



Leseprobe

Wolfgang Reinhold

Elektronische Schaltungstechnik

Grundlagen der Analogelektronik

ISBN (Buch): 978-3-446-45219-0

ISBN (E-Book): 978-3-446-45382-1

Weitere Informationen oder Bestellungen unter

<http://www.hanser-fachbuch.de/978-3-446-45219-0>

sowie im Buchhandel.

Vorwort

Das Fachgebiet elektronische Schaltungstechnik umfasst einen sehr umfangreichen Teil der Elektronik. Dieses Buch legt den Schwerpunkt auf die Schaltungsprinzipien zur Erzeugung und Verarbeitung analoger Signale. Durch diese Konzentration eröffnet sich die Möglichkeit, dem Studierenden die Einarbeitung in das Gesamtgebiet anhand einer durchgängigen Systematik zu erleichtern. Ziel der Darstellung ist die Herausarbeitung schaltungstechnischer Grundkonzepte zur Realisierung der wichtigen funktionellen Baugruppen elektronischer Systeme. Auf Basis geeigneter mathematischer Methoden zur Schaltungsberechnung werden die notwendigen Abstraktionen der Bauelemente- und Schaltungsmodellierung abgeleitet, um ein anschauliches Verständnis und das ingenieurtechnische Handwerkszeug zur Schaltungsanalyse und Schaltungssynthese zu vermitteln. Ausgehend von den klassischen Grundschaltungen für Signalverstärker und elektronische Schalter werden systematisch die wichtigsten Aspekte der analogen Signalverarbeitung aufgezeigt.

In einer Reihe von Beispielen erhält der Leser Anregungen zur Nutzung des Netzwerkanalysators PSpice, um auch komplexe Zusammenhänge bei der Schaltungsanalyse anschaulich darstellen zu können. Mein besonderer Dank gilt in diesem Zusammenhang Herrn Robert Heinemann. Mit der von ihm im Rahmen seines Buches „PSPICE – Einführung in die Elektroniksimulation“ bereitgestellten PSpice-Demoversion konnten die Simulationen sehr komfortabel durchgeführt werden.

Die Internetseite www.fbeit.htwk-leipzig.de/~est/index.html ist als Ergänzung zum Lehrbuch gedacht. Auf ihr werden neben den Lösungen zu den Übungsaufgaben des Buches auch zusätzliche Informationen bereitgestellt. Diese umfassen u. a. ausführliche Herleitungen zu einigen sehr komplexen Gleichungen, auf die im Text explizit verwiesen wird, sowie Daten zu den vorgestellten PSpice-Simulationen.

Dieses Lehrbuch wendet sich hauptsächlich an Studenten der Elektrotechnik an Technischen Hochschulen und Fachhochschulen. Wegen seiner straffen und übersichtlichen Darstellung kann es aber auch als einführende Literatur für Universitätsstudenten empfohlen werden. Vorausgesetzt werden lediglich Grundkenntnisse der Elektrotechnik und Mathematik. Zahlreiche Beispiele und Übungsaufgaben mit ausführlichen Lösungen erleichtern die Einarbeitung in den Stoff und fördern die Selbstständigkeit.

Mein herzlicher Dank gilt den Kollegen der Fakultät Elektrotechnik und Informationstechnik der HTWK Leipzig für anregende Diskussionen sowie Frau Werner und Frau Kaufmann vom Carl Hanser Verlag für die Unterstützung bei der Gestaltung des Buches.

Leipzig, im Mai 2010

Wolfgang Reinhold

Vorwort zur 2. Auflage

Dieses Buch hat in den vergangenen Jahren eine große Resonanz gefunden. Davon zeugen zahlreiche Leserzuschriften. Mein Dank gilt allen interessierten Lesern, die mit ihren Anregungen und Hinweisen zur Überarbeitung des Buches beigetragen haben.

Der aktive Einsatz dieses Buches in der Hochschullehre erleichterte das Auffinden von Fehlern, die sich bei einem neuen Buch leider nicht ganz vermeiden lassen. Neben der Korrektur dieser Fehler lag der Schwerpunkt der Überarbeitung auf der Präzisierung von Erläuterungen und der Verbesserung der Aussagekraft einiger Bilder. Dem Einsteiger soll damit ein leichteres Verständnis der Zusammenhänge ermöglicht werden.

Leipzig, im Juli 2017

Wolfgang Reinhold

Inhalt

1	Physikalische Grundlagen der Halbleiterelektronik	13
1.1	Leitfähigkeit von Halbleitern	13
1.1.1	Eigenleitung	13
1.1.2	Halbleiter mit Störstellen	15
1.2	Ladungsträgergeneration in Halbleitern	19
1.3	Ladungsträgertransport in Halbleitern	20
1.4	Aufgaben	21
2	Berechnungsmethoden elektronischer Schaltungen	22
2.1	Analysemethoden und -werkzeuge zur Schaltungsberechnung	23
2.1.1	Ersatzschaltbilder	25
2.1.2	Groß- und Kleinsignalanalyse	26
2.1.3	Kleinsignalerersatzschaltung	27
2.2	Vierpoldarstellung	28
2.3	Zusammenschaltung von Vierpolen	32
2.4	Vierpole mit äußerer Beschaltung	33
2.5	Darstellung des Übertragungsverhaltens	34
2.6	Signalflussdarstellung	36
2.7	Computergestützte Netzwerkanalyse	37
2.8	Aufgaben	39
3	Halbleiterdioden	41
3.1	pn-Übergang	41
3.1.1	Wirkprinzip	41
3.1.2	Strom-Spannungs-Kennlinie	45
3.1.3	Ladungsspeicherung	46
3.2	Kleinsignalverhalten	47
3.3	Schaltverhalten	50
3.4	Temperaturverhalten	52
3.5	Spezielle Dioden und ihre Anwendungen	53
3.5.1	Gleichrichterdiode	53
3.5.2	Z-Diode	56
3.5.3	Kapazitätsdiode	58
3.5.4	Tunneldiode	60
3.5.5	Schottky-Diode	60
3.6	Mikrowellendioden	61
3.6.1	IMPATT-Diode	61
3.6.2	Gunn-Diode	62
3.7	Aufgaben	63

4	Bipolartransistoren	65
4.1	Wirkprinzip	65
4.2	Strom-Spannungs-Kennlinie	67
4.3	Nutzbarer Betriebsbereich	72
4.4	Bipolartransistor als Verstärker	74
4.4.1	Kleinsignalmodell des Bipolartransistors	75
4.4.2	Frequenzabhängigkeit des Übertragungsverhaltens des Bipolartransistors	78
4.5	Temperaturverhalten von Bipolartransistoren	83
4.6	Arbeitspunktabhängigkeit der Stromverstärkung	85
4.7	Bipolartransistor als elektronischer Schalter	86
4.7.1	Schaltung eines Transistorschalters	86
4.7.2	Stationäres Schaltermodell des Bipolartransistors	87
4.7.3	Dynamisches Verhalten eines Transistorschalters	88
4.8	Aufgaben	91
5	Thyristoren	95
5.1	Aufbau und Wirkungsweise	95
5.2	Thyristorvarianten	97
5.3	Anwendungen von Thyristoren	98
5.4	Aufgaben	101
6	Feldeffekttransistoren	102
6.1	MOSFET	103
6.1.1	Wirkprinzipien verschiedener MOSFET-Typen	103
6.1.2	Strom-Spannungs-Kennlinie eines MOSFET	104
6.1.3	Ableitung der Strom-Spannungs-Kennlinie eines MOSFET	108
6.1.4	MOSFET als Verstärker	110
6.1.4.1	Kleinsignalmodell des MOSFET	110
6.1.4.2	Frequenzabhängigkeit des Übertragungsverhaltens	113
6.1.4.3	Effekte bei integriertem MOSFET	114
6.1.5	MOSFET als elektronischer Schalter	115
6.1.6	Thermisches Verhalten des MOSFET	117
6.2	Sperrschicht-FET	118
6.2.1	Strom-Spannungs-Kennlinie eines SFET	119
6.2.2	Kleinsignalverhalten eines SFET	119
6.3	SFET als Verstärker	120
6.4	Aufgaben	122
7	Rauschen elektronischer Bauelemente	125
7.1	Widerstandsrauschen	125
7.2	Diodenrauschen	127
7.3	Transistorrauschen	128
7.4	Rauschspannung	129
7.5	Rauschfaktor	130
7.6	Aufgabe	132

8	Operationsverstärker	133
8.1	Der ideale Operationsverstärker	133
8.2	Aufbau eines Operationsverstärkers	134
8.3	Statische Kenngrößen realer Operationsverstärker	135
8.4	Dynamische Kenngrößen realer Operationsverstärker	139
8.5	Verstärkerschaltungen mit Operationsverstärker	140
8.5.1	Grundsaltungen eines Spannungsverstärkers	141
8.5.2	Kompensation von Offsetspannung und Offsetstrom des Operationsverstärkers	142
8.6	Dynamisches Verhalten von Operationsverstärkerschaltungen	143
8.7	Rauschen in Operationsverstärkern	145
8.8	Moderne Operationsverstärkertypen	146
8.9	Aufgaben	148
9	Optoelektronische Bauelemente und Halbleitersensoren	150
9.1	Fotosensoren	150
9.2	Leuchtdioden	153
9.3	Optokoppler	156
9.4	Spezielle Halbleitersensoren	156
9.4.1	Temperatursensoren	156
9.4.2	Magnetfeldsensoren	158
9.4.3	Piezowandler	159
9.5	Aufgaben	160
10	Lineare Verstärkergrundsaltungen	162
10.1	Allgemeines Kleinsignalmodell eines Spannungsverstärkers	162
10.2	Einstufige Verstärker mit Bipolartransistoren	164
10.2.1	Emitterschaltung	165
10.2.2	Basisschaltung	173
10.2.3	Kollektorschaltung (Emitterfolger)	175
10.2.4	Vergleich der einstufigen Transistorverstärkerschaltungen	177
10.3	Einstufige Verstärker mit Feldeffekt-Transistoren	178
10.4	Grundsaltungen mit mehreren Transistoren	179
10.4.1	Kaskodeschaltung	179
10.4.2	Differenzverstärker	181
10.4.3	Stromspiegel	185
10.4.4	Differenzverstärker mit Stromspiegellast	188
10.4.5	Transistor-Stromquellen	189
10.4.6	Darlington-Schaltung	192
10.4.7	Leistungsendstufen	193
10.5	Frequenzverhalten von Verstärkerstufen	199
10.6	Kopplung von Verstärkerstufen	200
10.7	Aufgaben	201

11	Gegenkopplung	206
11.1	Allgemeines Modell der Gegenkopplung	206
11.2	Schaltungsarten der Gegenkopplung	208
11.3	Effekte der Gegenkopplung	209
11.3.1	Einstellung eines definierten Übertragungsfaktors	209
11.3.2	Linearisierung des Übertragungsfaktors	209
11.3.3	Parameterempfindlichkeit	211
11.3.4	Einfluss der Gegenkopplung auf Ein- und Ausgangsimpedanz	212
11.3.5	Übertragungsbandbreite	214
11.3.6	Miller-Effekt	215
11.3.7	Bootstrap-Effekt	216
11.3.8	Gezielte Beeinflussung des Frequenzganges eines Verstärkers	216
11.4	Anwendungen der Gegenkopplungsvarianten	217
11.4.1	Operationsverstärkerschaltungen mit Gegenkopplung	217
11.4.2	Transistorschaltungen mit Gegenkopplung	219
11.5	Stabilität rückgekoppelter Verstärker	222
11.6	Frequenzgangkorrektur von Verstärkern	225
11.7	Aufgaben	227
12	Schaltungen mit Operationsverstärkern	229
12.1	Lineare Verstärker	229
12.1.1	Nicht invertierender Verstärker	229
12.1.2	Invertierender Verstärker	230
12.2	Rechenschaltungen	231
12.2.1	Addierer	231
12.2.2	Subtrahierer	232
12.2.3	Differenzierer	235
12.2.4	Integrator	238
12.2.5	Multiplizierer	241
12.2.6	Dividierer	242
12.3	Nichtlineare Schaltungen	242
12.4	Komparatoren und Schmitt-Trigger	243
12.5	Stromquellen	245
12.6	Schaltungstechnik mit modernen Operationsverstärkern	246
12.6.1	VC-OPV und seine Anwendung	246
12.6.2	CV-OPV als Hochfrequenz-Baublock	248
12.6.3	CC-OPV und seine Anwendung als idealer Transistor	250
12.7	Elektronische Regler	251
12.7.1	P-Regler	252
12.7.2	PI-Regler	252
12.7.3	PID-Regler	253
12.8	Aufgaben	256

13	Filterschaltungen	257
13.1	Filtereigenschaften und Kennwerte	257
13.2	Passive Filter	262
13.3	Aktive RC-Filter	266
13.3.1	Tiefpässe 2. Ordnung	266
13.3.2	Hochpässe 2. Ordnung	271
13.3.3	Bandpässe 2. Ordnung	274
13.3.4	Bandsperren 2. Ordnung	278
13.4	Universalfilter	280
13.5	SC-Filter	281
13.5.1	SC-Integrator	281
13.5.2	Schaltungsrealisierung von SC-Filtern	283
13.6	Aufgaben	284
14	Schwingungserzeugung	286
14.1	Sinusoszillatoren	286
14.1.1	Zweipoloszillatoren	286
14.1.2	Vierpoloszillatoren	289
14.1.2.1	Grundstruktur und Schwingbedingung	289
14.1.2.2	RC-Oszillatoren	290
14.1.2.3	LC-Oszillatoren	293
14.1.2.4	Quarzoszillatoren	295
14.2	Impulsoszillatoren	298
14.2.1	Funktionsgeneratoren	298
14.2.2	Relaxationsoszillatoren	299
14.2.2.1	Dreieck-Rechteck-Generator	299
14.2.2.2	Kippschaltungen	300
14.3	Aufgaben	302
15	Frequenzumsetzer	303
15.1	Amplitudenmodulation	304
15.1.1	AM-Modulatoren	305
15.1.2	AM-Demodulatoren	307
15.2	Frequenzmodulation	310
15.2.1	FM-Modulatoren	313
15.2.2	FM-Demodulatoren	314
15.3	Phasenmodulation	315
15.3.1	PM-Modulatoren	316
15.3.2	PM-Demodulatoren	317
15.4	Mischer	317

16	Stromversorgungseinheiten	321
16.1	Gleichrichterschaltungen	321
16.2	Spannungsstabilisierung	325
16.2.1	Unregelte Stabilisierungsschaltungen	326
16.2.2	Kontinuierliche Spannungsregler	326
16.2.3	Diskontinuierliche Spannungsregler	328
16.2.3.1	Drosselregler	329
16.2.3.2	Ladungspumpen	333
16.3	Erzeugung von Referenzspannungen	335
16.3.1	Referenzspannungsquellen mit Z-Dioden	335
16.3.2	Bandgap-Referenz	336
16.4	Schaltnetzteile	338
16.5	Aufgaben	341
17	Analog/Digital- und Digital/Analog-Wandler	342
17.1	Kennwerte von A/D- und D/A-Wandlern	343
17.1.1	Stationäre Kennwerte	343
17.1.2	Dynamische Kennwerte	346
17.2	A/D-Wandlungsverfahren	347
17.2.1	A/D-Wandlung nach dem Zählverfahren	348
17.2.2	A/D-Wandlung mit sukzessiver Approximation	350
17.2.3	A/D-Wandlung nach dem Parallelverfahren	350
17.2.4	A/D-Wandlung nach dem Pipeline-Verfahren	351
17.2.5	Sigma-Delta-Wandler	352
17.3	D/A-Wandlungsverfahren	354
17.3.1	D/A-Wandlung nach dem Zählverfahren	355
17.3.2	D/A-Wandlung nach dem Wägeverfahren	356
17.3.3	D/A-Wandlung nach dem Parallelverfahren	359
17.3.4	Fehlerkorrigierende D/A-Wandlung	359
17.4	Aufgaben	360
	Formelzeichen	362
	Literatur	365
	Index	369

2

Berechnungsmethoden elektronischer Schaltungen

Die in diesem Buch behandelten elektronischen Schaltungen umfassen ausschließlich Lösungen zur Verarbeitung kontinuierlicher Signale. Diese Signale sind i. Allg. Ströme und Spannungen, deren Informationsgehalt durch stetige Zeitfunktionen beschreibbar ist. Elektronische Schaltungen realisieren signalverarbeitende Funktionen durch Netzwerke aus elektronischen Bauelementen. Die wichtigsten Funktionseinheiten sind in Tabelle 2.1 zusammengestellt. Sie werden durch charakteristische Baugruppen realisiert. Durch Zusammenschalten solcher Funktionseinheiten lassen sich komplexe signalverarbeitende Systeme zusammensetzen.

Tabelle 2.1 Funktionseinheiten der Analogtechnik

Funktion	Schaltung
Signalverstärkung	Spannungsverstärker – Breitband-V. – Leistungs-V. – Instrumentations-V. – Isolations-V. – Hochfrequenz-V. – Operationsverstärker
Signalerzeugung	Oszillatoren: LC-, RC-, Quarz-Oszillatoren Signalgeneratoren: Sinus-, Rechteck-, Dreieck-, Sägezahn-G. Konstantstrom-, Konstantspannungs-, Referenzspannungsquellen Gesteuerte Quellen Gesteuerte Oszillatoren: Spannungsgesteuerte Oszillatoren (VCOs), digital gesteuerte Oszillatoren (DCOs)
Signalverknüpfung	Summierer, Multiplizierer, Dividierer, Modulator, Demodulator
Signalformung	Filter, Integrator, Differenzierer, Logarithmierer
Signalwandlung	A/D- und D/A-Wandler, U/I- und I/U-Wandler, Q/U-Wandler, U/f-Wandler
Signalaufnahme	Sensoren
Signalausgabe	Aktoren, Anzeigeelemente
Betriebsspannungsversorgung	Gleichrichter, Siebglied, Spannungsregler, Schaltnetzteile, DC/DC-Wandler

Für alle wichtigen Funktionseinheiten existieren zahlreiche schaltungstechnische Umsetzungen, bei denen sich die funktionelle Qualität und der Bauelementeaufwand proportional verhalten. In den meisten Fällen werden die Funktionsgruppen durch die Kombination von typischen analogen Grundsaltungen realisiert. Die Kenntnis dieser universell einsetzbaren Baublöcke gehört zum wichtigsten Handwerkszeug des Schaltungstechnikern. Zu ihnen gehören Verstärkerstufen, Differenzstufen, Stromspiegel, Referenzspannungsquellen, Stromquellen und Leistungsstufen.

Schaltungssynthese. Für analoge Schaltungen ist eine automatische Schaltungssynthese zu einer vorgegebenen Systemfunktion mittels Software, wie sie für digitale Schaltungen existiert.

tiert, wegen einer zu großen Lösungsvielfalt nicht möglich. Derzeit existieren lediglich für einige spezielle Schaltungen parametrisierbare Modulgeneratoren.

Eine manuelle Schaltungssynthese basiert auf der Verwendung bekannter Schaltungen und deren Anpassung an die konkreten Anforderungen und Gegebenheiten. Diese Vorgehensweise erfordert die Kenntnis einer großen Baublockbibliothek.

Bei der Verkettung von analogen Baublöcken haben deren Rückwirkungseigenschaften und ihre hohe Empfindlichkeit gegenüber Störungen oft spürbaren Einfluss auf die Gesamtfunktion. Eine Analyse dieser Rückwirkungseigenschaften elektronischer Schaltungen ist folglich ein Schwerpunkt bei der Schaltungssynthese.

Betrachtungsebenen der Schaltungsfunktion bei der Synthese. Bei der Entwicklung analoger Schaltungen sind zahlreiche verschiedene Gesichtspunkte zu berücksichtigen. Die übliche Vorgehensweise besteht darin, einzelne Eigenschaften der eingesetzten Bauelemente und deren Auswirkung auf das Gesamtverhalten der Schaltung getrennt zu untersuchen. Die folgenden Stichworte sollen einige der wichtigsten Gesichtspunkte benennen:

- Arbeitspunktanalyse
 - Einstellung des Arbeitspunktes der eingesetzten Bauelemente
 - Temperaturstabilität des Arbeitspunktes
- Signalübertragung mit linearisiertem Modell (Kleinsignalmodell)
- Großsignalanalyse: Analyse von Signalverzerrungen bei großen Signalamplituden
- Berücksichtigung der Grenzparameter bei der Bauelementeauswahl
 - maximale Spannung
 - maximaler Strom
 - maximale Signalfrequenz
- Toleranz der Bauelementeparameter und ihre Auswirkung auf die Schaltungseigenschaften
- parasitäre Effekte
- Verlustleistungsbilanz → Erwärmung der Schaltung → Wärmeabtransport
- Rauschanalyse

Durch die Verwendung zugeschnittener Modelle lassen sich geeignete analytische Methoden finden, um diese Einzelaspekte zu analysieren. Soll die Verkopplung mehrerer Eigenschaften untersucht werden, ist oft nur der Weg über eine numerische Bauelementemodellierung und Schaltungssimulation möglich.

■ 2.1 Analysemethoden und -werkzeuge zur Schaltungsberechnung

Für die Auswahl geeigneter Analysemethoden und -werkzeuge für analoge Schaltungen sind die zu übertragenden Signale ausschlaggebend. Diese liegen meist als Zeitfunktionen vor. Ihre Transformation in Frequenzfunktionen und eine anschließende Analyse der Schaltungen im Frequenzbereich führt häufig zu vereinfachten Analysemethoden und zusätzlich zu einer höheren Anschaulichkeit der Ergebnisse. In Tabelle 2.2 sind einige Signaltypen und an diese

2.1.1 Ersatzschaltbilder

Ersatzschaltbilder stellen eine elektrische Interpretation der Funktion eines elektronischen Bauelementes bzw. einer elektronischen Baugruppe in Form eines Netzwerkes (elektrisches Netzwerkmodell des realen Bauelementes) dar. Die komplexe Funktion des Bauelementes oder der Baugruppe wird in einem Ersatzschaltbild in einige wichtige Teilfunktionen zerlegt. Die Netzwerkelemente widerspiegeln einzelne Eigenschaften bzw. Teilfunktionen. Direkte Zusammenhänge bestehen zwischen messbaren Kennlinien eines Bauelementes, den Ersatzschaltbildelementen und den Kennliniengleichungen. Die Genauigkeit der Repräsentation des realen Verhaltens wird entsprechend den Notwendigkeiten gewählt. Auf der Basis der Ersatzschaltbilder wird eine überschaubare Netzwerkberechnung der Gesamtschaltung (Bauelement mit äußerer Beschaltung) möglich.

Wichtige Elemente von Ersatzschaltbildern sind Widerstände, Kondensatoren, Spulen, Konstantstrom- und Spannungsquellen sowie gesteuerte Quellen (stromgesteuerte Strom- und Spannungsquellen, spannungsgesteuerte Strom- und Spannungsquellen).

Gesteuerte Quellen. Die Ströme bzw. Spannungen dieser Quellen sind von anderen Zweigspannungen bzw. Zweigströmen der Ersatzschaltung abhängig. Ursache und Wirkung der Steuerung liegen an verschiedenen Stellen in der Ersatzschaltung (siehe Bild 2.1).

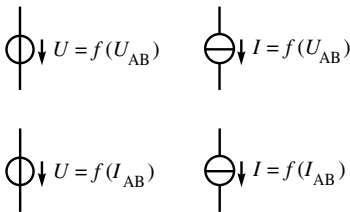


Bild 2.1 Gesteuerte Quellen, U_{AB} Spannung zwischen zwei Netzknoten, I_{AB} Zweigstrom

Beispiel 2.1

Die reale exponentielle Kennlinie einer Diode ist durch eine stückweise lineare Näherung zu ersetzen und das entsprechende Ersatzschaltbild zu entwickeln.

Lösung:

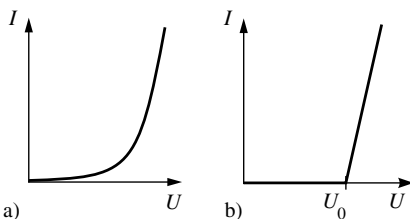


Bild 2.2 Diodenkennlinie
a) real, b) stückweise lineare Näherung

Die stückweise lineare Näherung der Diodenkennlinie lässt sich durch

$$I = \begin{cases} 0 & \text{für } U \leq U_0 \\ \frac{1}{R_i}(U - U_0) & \text{für } U \geq U_0 \end{cases}$$

beschreiben. Da keine geschlossene mathematische Beschreibung existiert, ergibt sich für beide Teilbereiche eine separate Ersatzschaltung.

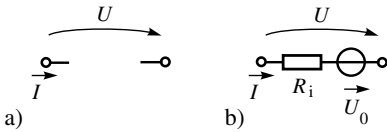


Bild 2.3 Ersatzschaltungen der Diodennäherung
a) für $U \leq U_0$, b) für $U \geq U_0$

2.1.2 Groß- und Kleinsignalanalyse

Großsignalanalyse. Halbleiterbauelemente haben i. Allg. ein nichtlineares Verhalten, d. h., die Zusammenhänge zwischen Ein- und Ausgangsgrößen (meist Strom und Spannung) sind nichtlinear. Die Auswirkungen dieser Nichtlinearitäten auf die Signalübertragung wachsen mit steigender Signalamplitude. Die Behandlung analoger Schaltungen mit den aus der Elektrotechnik bekannten Verfahren der Netzwerkanalyse führen zu komplizierten nichtlinearen Gleichungen bzw. Differenzialgleichungssystemen, deren Berechnung einige Schwierigkeiten bereitet. Alternative Lösungsmöglichkeiten ergeben sich durch grafische Methoden oder numerische Verfahren.

Grafische Berechnungsverfahren für elektronische Netzwerke basieren auf der Zerlegung der Schaltung in nichtlineare Teile, i. Allg. die Halbleiterbauelemente selbst, und den restlichen linearen Teil. Sie sind auch anwendbar, wenn das Bauelementeverhalten nur messtechnisch bestimmbar ist und werden häufig für die *Arbeitspunktberechnung* benutzt (siehe Bild 2.4).

Zu den *numerischen Berechnungsverfahren* zählt die Simulation der Schaltung mittels einer Netzwerkanalysesoftware (z. B. Spice [2.1]). Erst diese ermöglichen eine schnelle und genaue Bewertung des Einflusses von Nichtlinearitäten auf das zu übertragende Signal. Genannt sei hier die *Klirrfaktoranalyse*.

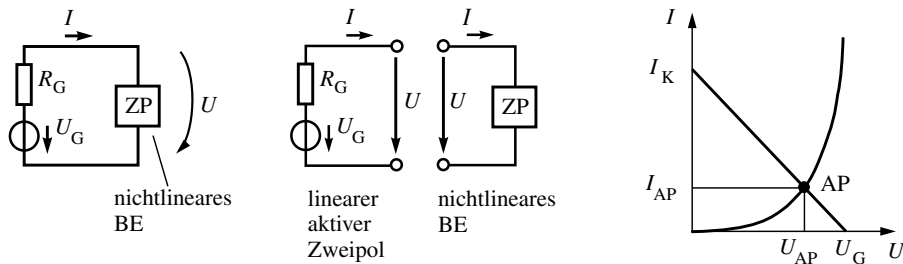


Bild 2.4 Grafische Arbeitspunktanalyse

Die in der Netzwerksimulation verwendeten Großsignalmodelle der Bauelemente basieren für Bipolartransistoren auf dem Gummel-Poon-Modell (siehe Abschnitt 4.2) und für MOSFET auf den Gleichungen (6.6) bis (6.28) [2.2], [2.3], [2.4].

Arbeitspunkt. Durch stationäre Ströme und Spannungen gekennzeichneten Ruhezustand einer Schaltung bei fehlendem Eingangssignal.

Die Wahl der Lage des Arbeitspunktes auf der stationären Kennlinie eines Bauelementes ist entscheidend für dessen nutzbare Eigenschaften und damit auch die Eigenschaften der gesamten Schaltung bezüglich der gewünschten Signalübertragung.

Kleinsignalanalyse. Meist wird von analogen Schaltungen die lineare (unverzerrte) Übertragung eines Signals erwartet. Besitzt das Signal eine kleine Amplitude, dann werden die Ströme und Spannungen in der Schaltung nur geringfügig gegenüber ihren Arbeitspunktwerten U_0, I_0 verändert (siehe Bild 2.5). Die nichtlineare Kennlinie von Bauelement bzw. Schaltung $I_2 = f(U_1)$ kann dann durch deren Anstieg im Arbeitspunkt angenähert werden. Es gilt

$$\Delta I_2 = \left. \frac{dI_2}{dU_1} \right|_{U_{10}} \cdot \Delta U_1$$

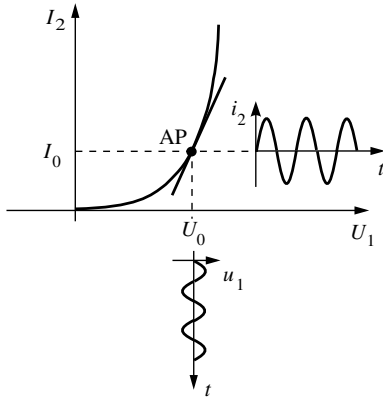


Bild 2.5 Linearisierung im Arbeitspunkt

Die Berechnung der Schaltung vereinfacht sich dadurch enorm, denn es entstehen nur noch lineare Übertragungsfunktionen. Für sinusförmige Eingangssignale ergeben sich dann unverzerrte rein sinusförmige Ausgangssignale. In komplexer Schreibweise ergibt sich

$$I_2 = \left. \frac{dI_2}{dU_1} \right|_{U_{10}} \cdot U_1$$

Der Proportionalitätsfaktor $\left. \frac{dI_2}{dU_1} \right|_{U_{10}}$ stellt den entsprechenden Kleinsignalübertragungsfaktor dar. Im Beispiel besitzt er die Dimension eines Leitwertes, dessen Zahlenwert von der Arbeitspunktlage abhängig ist.

Dieses lineare Übertragungsverhalten entspricht dem realen Verhalten der Schaltung umso besser, je kleiner die Amplitude des Signals ist. Man spricht auch vom Kleinsignalverhalten einer Schaltung.

2.1.3 Kleinsignalersatzschaltung

Auf der Basis der Kleinsignalmodelle aller Bauelemente einer Schaltung wird zur Berechnung des Kleinsignalübertragungsverhaltens ein Kleinsignalersatzschaltbild für die gesamte Schaltung gebildet. Dieses liefert einen linearen Zusammenhang zwischen den Ein- und Ausgangsgrößen und eignet sich ausschließlich zur Berechnung des Kleinsignalübertragungsverhaltens. Sinusförmige Eingangssignale führen dann zu rein sinusförmigen Ausgangssignalen.

Zur Gewinnung des Kleinsignalersatzschaltbildes einer Schaltung sind deren Gleichspannungsquellen durch Kurzschlüsse und die Konstantstromquellen durch Leerlauf zu ersetzen.

■ 2.2 Vierpoldarstellung

Ein Vierpol ist eine Schaltung mit vier äußeren Anschlüssen, von denen zwei den Eingang und zwei den Ausgang eines Zweitors bilden (siehe Bild 2.6).

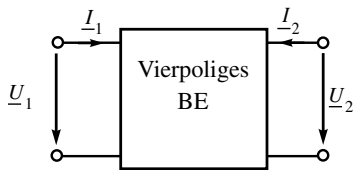


Bild 2.6 Vierpol mit Ein- und Ausgangsgrößen

Klassifizierung von Vierpolen. Nach der Vierpoltheorie können Vierpole durch folgende Merkmale klassifiziert werden.

Linearität: Vierpole mit linearem Zusammenhang zwischen Ein- und Ausgangsgrößen heißen linear, anderenfalls nichtlinear. Ein Maß für die Nichtlinearität der Signalübertragung ist der Klirrfaktor K des Ausgangssignals bei rein sinusförmigem Eingangssignal.

$$K = \frac{\sqrt{\sum_{i=2}^{\infty} \tilde{U}_i^2}}{\sqrt{\sum_{i=1}^{\infty} \tilde{U}_i^2}} \quad (2.1)$$

Der Quotient des Effektivwertes der Oberwellen bezogen auf den Gesamteffektivwert des Signals beschreibt den Verzerrungsgrad des Signals.

Leistungsbilanz: Aktive Vierpole enthalten Strom- oder Spannungsquellen, die auch von den Eingangsgrößen gesteuert sein können. Passive Vierpole enthalten keine Quellen. Die Leistungsbilanz aktiver Vierpole lautet:

$$P_{\text{Sa}} + P_{\text{V}} = P_{\text{Se}} + P_{\text{H}} \quad (2.2)$$

Die abgegebene Leistung setzt sich aus abgegebener Signalleistung P_{Sa} und im Vierpol umgesetzter Wärmeverlustrleistung P_{V} zusammen. Zugeführt wird die Eingangssignalleistung P_{Se} und eine Hilfsleistung P_{H} aus der Stromversorgung.

Rückwirkungsfreiheit: Vierpole sind rückwirkungsfrei, wenn die Eingangsgrößen nicht durch die Ausgangsgrößen beeinflussbar sind. Eine Signalübertragung existiert nur in eine Richtung.

Symmetrie: Vierpole sind symmetrisch, wenn eine Vertauschung der Ein- und Ausgangsklemmen das elektrische Verhalten nicht beeinflusst.

Umkehrbarkeit: Umkehrbare Vierpole besitzen in beide Richtungen den gleichen Übertragungswiderstand bzw. Übertragungsleitwert. Es gilt

$$\underline{Z}_{12} = \underline{Z}_{21} \quad \text{und} \quad \underline{Y}_{12} = \underline{Y}_{21}$$

Die Vierpoldarstellung wird in der analogen Schaltungstechnik zur Beschreibung des Kleinsignalverhaltens elektronischer Schaltungen genutzt.

Vierpolgleichungen. Das Übertragungsverhalten linearer Vierpole wird durch ein lineares Gleichungssystem, die Vierpolgleichungen, vollständig beschrieben. Die Beziehungen der vier Klemmengrößen $\underline{U}_1, \underline{U}_2, \underline{I}_1, \underline{I}_2$ zueinander sind durch die Vierpolparameter (Proportionalitätsfaktoren) erfasst. Je nach Anordnung der Ströme und Spannungen in den Vierpolgleichungen ergeben sich verschiedene Beschreibungsformen. Für Transistorgrundschaltungen sind z. B. die Leitwertform und die Hybridform von besonderer Bedeutung.

Wichtige Formen der Vierpolgleichungen lauten in Matrizenschreibweise

Impedanzmatrix:

$$\begin{pmatrix} \underline{U}_1 \\ \underline{U}_2 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \underline{z}_{11} & \underline{z}_{12} \\ \underline{z}_{21} & \underline{z}_{22} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \underline{I}_1 \\ \underline{I}_2 \end{pmatrix} \quad (2.3)$$

Admittanzmatrix:

$$\begin{pmatrix} \underline{I}_1 \\ \underline{I}_2 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \underline{y}_{11} & \underline{y}_{12} \\ \underline{y}_{21} & \underline{y}_{22} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \underline{U}_1 \\ \underline{U}_2 \end{pmatrix} \quad (2.4)$$

Hybridmatrix:

$$\begin{pmatrix} \underline{U}_1 \\ \underline{I}_2 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \underline{h}_{11} & \underline{h}_{12} \\ \underline{h}_{21} & \underline{h}_{22} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \underline{I}_1 \\ \underline{U}_2 \end{pmatrix} \quad (2.5)$$

Invershybridmatrix:

$$\begin{pmatrix} \underline{I}_1 \\ \underline{U}_2 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \underline{g}_{11} & \underline{g}_{12} \\ \underline{g}_{21} & \underline{g}_{22} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \underline{U}_1 \\ \underline{I}_2 \end{pmatrix} \quad (2.6)$$

Kettenmatrix:

$$\begin{pmatrix} \underline{U}_1 \\ \underline{I}_1 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \underline{a}_{11} & \underline{a}_{12} \\ \underline{a}_{21} & \underline{a}_{22} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \underline{U}_2 \\ -\underline{I}_2 \end{pmatrix} \quad (2.7)$$

Hinweis: Bei der Schreibweise der Kettenmatrix \underline{A} wird entgegen der bisherigen Einführung der positiven Richtung des Ausgangsstroms \underline{I}_2 ein Bezug auf den auswärts fließenden Ausgangsstrom $-\underline{I}_2$ eingeführt. In der Literatur wird diese Variante bevorzugt, da dieser mit dem einwärts fließenden Eingangsstrom einer verketteten Folgeschaltung identisch ist (siehe Abschnitt 2.3).

Interpretation der Vierpolparameter. Die elektrische Interpretation der Vierpolparameter leitet sich aus den Vierpolgleichungen ab. Ihre Berechnung bzw. Messung erfolgt jeweils bei Kurzschluss oder Leerlauf an bestimmten Ein- bzw. Ausgängen des Vierpols. Eine Zusammenstellung liefert Tabelle 2.3.

Tabelle 2.3 Vierpolparameter

Gleichung	Bezeichnung	Gleichung	Bezeichnung
$\underline{z}_{11} = \frac{\underline{U}_1}{\underline{I}_1} \Big _{\underline{I}_2=0}$	Leerlauf-Eingangsimpedanz	$\underline{g}_{11} = \frac{\underline{I}_1}{\underline{U}_1} \Big _{\underline{I}_2=0}$	Leerlauf-Eingangsadmittanz
$\underline{z}_{12} = \frac{\underline{U}_1}{\underline{I}_2} \Big _{\underline{I}_1=0}$	Leerlauf-Transimpedanz (rückwärts)	$\underline{g}_{12} = \frac{\underline{I}_1}{\underline{I}_2} \Big _{\underline{U}_1=0}$	Kurzschluss-Stromrückwirkung
$\underline{z}_{21} = \frac{\underline{U}_2}{\underline{I}_1} \Big _{\underline{I}_2=0}$	Leerlauf-Transimpedanz (vorwärts)	$\underline{g}_{21} = \frac{\underline{U}_2}{\underline{U}_1} \Big _{\underline{I}_2=0}$	Leerlauf-Spannungsverstärkung
$\underline{z}_{22} = \frac{\underline{U}_2}{\underline{I}_2} \Big _{\underline{I}_1=0}$	Leerlauf-Ausgangsimpedanz	$\underline{g}_{22} = \frac{\underline{U}_2}{\underline{I}_2} \Big _{\underline{U}_1=0}$	Kurzschluss-Ausgangsimpedanz
$\underline{y}_{11} = \frac{\underline{I}_1}{\underline{U}_1} \Big _{\underline{U}_2=0}$	Kurzschluss-Eingangsadmittanz	$\underline{a}_{11} = \frac{\underline{U}_1}{\underline{U}_2} \Big _{\underline{I}_2=0}$	reziproke Leerlauf-Spannungsverstärkung
$\underline{y}_{12} = \frac{\underline{I}_1}{\underline{U}_2} \Big _{\underline{U}_1=0}$	Kurzschluss-Transadmittanz (rückwärts)	$\underline{a}_{12} = \frac{\underline{U}_1}{-\underline{I}_2} \Big _{\underline{U}_2=0}$	negative reziproke Kurzschluss-Transadmittanz
$\underline{y}_{21} = \frac{\underline{I}_2}{\underline{U}_1} \Big _{\underline{U}_2=0}$	Kurzschluss-Transadmittanz (vorwärts)	$\underline{a}_{21} = \frac{\underline{I}_1}{\underline{U}_2} \Big _{\underline{I}_2=0}$	reziproke Leerlauf-Transimpedanz
$\underline{y}_{22} = \frac{\underline{I}_2}{\underline{U}_2} \Big _{\underline{U}_1=0}$	Kurzschluss-Ausgangsadmittanz	$\underline{a}_{22} = \frac{\underline{I}_1}{-\underline{I}_2} \Big _{\underline{U}_2=0}$	negative reziproke Kurzschluss-Stromverstärkung
$\underline{h}_{11} = \frac{\underline{U}_1}{\underline{I}_1} \Big _{\underline{U}_2=0}$	Kurzschluss-Eingangsimpedanz		
$\underline{h}_{12} = \frac{\underline{U}_1}{\underline{U}_2} \Big _{\underline{I}_1=0}$	Leerlauf-Spannungsrückwirkung		
$\underline{h}_{21} = \frac{\underline{I}_2}{\underline{I}_1} \Big _{\underline{U}_2=0}$	Kurzschluss-Stromverstärkung		
$\underline{h}_{22} = \frac{\underline{I}_2}{\underline{U}_2} \Big _{\underline{I}_1=0}$	Leerlauf-Ausgangsadmittanz		

Beispiel 2.2

Es sind die Messschaltungen zur Bestimmung der h -Parameter eines Vierpols anzugeben.

Lösung:

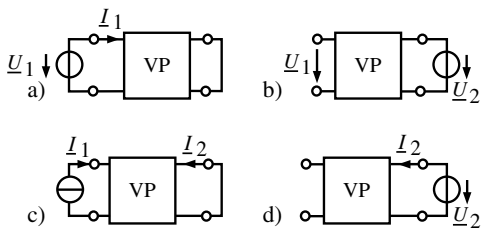


Bild 2.7 Messschaltungen zur Bestimmung der h -Parameter

Tabelle 2.4 Umrechnung der Vierpolparameter

	(z)	(y)	(h)	(g)	(a)
(z)	$\begin{pmatrix} \underline{z}_{11} & \underline{z}_{12} \\ \underline{z}_{21} & \underline{z}_{22} \end{pmatrix}$	$\begin{pmatrix} \underline{y}_{22} & -\underline{y}_{12} \\ \underline{\Delta y} & -\underline{\Delta y} \\ -\underline{y}_{21} & \underline{y}_{11} \\ -\underline{\Delta y} & \underline{\Delta y} \end{pmatrix}$	$\begin{pmatrix} \underline{\Delta h} & \underline{h}_{12} \\ \underline{h}_{22} & \underline{h}_{22} \\ -\underline{h}_{21} & 1 \\ -\underline{h}_{22} & \underline{h}_{22} \end{pmatrix}$	$\begin{pmatrix} 1 & -\underline{g}_{12} \\ \underline{g}_{11} & \underline{g}_{11} \\ \underline{g}_{21} & \underline{\Delta g} \\ \underline{g}_{11} & \underline{g}_{11} \end{pmatrix}$	$\begin{pmatrix} \underline{a}_{11} & \underline{\Delta a} \\ \underline{a}_{21} & \underline{a}_{21} \\ 1 & \underline{a}_{22} \\ \underline{a}_{21} & \underline{a}_{21} \end{pmatrix}$
(y)	$\begin{pmatrix} \underline{z}_{22} & -\underline{z}_{12} \\ \underline{\Delta z} & -\underline{\Delta z} \\ -\underline{z}_{21} & \underline{z}_{11} \\ \underline{\Delta z} & \underline{\Delta z} \end{pmatrix}$	$\begin{pmatrix} \underline{y}_{11} & \underline{y}_{12} \\ \underline{y}_{21} & \underline{y}_{22} \end{pmatrix}$	$\begin{pmatrix} 1 & -\underline{h}_{12} \\ \underline{h}_{11} & -\underline{h}_{11} \\ \underline{h}_{21} & \underline{\Delta h} \\ \underline{h}_{11} & \underline{h}_{11} \end{pmatrix}$	$\begin{pmatrix} \underline{\Delta g} & \underline{g}_{12} \\ \underline{g}_{22} & \underline{g}_{22} \\ -\underline{g}_{21} & 1 \\ \underline{g}_{22} & \underline{g}_{22} \end{pmatrix}$	$\begin{pmatrix} \underline{a}_{22} & -\underline{\Delta a} \\ \underline{a}_{12} & -\underline{a}_{12} \\ -1 & \underline{a}_{11} \\ -\underline{a}_{12} & \underline{a}_{12} \end{pmatrix}$
(h)	$\begin{pmatrix} \underline{\Delta z} & \underline{z}_{12} \\ \underline{z}_{22} & \underline{z}_{22} \\ -\underline{z}_{21} & 1 \\ -\underline{z}_{22} & \underline{z}_{22} \end{pmatrix}$	$\begin{pmatrix} 1 & -\underline{y}_{12} \\ \underline{y}_{11} & -\underline{y}_{11} \\ \underline{y}_{21} & \underline{\Delta y} \\ \underline{y}_{11} & \underline{y}_{11} \end{pmatrix}$	$\begin{pmatrix} \underline{h}_{11} & \underline{h}_{12} \\ \underline{h}_{21} & \underline{h}_{22} \end{pmatrix}$	$\begin{pmatrix} \underline{g}_{22} & -\underline{g}_{12} \\ \underline{\Delta g} & -\underline{\Delta g} \\ -\underline{g}_{21} & \underline{g}_{11} \\ -\underline{\Delta g} & \underline{\Delta g} \end{pmatrix}$	$\begin{pmatrix} \underline{a}_{12} & \underline{\Delta a} \\ \underline{a}_{22} & \underline{a}_{22} \\ -1 & \underline{a}_{21} \\ -\underline{a}_{22} & \underline{a}_{22} \end{pmatrix}$
(g)	$\begin{pmatrix} 1 & -\underline{z}_{12} \\ \underline{z}_{11} & -\underline{z}_{11} \\ \underline{z}_{21} & \underline{\Delta z} \\ \underline{z}_{11} & \underline{z}_{11} \end{pmatrix}$	$\begin{pmatrix} \underline{\Delta y} & \underline{y}_{12} \\ \underline{y}_{22} & \underline{y}_{22} \\ -\underline{y}_{21} & 1 \\ \underline{y}_{22} & \underline{y}_{22} \end{pmatrix}$	$\begin{pmatrix} \underline{h}_{22} & -\underline{h}_{12} \\ \underline{\Delta h} & -\underline{\Delta h} \\ -\underline{h}_{21} & \underline{h}_{11} \\ -\underline{\Delta h} & \underline{\Delta h} \end{pmatrix}$	$\begin{pmatrix} \underline{g}_{11} & \underline{g}_{12} \\ \underline{g}_{21} & \underline{g}_{22} \end{pmatrix}$	$\begin{pmatrix} \underline{a}_{21} & -\underline{\Delta a} \\ \underline{a}_{11} & -\underline{a}_{11} \\ 1 & \underline{a}_{12} \\ \underline{a}_{11} & \underline{a}_{11} \end{pmatrix}$
(a)	$\begin{pmatrix} \underline{z}_{11} & \underline{\Delta z} \\ \underline{z}_{21} & \underline{z}_{21} \\ 1 & \underline{z}_{22} \\ \underline{z}_{21} & \underline{z}_{21} \end{pmatrix}$	$\begin{pmatrix} -\underline{y}_{22} & -1 \\ \underline{y}_{21} & \underline{y}_{21} \\ -\underline{\Delta y} & -\underline{y}_{11} \\ \underline{y}_{21} & \underline{y}_{21} \end{pmatrix}$	$\begin{pmatrix} -\underline{\Delta h} & -\underline{h}_{11} \\ \underline{h}_{21} & -\underline{h}_{21} \\ -\underline{h}_{22} & -1 \\ \underline{h}_{21} & -\underline{h}_{21} \end{pmatrix}$	$\begin{pmatrix} 1 & \underline{g}_{22} \\ \underline{g}_{21} & \underline{g}_{21} \\ \underline{g}_{11} & \underline{\Delta g} \\ \underline{g}_{21} & \underline{g}_{21} \end{pmatrix}$	$\begin{pmatrix} \underline{a}_{11} & \underline{a}_{12} \\ \underline{a}_{21} & \underline{a}_{22} \end{pmatrix}$

Δ Determinante der Matrix: z. B. $\underline{\Delta h} = \underline{h}_{11}\underline{h}_{22} - \underline{h}_{12}\underline{h}_{21}$

Vierpolersatzschaltbilder. Die in den Vierpolgleichungen ausgedrückten Zusammenhänge zwischen Ein- und Ausgangsgrößen eines linearen Vierpols lassen sich durch ein Vierpolersatzschaltbild veranschaulichen. Die Verkopplungen zwischen den Anschlussklemmen werden durch Ersatzschaltbildelemente in Form von komplexen Widerständen bzw. Leitwerten und gesteuerten Quellen repräsentiert. Bild 2.8 zeigt die wichtigsten von ihnen.

Das π -Ersatzschaltbild ist insbesondere für die physikalisch orientierte Transistorbeschreibung von Bedeutung. Zwischen π - und y -Ersatzschaltbild besteht folgender Zusammenhang:

$$\underline{Y}_1 = \underline{y}_{11} + \underline{y}_{12} \quad (2.8)$$

$$\underline{Y}_2 = \underline{y}_{22} + \underline{y}_{12} \quad (2.9)$$

$$\underline{Y}_3 = -\underline{y}_{12} \quad (2.10)$$

$$\underline{S} = \underline{y}_{21} - \underline{y}_{12} \quad (2.11)$$

Umrechnung der Vierpolparameter. Die verschiedenen Vierpolbeschreibungen sind ineinander umrechenbar. Dies kann notwendig sein, um die Berechnung einer bestimmten Schaltung zu vereinfachen. Die Zusammenhänge enthält Tabelle 2.4.

Index

A

A-Betrieb 193
AB-Betrieb 198
Abfallzeit 52, 91
Abtastfilter 261
Abtastfrequenz 347
Abtast-Halte-Glied 349 f.
Abtaste 346
Abwärtswandler 329
Addierer 231
Admittanzmatrix 29
A/D-Wandler 342
aktiver Bereich 69
Akzeptoren 15
AM-Demodulator 307
AM-Modulator 305
Amplitudenbedingung 222, 290
Amplitudenfrequenzgang 35, 258
Amplitudenmodulation 304
Anreicherungs-Typ 103
Anstiegszeit 90
aperiodischer Grenzfall 288
Apertur-Fehler 346
Arbeitsbereich, sicherer 72
Arbeitspunkteinstellung 73, 165
Arbeitspunktstabilisierung 83, 171
Arbeitspunktverschiebung 75
Arbeitspunktwahl 170, 175, 177
Atombindung 14
Auflösung 342, 353
Aufwärtswandler 331
Ausgangskennlinie 68
Ausgangsleitwert 111, 120
Ausgangswiderstand 76, 177
Ausschaltfaktor 90
Aussteuerbereich 170, 175, 177
automatische Verstärkungssteuerung 147

B

Backgatesteilheit 114
Bahnwiderstand 48

Bandabstand 16
Bandbreite 199, 215, 226
Bändermodell 15
Bandgap-Referenz 336
Bandmittenfrequenz 199
Bandpass 262
– 2. Ordnung 274 f.
Bandsperr 262, 278
– 2. Ordnung 278
Basisbahnwiderstand 79
Basisschaltung 80, 173, 177
Basisstromspeisung 74
Basisweite 65
–, elektronische 71, 85
B-Betrieb 196
Besselfilter 260
Besselfunktion 311
Betriebsbereich, nutzbarer 46, 72, 106
Betriebsparameter 33, 163
Beweglichkeit 18
Bipolartransistor 65
– als elektronischer Schalter 86
– als Verstärker 74
Biquad 261
Bodediagramm 35
Body-Effekt 114
Bootstrap-Effekt 216
Bootstrap-Kapazität 216
Brückengleichrichter 322
Butterworthfilter 260, 280

C

Carson-Bandbreite 312
Cauerfilter 260
CC-OPV 147
CMOS-Inverter 116
CMRR 183
Colpitts-Oszillator 313
Current Conveyor Typ II 148
Current-Feedback-OPV 147
CV-OPV 147, 248

D

Darlington-Schaltung 192
 D/A-Wandler 342
 –, fehlerkorrigierender 359
 D/A-Wandlungsverfahren 354
 Depletion-MOSFET 106
 Depletion-Typ 103
 Dezimierer 352
 Diac 98
 Diamond-Transistor 148, 250
 differenzielle Nichtlinearität 343
 Differenzierer 235
 Differenzverstärker 181, 188
 Differenzverstärkung 135, 182
 Diffusionskapazität 46, 48
 Diffusionslänge 15
 Diffusionsspannung 43
 Diffusionsstrom 20, 43
 Diode, thermische 158
 Diodenkennlinie 25, 69
 Diodenrauschen 127
 Diodensättigungsstrom 44, 52
 Diskriminator 314
 Dividierer 242
 DMOS-FET 117
 Donatoren 15
 Draindurchbruch 107
 Drainschaltung 178
 Driftquelle 84
 Driftverstärkung 172
 Drosselregler 329
 Dual-Slope-Verfahren 348
 Dunkelstrom 151
 Dunkelwiderstand 150
 Durchbruch 72
 Durchbruchspannung 45
 Durchflusswandler 339

E

Early-Effekt 70, 111
 Early-Spannung 70
 Ebers-Moll-Ersatzschaltbild 68
 Ebers-Moll-Modell 68
 Eigenleitung 13
 Eigenleitungsdichte 14
 Eingangskennlinie 68 f.
 Eingangswiderstand 76, 177
 Einschaltverzögerung 89
 Einschwingverhalten 224

Einweggleichrichter 321
 Einweggleichrichterschaltung 53
 Elektrometerverstärker 216, 230
 Elementarladung 18
 elliptische Filter 260
 Emitterfolger 175
 Emitterschaltung 77, 80, 165, 177
 –, Kleinsignalersatzschaltbild 166
 Empfindlichkeit, spektrale 150
 Enhancement-Typ 103
 ENOB 345
 Epitaxie-Planar-Transistor 65
 ER-Inverter 115
 Ersatzschaltbild 25
 –, h -, y -, π - 32
 – zur Arbeitspunkteinstellung 73

F

Feldeffekttransistor 102
 Feldstrom 20
 Fensterkomparator 245
 Fermipotenzial 109
 FET 102
 Filter, elliptische 260
 –, passive 262
 Filterapproximation 259, 284
 Filterkatalog 267
 Filterrealisierung 261
 Filterschaltung 257
 Filtertoleranzschema 259
 Flash-Wandler 350
 Flussspannung 45
 FM-Demodulator 314
 FM-Modulator 313
 Fotodiode 151
 Fotogeneration 19, 150 f.
 Fotosensor 150
 Fotostrom 151
 Fototransistor 152
 Fotowiderstand 150
 Freilaufdiode 55
 Frequenzgang 81, 139, 199, 216
 Frequenzgangkompensation 227
 Frequenzgangkorrektur 225
 Frequenzhub 316
 Frequenzmodulation 310
 Frequenzumsetzer 303
 Funkelrauschen 127
 Funktionsgenerator 298

G

Gatedurchbruch 106

Gateschaltung 178
 Gegenkopplung 206 f.
 Gegentaktwandler 340
 Generation 14
 –, thermische 19
 Gleichrichterdiode 53
 Gleichrichterschaltung 321
 Gleichstromwiderstand 46
 Gleichtaktunterdrückung 135, 183
 Gleichtaktverstärkung 135, 183
 Grenzfrequenz 82, 113, 151, 214, 257
 – des Transistors 80
 Großsignalersatzschaltung 50
 Großsignalanalyse 26
 Gruppenlaufzeit 258
 GTO-Thyristor 98
 Gummel-Poon-Modell 88
 Gunn-Diode 62
 Gunn-Effekt 62
 Güte 263
 Gütefaktor 275

H

Hall-Effekt 158
 Hall-Element 159
 Hall-Spannung 159
 Heißleiter 156
 HF-Ersatzschaltbild 78
 Hochfrequenz-Kleinsignalmodell 78
 Hochfrequenzverhalten 112
 Hochpass, 1. Ordnung 274
 – 2. Ordnung 271
 Hüllkurvendetektor 314
 Hybridmatrix 29
 Hysterese 243

I

IGFET 103
 Impedanzmatrix 29
 Impulsoszillator 298
 Impulszündung 98
 instabile Rückkopplung 207
 integrale Nichtlinearität 343
 Integrator 238
 integrierter Schaltregler 333
 Intrinsic-Zone 54
 Inversbetrieb 67
 Invershybridmatrix 29
 Inverter 115
 invertierender Wandler 332

J

JFET 103
 Jitterfehler 346

K

Kaltleiter 157
 Kanalabschnürung 105
 Kanalladung 108
 Kanallängenverkürzung 111
 Kanalauschen, thermisches 128
 Kanalstrom 109
 Kapazitätsdiode 58, 313
 kapazitive Kopplung 200
 Kaskodeschaltung 179
 –, Betriebsparameter 180
 Kettenmatrix 29, 32
 Kettenschaltung 32
 Kirk-Effekt 85
 Klasse-A-Verstärker 193
 Klasse-AB-Verstärker 198
 Klasse-B-Verstärker 196
 Kleinsignalanalyse 27
 Kleinsignalersatzschaltbild 27
 – des pn-Übergangs 48
 Kleinsignalersatzschaltung 27
 Kleinsignalmodell 75 f., 162
 – der Diode 48
 – des MOSFET 110
 Kleinsignalverhalten 47, 119
 Klirrfaktor 28, 311
 Kollektorschaltung 175, 177
 –, Betriebsparameter 176
 Komparator 243
 Konstantstromquelle 191
 Kopplung, direkte 200
 –, kapazitive 200
 –, RC- 200

L

Ladungspumpe 333
 –, integrierte 335
 Ladungsspeicherung 46
 Ladungsträgerlebensdauer 15, 19
 Ladungsträgertransport 20
 Laserdiode 154
 Laufzeit 47
 Lawinendurchbruch 46
 Lawineneffekt 56
 Lawinenvervielfachung 61
 LC-Oszillator 293

Leistungsbilanz 28, 194
 Leistungsendstufe 193
 Leistungsschalter 332
 Leitfähigkeit 13, 18
 Leitwertmatrix 81
 Leitwertparameter 110
 Leuchtdiode 153
 Linearisierung 209
 Linearität 28
 Linearitätsfehler 343
 Löcherdichte 21
 Logarithmierer 243

M

Magnetfeldsensor 158
 Magnetowiderstand 158
 Majoritätsträger 17
 MESFET 118
 Mikrowellendiode 61
 Miller-Effekt 215
 Miller-Kapazität 226
 Minoritätsträger 17
 Mischer 317
 MISFET 103
 Mitkopplung 206 f., 222, 290
 Mittelpunktgleichrichter 322
 Modulationsgrad 304
 Modulationsindex 310
 Modulator 352
 Monotonie 346
 MOSFET 103
 – als elektronischer Schalter 115
 –, Kleinsignalmodell 110
 –, selbstleitender 103
 –, selbstsperrender 103
 MSB 350
 Multiplizierer 241

N

Nachlaufsynchronisation 308
 Nachziehfehler 347
 Nettogenerationsrate 19
 Nettorekombinationsrate 19
 NF-Verhalten 48
 NF-Verstärkung 139
 Nichtlinearität, differenzielle 343
 –, integrale 343
 Niederfrequenz-Kleinsignalmodell 76
 Niederfrequenzverhalten 111

NTC-Widerstand 156
 Nyquistkriterium 222

O

Offsetfehler 343
 Offsetspannung 136
 Offsetspannungsdrift 201
 Operationsverstärker 133
 –, frequenzgangkompensierter 226
 Operationsverstärkertypen 146
 Optokoppler 156
 OPV 133
 OPV-Schaltung 229
 OrCAD 37
 Ortskurve 35, 79
 Oszillator 207
 –, spannungsgesteuerter 309
 OTA 189
 oversampling 352

P

Parallelresonanzkreis 266
 Parallelschaltung 33
 Parallelschwingkreis 293
 Parameterempfindlichkeit 211
 Pegelversatzstufe 201
 Pentodenbereich 105
 Phasenanschnittsteuerung 98
 Phasenbedingung 222, 289
 Phasendetektor 309
 Phasenfrequenzgang 35, 258
 Phasenhub 316
 Phasenlaufzeit 258
 Phasenmodulation 315
 Phasenschieber 290
 Phasenschieber-Oszillator 290
 PID-Regler 253
 Pierce-Oszillator 296
 π -Ersatzschaltbild 78, 110
 Pinch off 105
 pin-Diode 54
 –, Durchbruchspannung 55
 Pipeline-Wandler 351
 PI-Regler 252
 PLL 308
 PLL-Demodulator 314
 PM-Demodulator 317
 PM-Modulator 316
 pnp-Transistor 67
 pn-Übergang 41
 Poisson-Gleichung 42
 Pole-Splitting-Kapazität 226

Polgüte 275
 P-Regler 252
 PSpice 37
 PTAT-Spannung 336
 PTC-Widerstand 157
 Pulsdichtenmodulation 355
 Pulsweitenmodulation 355
 Punch Through 72

Q

Quantisierungsfehler 343
 Quantisierungsrauschen 353
 Quarzoszillator 295
 Quelle, gesteuerte 25

R

R2R-Netzwerk 357
 Rauschen 125, 145
 –, $1/f$ - 127, 129
 –, weißes 125
 Rauschfaktor 130
 Rauschleistungsdichte 125
 Rauschmaß 130
 Rauschspannung 129
 RC-Biquad 280
 RC-Filter, aktive 266
 RC-Hochpass 262
 RC-Kopplung 200
 RC-Oszillator 290
 RC-Tiefpass 262
 Rechenregeln, für Blockschaltbilder 37
 Rechenschaltung 231
 Referenzspannungsquelle 326, 335, 337
 Referenzstromquelle 190
 Regler 251
 Reihenschaltung 33
 Rekombination 44
 –, direkte 153
 Relaxationsoszillator 299
 Resonanzfrequenz 264
 Resonanzkreis 314
 Resonanzschärfe 263
 Reststrom 71
 RL-Hochpass 262
 RL-Tiefpass 262
 Rückkoppelfaktor 207
 Rückkopplung, instabile 207
 –, stabile 207
 Rückkopplungsgrad 207
 Rückwirkungsfreiheit 28

S

Sallen & Key-Tiefpass 269, 284
 Sample & Hold 349
 Sättigungsspannung 86
 Sättigungsstrom 45, 119
 SC-Biquad 283
 SC-Filter 281
 Schaltodiode 55
 Schalter 65, 105, 115
 Schalterkennlinie eines pn-Übergangs 50
 Schaltermodell 87
 Schaltnetzteil 338
 Schaltregler, integrierter 333
 Schaltverhalten 50
 Schleifenverstärkung 207
 Schmitt-Trigger 243
 Schottky-Diode 60, 91
 Schottky-Transistor 91
 Schrotrauschen 127
 Schwellspannung 109, 114, 117
 Schwellwertschalter 243
 Schwingbedingung 222, 289
 Schwingungserzeugung 286
 Schwingungspaketsteuerung 99
 SC-Integrator 281
 Selbsterregung 207 f.
 Serienresonanzkreis 262, 266
 SFET 103, 118
 Shockley-Reed 21
 7-Segmentanzeige 154
 Sigma-Delta-Wandler 352
 Signalflussdarstellung 36
 Signal-Rausch-Abstand 130, 344, 353
 Signalverzerrung 49
 SINAD 344
 Sinusoszillatoren 286
 Slewrate 140, 144
 Solarzelle 152
 Sourcefolger 178
 Sourceschaltung 178
 Spannungsfestigkeit 72
 Spannungsfolger 230
 spannungsgesteuerter Oszillator 309
 Spannungsregler 326
 Spannungsrückwirkung 76
 Spannungsrückwirkungskennlinie 68
 Spannungsstabilisierung 325
 Spannungsstabilisierungsschaltung 57
 Spannungs-Strom-Wandler 147, 218
 Spannungsverstärker 147, 162, 218
 Spannungsverstärkung 81, 133, 177

Speicherladung 90
 Speicherzeit 51, 90
 Speicherzeitkonstante 90
 Sperrbereich 69, 105
 Sperrschicht 42
 Sperrschicht-FET 118
 Sperrschichtkapazität 46
 Sperrschichtweite 44
 Sperrstrom 44, 52, 83
 Sperrwandler 339
 Spiegelfrequenzproblem 319
 Spiegelverhältnis 186
 Sprungantwort 224
 stabile Rückkopplung 207
 Stabilisierungsfaktor 57, 64
 Stabilität 222, 225
 Steilheit 77, 111, 120
 Steilheitsverstärker 189, 209
 Störstelle 15
 Störstellenerschöpfung 16
 Störstellenreserve 16
 Stoßionisation 19
 Strombank 187, 245
 Stromflusswinkel 98, 323
 Stromquelle 189, 245
 –, gesteuerte 189
 –, spannungsgesteuerte 245
 –, stromgesteuerte 245
 Strom-Spannungs-Kennlinie 108
 Strom-Spannungs-Wandler 147, 218
 Stromspiegel 185, 245
 Stromübertragungskennlinie 68
 Stromversorgungseinheit 321
 Stromverstärker 218
 Stromverstärker-OPV 147
 Stromverstärkung 76, 79, 85, 177
 Stromverstärkungsfaktor 80
 Struktur, kristalline 13
 Subtrahierer 232
 Superhet-Empfänger 319
 Switched-Capacitor-Filter 281
 Symmetrie 28
 Synchrondemodulation 308

T

Temperaturabhängigkeit 83, 117
 Temperaturbeiwert 52, 83
 Temperaturdrift 200
 Temperaturdurchgriff 53, 83
 Temperaturkoeffizient 56

Temperaturmessfühler 156
 Temperatursensor 156
 Temperaturspannung 20, 43
 Thermistor 156
 Thermoelement 157
 Thermowiderstand 156
 Thomson-Filter 260
 Thyristor 95
 Tiefpass, 1. Ordnung 270
 – 2. Ordnung 266
 Tiefpass-Bandpass-Transformation 274
 Tiefpass-Bandsperren-Transformation 278
 Tiefpass-Hochpass-Transformation 271
 Tiefpassschaltung 2. Ordnung 267
 Toleranzschema 259
 Transadmittanzverstärker 147, 246
 Transferstromquelle 68
 Transimpedanzverstärker 147, 209, 248
 Transistor 65
 Transistorrauschen 128
 Transistorschalter 86
 Transistorschaltung, mehrstufige 221
 Transistorverstärkerschaltung, einstufige 177
 Transitfrequenz 80, 225
 Triac 98
 Triodenbereich 105, 110
 Tschebyschefffilter 260
 –, inverse 260
 Tunnel diode 60
 Tunneleffekt 56, 60

U

Überabtastrate 352
 Übersteuerung 69, 90
 Übersteuerungsgrad 70, 86, 88
 Übersteuerungszustand 70
 Übertragungsbandbreite 214
 Übertragungsverhalten 75
 Umkehrbarkeit 29
 Umkehrfunktion 242
 Umkehrverstärker 231
 Universalfilter 280

V

VCO 309
 VC-OPV 147, 246
 – als Leitungstreiber 247
 Verarmungs-Typ 103
 Verarmungszone 42
 Verstärker 65, 69, 74, 105
 –, invertierender 230
 –, nicht invertierender 229

Verstärkerstufe, Frequenzverhalten 199
–, Kopplung 200
Verstärkungs-Bandbreiten-Produkt 140, 215
Verstärkungsfehler 343
Verstärkungssteuerung, automatische 147
Vierpol 28
Vierpolgleichung 29
Vierpoloszillator 289
Vierpolparameter 29, 75
–, Umrechnung 31
Vierquadrantenmultiplizierer 242
virtuelle Masse 231
VV-OPV 147

W

Wandler, invertierender 332
–, piezoelektrischer 159
–, piezoresistiver 159
Weak-Inversion-Strom 115

Widerstand, differentieller 48
–, thermischer 72
Widerstandsrauschen 125
Wien-Oszillator 291
WILSON-Spiegel 186, 189

Y

y-Parameter 81

Z

Z-Diode 56, 191
Zener-Effekt 56
Zone, verbotene 15, 153
Z-Spannung 56
Zündspannung 95
Zweipoloszillator 286
Zweiquadrantenmultiplizierer 242, 247
Zweiweggleichrichter 321