpolgleichungen der Emitterschaltung	377
8.3.5.2	Wechselstromersatzschaltbild der Emitterschaltung	378
8.3.5.3	Eingangswiderstand der Emitterschaltung	379
8.3.5.4	Ausgangswiderstand der Emitterschaltung	380
8.3.5.5	Wechselspannungsverstärkung der Emitterschaltung	381
8.3.5.6	Arbeitspunkteinstellung	382
8.3.5.7	Arbeitspunktstabilisierung	384
8.3.5.8	Arbeitsgerade	386
8.3.5.9	Emitterschaltung bei hohen Frequenzen	387
8.3.6	Kollektorschaltung (Emitterfolger)	387
8.3.6.1	Wechselstromersatzschaltbild der Kollektorschaltung	388
8.3.6.2	Eingangswiderstand der Kollektorschaltung	388
8.3.6.3	Ausgangswiderstand der Kollektorschaltung	389
8.3.6.4	Wechselstromverstärkung der Kollektorschaltung	389
8.3.6.5	Kollektorschaltung bei hohen Frequenzen	389
8.3.7	Basisschaltung	390
8.3.7.1	Wechselstromersatzschaltbild der Basisschaltung	390
8.3.7.2	Eingangswiderstand der Basisschaltung	391
8.3.7.3	Ausgangswiderstand der Basisschaltung	391
8.3.7.4	Wechselspannungsverstärkung der Basisschaltung	391
8.3.7.5	Basisschaltung bei hohen Frequenzen	392
8.3.8	Übersicht: Bipolartransistor-Grundsaltungen	392
8.3.9	Stromquellen mit Bipolartransistoren	393
8.3.10	Differenzverstärker mit Bipolartransistoren	394
8.3.10.1	Differenzverstärkung (Gegentaktverstärkung)	396
8.3.10.2	Gleichtaktverstärkung	396
8.3.10.3	Gleichtaktunterdrückung	397
8.3.10.4	Eingangswiderstand des Differenzverstärkers	397
8.3.10.5	Ausgangswiderstand des Differenzverstärkers	398

8.3.10.6	Offsetspannung des Differenzverstärkers	398
8.3.10.7	Offsetstrom des Differenzverstärkers	398
8.3.10.8	Offsetspannungsdrift	398
8.3.10.9	Beispiele für Differenzverstärker	399
8.3.11	Übersicht: Differenzverstärker mit Bipolartransistoren	400
8.3.12	Stromspiegelschaltung	400
8.4	Kleinsignalverstärker mit Feldeffekttransistoren	401
8.4.1	Transistorkenngrößen	401
8.4.1.1	Schalbilder und Zählpfeilrichtungen für Feldeffekttransistoren	401
8.4.1.2	Übertragungskennlinien und Ausgangskennlinienfeld von JFETs	403
8.4.1.3	Übertragungskennlinie und Ausgangskennlinienfeld von IGFETs	404
8.4.1.4	Steilheit	404
8.4.1.5	Differenzieller Ausgangswiderstand	405
8.4.1.6	Eingangsimpedanz	405
8.4.2	Ersatzschaltbilder	405
8.4.2.1	Ersatzschaltbild für niedrige Frequenzen	405
8.4.2.2	Ersatzschaltbild für hohe Frequenzen	406
8.4.2.3	Grenzfrequenz der Vorwärtssteilheit	406
8.4.3	Grundsaltungen mit Feldeffekttransistoren	407
8.4.4	Sourceschaltung	407
8.4.4.1	Vierpolgleichungen der Sourceschaltung	408
8.4.4.2	Wechselstromersatzschaltbild der Sourceschaltung	408
8.4.4.3	Eingangsimpedanz der Sourceschaltung	409
8.4.4.4	Ausgangsimpedanz der Sourceschaltung	409
8.4.4.5	Wechselspannungsverstärkung	410
8.4.4.6	Arbeitspunkteinstellung	410
8.4.4.7	Drainschaltung, Sourcefolger	412
8.4.4.8	Wechselstromersatzschaltbild der Drainschaltung	412
8.4.4.9	Eingangswiderstand der Drainschaltung	412
8.4.4.10	Ausgangswiderstand der Drainschaltung	413
8.4.4.11	Spannungsverstärkung der Drainschaltung	413
8.4.4.12	Drainschaltung bei hohen Frequenzen	413
8.4.5	Gateschaltung	413
8.4.5.1	Eingangswiderstand der Gateschaltung	414
8.4.5.2	Ausgangswiderstand der Gateschaltung	414
8.4.5.3	Spannungsverstärkung der Gateschaltung	414
8.4.6	Übersicht: Grundsaltungen mit Feldeffekttransistoren	414
8.4.7	Stromquelle mit FETs	415
8.4.8	Differenzverstärker mit Feldeffekttransistoren	415
8.4.8.1	Differenzverstärkung (Gegentaktverstärkung)	416
8.4.8.2	Gleichtaktverstärkung	416
8.4.8.3	Gleichtaktunterdrückung	416
8.4.8.4	Eingangsimpedanz	417
8.4.8.5	Ausgangswiderstand	417
8.4.9	Übersicht: Differenzverstärker mit Feldeffekttransistoren	417
8.4.10	Der FET als steuerbarer Widerstand	417
8.5	Gegenkopplung	418
8.5.1	Gegenkopplungsarten	420
8.5.2	Einfluss der Gegenkopplung auf die Ein- und Ausgangsimpedanz	422
8.5.3	Einfluss der Gegenkopplung auf den Frequenzgang	423
8.5.4	Stabilität gegengekoppelter Systeme	424

8.6	Operationsverstärker	425
8.6.1	Kennwerte des Operationsverstärkers	426
8.6.1.1	Ausgangsaussteuerbereich	426
8.6.1.2	Offsetspannung	426
8.6.1.3	Offsetspannungsdrift	426
8.6.1.4	Gleichtaktaussteuerbereich	426
8.6.1.5	Differenzverstärkung	427
8.6.1.6	Gleichtaktverstärkung	427
8.6.1.7	Gleichtaktunterdrückung	427
8.6.1.8	Betriebsspannungsdurchgriff	427
8.6.1.9	Eingangswiderstand	428
8.6.1.10	Ausgangswiderstand*	428
8.6.1.11	Eingangsruhestrom*	428
8.6.1.12	Verstärkungsbandbreitprodukt* (Transitfrequenz)	428
8.6.1.13	Grenzfrequenz	429
8.6.1.14	Anstiegssteilheit der Ausgangsspannung (Slew Rate)	429
8.6.1.15	Ersatzschaltbild des Operationsverstärkers	429
8.6.2	Frequenzgangkorrektur	430
8.6.3	Komparatoren	431
8.6.4	Operationsverstärkerschaltungen	431
8.6.4.1	Impedanzwandler	432
8.6.4.2	Nicht invertierender Verstärker (Elektrometerverstärker)	432
8.6.4.3	Invertierender Verstärker	433
8.6.4.4	Addierer	435
8.6.4.5	Subtrahierer	435
8.6.4.6	Instrumentenverstärker	436
8.6.4.7	Spannungsgesteuerte Stromquellen	437
8.6.4.8	Integrator	437
8.6.4.9	Differenzierer (Differentiator)	438
8.6.4.10	Wechselspannungsverstärker mit einer Betriebsspannung	439
8.6.4.11	Spannungseinsteller mit definierter Änderungsgeschwindigkeit	439
8.6.4.12	Schmitt-Trigger	439
8.6.4.13	Dreieck-Rechteck-Generator	440
8.6.4.14	Multivibrator	441
8.6.4.15	Sägezahn-Generator	441
8.6.4.16	Pulsweitenmodulator	442
8.7	Aktive Filter	443
8.7.1	Tiefpässe	444
8.7.1.1	Theorie der Tiefpässe	444
8.7.1.2	Berechnung von Tiefpässen	451
8.7.1.3	Tiefpass-Schaltungen	452
8.7.2	Hochpässe	454
8.7.2.1	Theorie der Hochpässe	454
8.7.2.2	Hochpass-Schaltungen	454
8.7.3	Bandpässe	455
8.7.3.1	Bandpässe 2. Ordnung	455
8.7.3.2	Bandpass-Schaltung 2. Ordnung	456
8.7.3.3	Bandpässe 4. und höherer Ordnung	457
8.7.4	Universalfilter	457
8.7.5	Filter mit geschalteten Kapazitäten	458

8.8	Oszillatoren	459
8.8.1	RC-Oszillatoren	460
8.8.1.1	Phasenschieberschwingung	460
8.8.1.2	Wien-Robinson-Oszillator, Wienbrückenoszillator	461
8.8.2	LC-Oszillatoren	461
8.8.2.1	Meißner-Oszillator	461
8.8.2.2	Hartley-Oszillator (Induktiver Dreipunkt-Oszillator)	462
8.8.2.3	Colpitts-Oszillator (kapazitiver Dreipunktoszillator)	463
8.8.3	Quarz-Oszillatoren*	463
8.8.3.1	Pierce-Oszillator*	464
8.8.3.2	Quarzoszillator mit TTL-Gattern	464
8.8.4	Multivibratoren	465
8.9	Erwärmung und Kühlung	465
8.9.1	Zuverlässigkeit und Lebensdauer	466
8.9.2	Temperaturberechnung	467
8.9.2.1	Wärmewiderstand*	467
8.9.2.2	Wärmekapazität	469
8.9.2.3	Der transiente Wärmewiderstand (Pulswärmewiderstand)	470
8.10	Leistungsverstärker	471
8.10.1	Emitterfolger*	471
8.10.2	Komplementärer Emitterfolger im B-Betrieb	474
8.10.3	Komplementärer Emitterfolger im C-Betrieb	477
8.10.4	Die Betriebsarten im Ausgangskennlinienfeld	477
8.10.5	Komplementärer Emitterfolger im AB-Betrieb	478
8.10.5.1	Vorspannungserzeugung für den AB-Betrieb	478
8.10.5.2	Komplementärer Emitterfolger mit Darlingtontransistoren	480
8.10.5.3	Strombegrenzung beim komplementären Emitterfolger	481
8.10.6	Ansteuerung von Leistungsverstärkern	481
8.10.6.1	Ansteuerung über Differenzverstärker	481
8.10.6.2	Ansteuerung über Operationsverstärker	482
8.10.7	Taktverstärker	483
8.11	Formelzeichen	484
8.12	Weiterführende Literatur	485
9	Digitaltechnik	487
9.1	Schaltalgebra (Boole'sche Algebra)	487
9.1.1	Logische Variablen und logische Grundfunktionen	487
9.1.1.1	Negation	487
9.1.1.2	UND-Funktion (Konjunktion)	488
9.1.1.3	ODER-Funktion (Disjunktion)	488
9.1.2	Logische Funktionen und ihre Symbole	488
9.1.2.1	Inverter (NOT)	489
9.1.2.2	UND-Verknüpfung (AND)	489
9.1.2.3	ODER-Verknüpfung (OR)	489
9.1.2.4	NAND-Verknüpfung	490
9.1.2.5	NOR-Verknüpfung	490
9.1.2.6	EXOR-Verknüpfung (Antivalenz, exklusives ODER)	491
9.1.3	Termumformungen	492
9.1.3.1	Kommutativ-Gesetze	492
9.1.3.2	Assoziativ-Gesetze	492

9.1.3.3	Distributiv-Gesetze	492
9.1.3.4	Inversions-Gesetze (De Morgan'sche Regeln)	492
9.1.4	Übersicht: Termumformungen	493
9.1.5	Analyse von logischen Schaltungen	494
9.1.6	Normalformen	494
9.1.6.1	Disjunktive Normalform	495
9.1.6.2	Konjunktive Normalform	496
9.1.7	Systematische Reduktion einer logischen Funktion	496
9.1.7.1	Karnaugh-Diagramm	497
9.1.7.2	Das Verfahren nach Quine und McCluskey	500
9.1.8	Synthese von Schaltnetzen	502
9.1.8.1	Typisierung auf NAND-Glieder	503
9.1.8.2	Typisierung auf NOR-Glieder	503
9.2	Elektronische Realisierung von Schaltfunktionen	504
9.2.1	Elektrische Kenndaten	504
9.2.1.1	Pegel	504
9.2.1.2	Übertragungskennlinie	504
9.2.1.3	Lastfaktoren	505
9.2.1.4	Störabstand	505
9.2.1.5	Verzögerungszeit	506
9.2.1.6	Anstiegszeiten	506
9.2.1.7	Verlustleistung	507
9.2.1.8	Mindeststeilheit	507
9.2.1.9	Integration	507
9.2.2	Übersicht: Bezeichnungen in Datenblättern	508
9.2.3	TTL-Familie	509
9.2.3.1	TTL-Baureihen	510
9.2.3.2	Grundschtaltung von TTL-Gattern	511
9.2.4	CMOS-Familie	512
9.2.5	Vergleich TTL vs. CMOS	513
9.2.6	Spezielle Schaltungsvarianten	514
9.2.6.1	Ausgänge mit offenem Kollektor	514
9.2.6.2	Phantom UND/ODER Verknüpfung	515
9.2.6.3	Tristate-Ausgänge	516
9.2.6.4	Schmitt-Trigger-Eingänge	517
9.3	Schaltnetze, Schaltwerke	518
9.3.1	Abhängigkeitsnotation	518
9.3.2	Schaltsymbole für Schaltnetze und Schaltwerke	520
9.4	Beispiele für Schaltnetze	521
9.4.1	1-aus-n-Decoder	521
9.4.2	Multiplexer und Demultiplexer	522
9.5	Flipflops	523
9.5.1	Anwendungen von Flipflops	523
9.5.2	RS-Flipflop	524
9.5.3	D-Flipflop	525
9.5.4	Master-Slave-Flipflop	526
9.5.5	JK-Flipflop	527
9.5.6	Steuerung (<i>Triggerung</i>) von Flipflops	527
9.5.7	Bezeichnungen an Flipflop-Schaltsymbolen	528
9.5.8	Übersicht: Flipflops	529
9.5.9	Übersicht: Flankengetriggerte Flipflops	529

9.5.10	Synthese von flankengesteuerten Flipflops	531
9.5.11	Übersicht: Flipflop Schaltkreise	533
9.6	Speicher	534
9.6.1	Prinzipieller Aufbau	534
9.6.2	Speicherzugriff	535
9.6.3	Statische und dynamische RAMs	536
9.6.4	Festwertspeicher	538
9.6.5	Programmierbare Funktionsspeicher	539
9.6.5.1	Prinzip	539
9.6.5.2	PLD Typen	540
9.6.5.3	Ausgangsschaltungen	541
9.7	Register und Schieberegister	543
9.8	Zähler	544
9.8.1	Asynchron-Zähler	544
9.8.1.1	Dualzähler	544
9.8.1.2	Dezimalzähler	546
9.8.1.3	Rückwärtszähler	548
9.8.1.4	Vorwärts-Rückwärtszähler	549
9.8.1.5	Programmierbare Zähler	549
9.8.2	Synchronzähler	550
9.8.3	Übersicht: TTL- und CMOS Zähler	553
9.8.3.1	TTL-Zähler	554
9.8.3.2	CMOS-Zähler	555
9.9	Entwurf und Synthese von Schaltwerken	555
9.10	Weiterführende Literatur	562
10	Stromversorgungen	565
10.1	Netztransformatoren	565
10.2	Gleichrichtung und Siebung	567
10.2.1	Verschiedene Gleichrichterschaltungen	568
10.2.2	Spannungsvervielfacher	570
10.2.3	Villard-Schaltung	571
10.2.4	Ladungspumpen	571
10.3	Phasenanschnittsteuerung	572
10.4	Analoge Spannungsstabilisierungen	574
10.4.1	Spannungsstabilisierung mit Zenerdiode	574
10.4.2	Stabilisierung mit Längstransistor	574
10.4.3	Spannungsregelung	575
10.5	Schaltnetzteile	576
10.5.1	Sekundärgetaktete Schaltnetzteile (Drosselwandler)	577
10.5.1.1	Abwärtswandler	577
10.5.1.2	Aufwärtswandler	580
10.5.1.3	Invertierender Wandler	582
10.5.1.4	SEPIC	583
10.5.2	Primärgetaktete Schaltnetzteile	585
10.5.2.1	Sperrwandler	585
10.5.2.2	Eintaktdurchflusswandler	589
10.5.2.3	Gegentaktwandler	591
10.5.2.4	Resonanzwandler	593
10.5.3	Übersicht: Schaltnetzteile	598

10.5.4	Regelung von Schaltnetzteilen	599
10.5.4.1	Voltage-mode-Regelung	600
10.5.4.2	Current-mode-Regelung	600
10.5.4.3	Vergleich: voltage-mode vs. current-mode-Regelung	601
10.5.4.4	Dimensionierung des PI-Reglers	601
10.5.5	Wickelgüter	602
10.5.5.1	Berechnung von Speicherdrosseln	602
10.5.5.2	Berechnung von Hochfrequenztransformatoren	604
10.5.6	Leistungsfaktor-Vorregelung	607
10.5.6.1	Ströme, Spannungen und Leistung im Leistungsfaktor-Vorregler	608
10.5.6.2	Die Regelung des Leistungsfaktor-Vorreglers	609
10.5.7	Funkentstörung von Schaltnetzteilen	610
10.5.7.1	Funkstörstrahlung	611
10.5.7.2	Leitungsgebundene Störungen	611
10.5.7.3	Verminderung der asymmetrischen Funkstörspannungen	612
10.5.7.4	Verminderung der symmetrischen Funkstörspannungen	613
10.5.7.5	Vollständiges Funkentstörfilter	614
10.6	Formelzeichen	614
10.7	Weiterführende Literatur	615
A	Mathematische Grundlagen	617
A.1	Trigonometrische Funktionen	617
A.1.1	Eigenschaften	617
A.1.2	Summen und Differenzen von Winkelfunktionen	618
A.1.3	Summen und Differenzen im Argument	619
A.1.4	Vielfache des Arguments	619
A.1.5	Gewichtete Summe von Winkelfunktionen	620
A.1.6	Produkte von Winkelfunktionen	620
A.1.7	Dreifachprodukte	620
A.1.8	Potenzen von Winkelfunktionen	621
A.1.9	Winkelfunktionen mit komplexem Argument	621
A.2	Inverse Winkelfunktionen (Arkusfunktionen)	621
A.3	Hyperbelfunktionen	622
A.4	Differenzialrechnung	622
A.4.1	Differenziationsregeln	622
A.4.2	Ableitungen einfacher Funktionen	623
A.5	Integralrechnung	623
A.5.1	Integrationsregeln	623
A.5.2	Integrale mit Winkelfunktionen	625
A.5.3	Integrale mit Exponentialfunktionen	627
A.5.4	Integrale mit inversen Winkelfunktionen	628
A.5.5	Bestimmte Integrale	628
A.6	Das Integral der Standard-Normalverteilung	631
B	Tabellen	635
B.1	Das SI	635
B.1.1	Dezimalvorsätze	636
B.1.2	SI-Einheiten der Elektrotechnik	637
B.2	Naturkonstanten	638
B.3	Formelzeichen des griechischen Alphabets	638
B.4	Einheiten und Definitionen technisch-physikalischer Größen	639