

Leonhard Stiny

Aktive elektronische Bauelemente

Aufbau, Struktur, Wirkungsweise,
Eigenschaften und praktischer Einsatz
diskreter und integrierter
Halbleiter-Bauteile

4. Auflage

 Springer Vieweg

Aktive elektronische Bauelemente

Lizenz zum Wissen.

Sichern Sie sich umfassendes Technikwissen mit Sofortzugriff auf tausende Fachbücher und Fachzeitschriften aus den Bereichen: Automobiltechnik, Maschinenbau, Energie + Umwelt, E-Technik, Informatik + IT und Bauwesen.

Exklusiv für Leser von Springer-Fachbüchern: Testen Sie Springer für Professionals 30 Tage unverbindlich. Nutzen Sie dazu im Bestellverlauf Ihren persönlichen Aktionscode **C0005406** auf www.springerprofessional.de/buchaktion/



**Jetzt
30 Tage
testen!**

Springer für Professionals.
Digitale Fachbibliothek. Themen-Scout. Knowledge-Manager.

-  Zugriff auf tausende von Fachbüchern und Fachzeitschriften
-  Selektion, Komprimierung und Verknüpfung relevanter Themen durch Fachredaktionen
-  Tools zur persönlichen Wissensorganisation und Vernetzung

www.entschieden-intelligenter.de

Springer für Professionals

 Springer

Leonhard Stiny

Aktive elektronische Bauelemente

Aufbau, Struktur, Wirkungsweise,
Eigenschaften und praktischer Einsatz
diskreter und integrierter
Halbleiter-Bauteile

4., durchgesehene Auflage



Springer Vieweg

Leonhard Stiny
Haag a. d. Amper, Deutschland

ISBN 978-3-658-24751-5

ISBN 978-3-658-24752-2 (eBook)

<https://doi.org/10.1007/978-3-658-24752-2>

Die Deutsche Nationalbibliothek verzeichnet diese Publikation in der Deutschen Nationalbibliografie; detaillierte bibliografische Daten sind im Internet über <http://dnb.d-nb.de> abrufbar.

Springer Vieweg

Die erste Auflage erschien unter dem Titel „Handbuch aktiver elektronischer Bauelemente“ im Franzis Verlag, 2009.

© Springer Fachmedien Wiesbaden GmbH, ein Teil von Springer Nature 2015, 2016, 2019

Das Werk einschließlich aller seiner Teile ist urheberrechtlich geschützt. Jede Verwertung, die nicht ausdrücklich vom Urheberrechtsgesetz zugelassen ist, bedarf der vorherigen Zustimmung des Verlags. Das gilt insbesondere für Vervielfältigungen, Bearbeitungen, Übersetzungen, Mikroverfilmungen und die Einspeicherung und Verarbeitung in elektronischen Systemen.

Die Wiedergabe von allgemein beschreibenden Bezeichnungen, Marken, Unternehmensnamen etc. in diesem Werk bedeutet nicht, dass diese frei durch jedermann benutzt werden dürfen. Die Berechtigung zur Benutzung unterliegt, auch ohne gesonderten Hinweis hierzu, den Regeln des Markenrechts. Die Rechte des jeweiligen Zeicheninhabers sind zu beachten.

Der Verlag, die Autoren und die Herausgeber gehen davon aus, dass die Angaben und Informationen in diesem Werk zum Zeitpunkt der Veröffentlichung vollständig und korrekt sind. Weder der Verlag noch die Autoren oder die Herausgeber übernehmen, ausdrücklich oder implizit, Gewähr für den Inhalt des Werkes, etwaige Fehler oder Äußerungen. Der Verlag bleibt im Hinblick auf geografische Zuordnungen und Gebietsbezeichnungen in veröffentlichten Karten und Institutionsadressen neutral.

Springer Vieweg ist ein Imprint der eingetragenen Gesellschaft Springer Fachmedien Wiesbaden GmbH und ist ein Teil von Springer Nature.

Die Anschrift der Gesellschaft ist: Abraham-Lincoln-Str. 46, 65189 Wiesbaden, Germany

Vorwort

Dieses Buch stellt allen, ob in Ausbildung, Lehre, Studium oder Beruf, ein sowohl detailliertes als auch umfangreiches und in der Elektronikpraxis anwendbares Wissen über aktive elektronische Bauelemente zur Verfügung. Dabei werden nicht nur die im eigentlichen Sinne aktiven, sondern alle auf Halbleitern basierenden Bauteile behandelt. Das Werk vermittelt ausführliche Kenntnisse über Aufbau, Eigenschaften, Funktionsweise und Einsatzmöglichkeiten dieser Bauelemente. Es kann als Lehrbuch im Studium, in der beruflichen Fortbildung, zum Selbststudium und als Nachschlagewerk in der Laborpraxis verwendet werden. Das Buch bildet eine Brücke zwischen den physikalischen Grundlagen von Halbleiter-Bauelementen und deren ingenieurtechnischen Anwendungen in der Praxis der modernen Elektronik. Dabei werden auch neueste Bausteine der Computertechnologie behandelt.

Damit der Anwender elektronische Bauelemente in Schaltungen zu fehlerfreien und betriebssicheren Funktionseinheiten, Baugruppen oder Geräten zusammenfügen kann, muss er die Wirkungsweise dieser Bauelemente verstanden haben. Nur ein Wissen über ihre Kenngrößen und speziellen Eigenschaften ermöglicht es, entsprechend Datenblattangaben und Herstellerunterlagen die optimalen Bauteile für eine bestimmte Anwendung auszuwählen. Sowohl für die Analyse elektronischer Schaltungen als auch bei der Schaltungsdimensionierung sind Kenntnisse von Aufbau und Funktionsweise der eingesetzten Bauelemente der Halbleiterelektronik unbedingt erforderlich.

Die theoretischen und physikalischen Grundlagen der Halbleitertechnik werden als Grundgerüst vermittelt. Auf dieser Basis werden für alle Halbleiter-Bauelemente Aufbau und Wirkungsweise erläutert, spezifische Merkmale, Daten, Kenngrößen und Charakteristiken angegeben und deren Bedeutung erklärt. Für die verschiedenen Typen von Bauteilen werden übersichtlich die Vor- und Nachteile sowie mögliche Anwendungen aufgezeigt. Dabei werden alle technischen Aspekte von der Herstellung bis zum Einsatz betrachtet. Durch zahlreiche Abbildungen wird eine Vorstellung von Aufbau und Aussehen der Bauelemente vermittelt. Viele Tabellen und Beispiele mit Berechnungen unterstützen die Auswahl, Dimensionierung und Anwendung von elektronischen Halbleiter-Bauelementen. Einen in der Praxis verwertbaren Nutzen liefern in diesem Werk allgemein gehaltene, für jeden Einsatzfall gültige Beschreibungen, welche auf spezielle Ansätze leicht anpassbar und erweiterbar sind. So findet man Formeln für den täglichen Gebrauch in der

Laborpraxis, aber auch deren Herleitungen, um den theoretischen Hintergrund komplexer Sachverhalte verständlich zu machen.

Nach einer ersten Auflage bei einem anderen Verlag erscheint dieses Werk beim Springer-Verlag in zweiter, überarbeiteter Auflage.

An dieser Stelle sei noch auf mein Werk „Passive elektronische Bauelemente“ (Springer-Verlag) hingewiesen, welches alle Aspekte dieser großen Gruppe von Bauteilen der Elektronik behandelt.

Haag a. d. Amper
Februar 2018

Leonhard Stiny

Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung	1
2	Grundlagen der Halbleiter	5
2.1	Halbleiter im Periodensystem der Elemente	5
2.2	Halbleiter zwischen Nichtleiter und Leiter	7
2.3	Aufbau der Atome	8
2.3.1	Bohr'sches Atommodell	8
2.3.2	Elektronenpaarbindung, Kristallgitter	11
2.3.3	Schalenmodell und Wechselwirkung	13
2.3.4	Bändermodell und Fermi-Statistik	15
2.4	Direkte und indirekte Halbleiter	22
2.4.1	Quanten und Wellen	22
2.4.2	Direkte Rekombination	24
2.4.3	Indirekte Rekombination	25
2.5	Eigenleitung	26
2.5.1	Eigenleitungsdichte	27
2.5.2	Ladungsträgerlebensdauer	30
2.5.3	Beweglichkeit	31
2.6	Störstellenleitung	32
2.6.1	Dotieren	32
2.6.2	Störstellenleitung im Bändermodell	34
2.6.3	Allgemeines zu dotierten Halbleitern	35
2.6.4	Einfluss der Temperatur auf dotierte Halbleiter	36
2.6.5	Auswirkung der Temperatur auf Halbleiterbauelemente	38
3	Der pn-Übergang	39
3.1	Der pn-Übergang ohne äußere Spannung	39
3.1.1	Der ideale abrupte pn-Übergang	39
3.1.2	Diffusion und Rekombination im pn-Grenzgebiet	41
3.1.3	Ladungsträgerdichte	42
3.1.4	Raumladungsdichte	44

3.1.5	Feldstärke und Diffusionsspannung	44
3.1.6	Sperrschichtbreite	48
3.1.7	Sperrschichtkapazität	49
3.1.8	Energiebänder-Modell des pn-Übergangs	50
3.2	Der pn-Übergang mit äußerer Spannung	52
3.2.1	Äußere Spannung in Sperrrichtung	52
3.2.1.1	Verbreiterung der Grenzschicht	52
3.2.1.2	Sperr sättigungsstrom	54
3.2.1.3	Sperrschichtweite und Sperrschichtkapazität	56
3.2.2	Äußere Spannung in Flussrichtung	58
3.3	Durchbruchmechanismen beim pn-Übergang	61
3.3.1	Lawinendurchbruch	62
3.3.2	Zener-Durchbruch	64
3.3.3	Überlappung von Lawinen- und Zener-Effekt	66
3.3.4	Thermischer Durchbruch (2. Durchbruch)	66
3.3.5	Durchgriff (punch-through)	67
3.4	Schaltverhalten des pn-Übergangs	69
3.4.1	Einschaltvorgang	69
3.4.1.1	Kapazitives Verhalten	69
3.4.1.2	Induktives Verhalten	70
3.4.2	Aus- und Umschaltvorgang	70
3.4.2.1	Unterbrechen des Durchlassstromes	70
3.4.2.2	Umschalten von Fluss- in Sperrbetrieb	71
3.5	Gesamtkennlinie des pn-Übergangs	72
3.6	Halbleiter-Metall-Übergang	73
4	Halbleiterdioden	77
4.1	Ausführung	77
4.2	Aufbau	77
4.3	Elektrische Funktion	78
4.4	Bauarten	79
4.5	Verhalten einer Diode	80
4.5.1	Kennlinienbereiche	81
4.5.1.1	Durchlassbereich	82
4.5.1.2	Sperrbereich	83
4.5.1.3	Durchbruchbereich	83
4.5.2	Näherungen für die Diodenkennlinie	83
4.5.2.1	Näherung 0. Ordnung	84
4.5.2.2	Näherung 1. Ordnung	84
4.5.2.3	Näherung 2. Ordnung	84
4.5.3	Beschreibung durch Gleichungen	86
4.5.4	Bestimmung der Diodenparameter mit Regressionsverfahren	88

4.5.5	Kleinsignalverhalten von Dioden	90
4.5.5.1	Arbeitspunkt	90
4.5.5.2	Gleichstromwiderstand	91
4.5.5.3	Wechselstromwiderstand – Differenzieller Widerstand	91
4.5.5.4	Wirkung des differentiellen Widerstandes	92
4.5.6	Schaltverhalten von Dioden	94
4.5.6.1	Ideales Schaltverhalten	94
4.5.6.2	Umschalten von Sperr- in Flussrichtung	95
4.5.6.3	Umschalten von Fluss- in Sperrrichtung	96
4.5.6.4	Ein- und Ausschalten bei ohmsch-induktiver Last	97
4.6	Temperaturabhängigkeit der Diodenparameter	98
4.6.1	Temperaturabhängigkeit des Sperrstromes	98
4.6.2	Temperaturabhängigkeit der Durchlassspannung	99
4.6.3	Zusammenfassung: Temperaturabhängigkeit der Diodenparameter	100
4.7	Kenn- und Grenzdaten von Dioden	101
4.7.1	Grenzspannungen	101
4.7.2	Grenzströme	102
4.7.3	Sperrstrom	102
4.7.4	Maximale Verlustleistung	102
4.8	Auszüge aus Datenblättern von Dioden	103
4.8.1	Silizium-Epitaxial-Planar-Diode 1N 4148	103
4.8.2	Silizium-Diffusions-Dioden 1N 4001... 1N 4007	107
4.9	Herstellungsmethoden für pn-Übergänge	109
4.9.1	Legierungstechnik	109
4.9.2	Planartechnik	110
4.9.2.1	Diffusion	110
4.9.2.2	Epitaxie	111
4.9.2.3	Ionenimplantation	112
4.9.2.4	Kontaktierung	113
4.10	Aufbau von Halbleiterdioden	113
4.10.1	Einzeldiode	113
4.10.1.1	Spitzendioden	113
4.10.1.2	Flächendioden	115
4.10.1.3	Leistungsdioden	116
4.10.1.4	Gehäuse	117
4.10.2	Integrierte Diode	118
4.11	Diodentypen	119
4.11.1	Schaltdiode, Universaldiode	119
4.11.2	Gleichrichterdiode	119
4.11.3	Schottky-Diode	119

4.11.4	Suppressordiode	120
4.11.5	Temperatursensoren	124
4.11.6	DIAC	124
4.11.6.1	Dreischichtdiode	125
4.11.6.2	Fünfschichtdiode	125
4.11.6.3	Vierschichtdiode	126
4.11.6.4	Anwendungen der Mehrschichtdioden	128
4.11.6.5	Kennwerte von Mehrschichtdioden	128
4.11.7	Zenerdiode, Z-Diode	128
4.11.8	Avalanchediode	130
4.11.9	Stromregeldiode	130
4.11.10	Leuchtdiode (Lumineszenzdiode, LED)	131
4.11.10.1	Grundsätzliches	131
4.11.10.2	Funktionsprinzip	132
4.11.10.3	Herstellung	132
4.11.10.4	Material und Farben, Spektrum	133
4.11.10.5	Technische Ausführung, Aufbau	136
4.11.10.6	Flächen- und Kantenstrahler	136
4.11.10.7	Wirkungsgrad	139
4.11.10.8	Eigenschaften	139
4.11.10.9	Kennwerte und Grenzwerte	142
4.11.10.10	Anwendungen und Einsatzbereiche	143
4.11.11	Organische Leuchtdiode (OLED)	144
4.11.11.1	Vorteile	144
4.11.11.2	Nachteile	145
4.11.11.3	Organische Materialien	145
4.11.11.4	Aufbau	146
4.11.11.5	Funktionsweise	147
4.11.11.6	Aktivmatrix- und Passivmatrix-Displays	148
4.11.12	Laserdiode (LD)	149
4.11.12.1	Grundlagen	149
4.11.12.2	Realisierungsbedingungen für die Funktion der Laserdiode	152
4.11.12.3	Aufbau der Materialschichten	156
4.11.12.4	Aufbau des Laserresonators, DFB-, DBR-Laser	157
4.11.12.5	Kenngößen	159
4.11.12.6	Eigenschaften und Besonderheiten	161
4.11.12.7	Anwendungen	163
4.11.12.8	Beispiel für Datenblattangaben einer Laserdiode	163
4.11.13	Fotodiode	163
4.11.13.1	Funktionsweise	164
4.11.13.2	Betriebsarten	168

4.11.13.3	Aufbau	170
4.11.13.4	Eigenschaften	171
4.11.13.5	Ausführungsformen	172
4.11.13.6	Anwendungen	173
4.11.14	Solarzelle	173
4.11.14.1	Aufbau einer Silizium-Solarzelle	174
4.11.14.2	Solarzellentypen	175
4.11.14.3	Verluste in Solarzellen	176
4.11.14.4	Eigenschaften von Solarzellen	177
4.11.14.5	Kenndaten der Solarzelle	179
4.11.14.6	Ersatzschaltbild der Solarzelle	182
4.11.14.7	Bypass-Diode	183
4.11.15	Kapazitätsdiode (Varaktor-Diode)	183
4.11.15.1	Allgemeines	184
4.11.15.2	Funktionsweise und Eigenschaften	184
4.11.15.3	Ersatzschaltung, Güte	184
4.11.15.4	Grenzfrequenz f_c (cut-off-frequency)	186
4.11.15.5	Temperaturabhängigkeit	186
4.11.15.6	Anwendungen	187
4.11.16	pin-Diode	189
4.11.16.1	Funktion	190
4.11.16.2	Anwendungen der pin-Diode	191
4.11.17	Tunneldiode (Esaki-Diode)	192
4.11.17.1	Grundlegendes zur Quantenphysik	193
4.11.17.2	Tunneleffekt	193
4.11.17.3	Aufbau und Funktion der Tunneldiode	195
4.11.17.4	Ersatzschaltung	197
4.11.17.5	Anwendungen der Tunneldiode	199
4.11.18	Rückwärtsdiode (Backwarddiode)	199
4.11.19	Gunndiode	200
4.11.19.1	Gunn-Effekt	200
4.11.19.2	Aufbau der Gunndiode	201
4.11.19.3	Funktionsweise der Gunndiode	201
4.11.19.4	Anwendungen der Gunndiode	206
4.11.20	IMPATT-Diode	207
4.11.20.1	Funktionsweise der IMPATT-Diode	207
4.11.20.2	Anwendungen der IMPATT-Diode	210
4.11.21	TRAPATT-Diode	210
4.11.22	BARITT-Diode	211
4.11.23	DOVETT-Diode	212
4.11.24	Ladungsspeicherungsdiode	213

4.11.25	Speicherschaltodiode (Step-Recovery-Diode)	213
4.11.26	Magnetdiode	215
4.11.26.1	Aufbau	215
4.11.26.2	Funktionsweise	215
4.11.26.3	Eigenschaften und Anwendungen	216
5	Bipolare Transistoren	217
5.1	Definition und Klassifizierung von Transistoren	217
5.2	Grundsätzlicher Aufbau des Transistors	220
5.3	Richtungen von Strömen und Spannungen	221
5.4	Betriebszustände (Arbeitsbereiche)	222
5.4.1	Aktiver Zustand (Normalbetrieb, Vorwärtsbetrieb)	222
5.4.2	Gesättigter Zustand (Sättigungsbetrieb)	223
5.4.3	Gesperrter Zustand (Sperrbetrieb)	223
5.4.4	Inverser Zustand (Inversbetrieb, Rückwärtsbetrieb)	224
5.5	Signaldynamik und Signalgröße	224
5.6	Funktionsweise	225
5.7	Die drei Grundschaltungen des Bipolartransistors	230
5.8	Einsatz als Verstärker oder Schalter	231
5.8.1	Verstärkerbetrieb	231
5.8.2	Schalterbetrieb	233
5.9	Kennlinien des Transistors	234
5.9.1	Eingangskennlinie	234
5.9.1.1	Verlauf der Eingangskennlinie	234
5.9.1.2	Differenzieller Eingangswiderstand	237
5.9.2	Ausgangskennlinie	238
5.9.2.1	Ausgangskennlinienfeld für Spannungs- und Stromsteuerung	238
5.9.2.2	Aktiver Bereich	239
5.9.2.3	Übersteuerungsbereich	240
5.9.2.4	Sperrbereich	241
5.9.2.5	Differenzieller Ausgangswiderstand	244
5.9.3	Steuerkennlinien	245
5.9.3.1	Strom-Steuerkennlinie	245
5.9.3.2	Spannungs-Steuerkennlinie	246
5.9.4	Rückwirkungskennlinie	247
5.9.5	Vierquadranten-Kennlinienfeld	248
5.10	Durchbruchspannungen und Grenzströme	250
5.10.1	Durchbruch 1. Art	250
5.10.1.1	Basis-Emitter-Diode	250
5.10.1.2	Basis-Kollektor-Diode	250
5.10.1.3	Kollektor-Emitter-Strecke	251

5.10.2	Durchbruch 2. Art	252
5.10.3	Grenzströme	252
5.11	Maximale Verlustleistung	252
5.11.1	Statischer Betrieb	252
5.11.2	Pulsbetrieb	255
5.12	Erlaubter Arbeitsbereich	257
5.13	Rauschen beim Bipolartransistor	258
5.13.1	Allgemeines zum Rauschen	258
5.13.2	Beschreibung stochastischer Signale	260
5.13.3	Rauschquellen beim Bipolartransistor	269
5.13.3.1	Thermisches Rauschen (Widerstandsrauschen)	269
5.13.3.2	Schrotrauschen (Schottky-Rauschen)	270
5.13.3.3	$1/f$ -Rauschen	271
5.13.3.4	Popcorn-Rauschen	271
5.13.3.5	Generations-Rekombinations-Rauschen	272
5.13.3.6	Stromverteilungsrauschen	272
5.13.3.7	Avalanche-Rauschen	272
5.13.4	Rauschzahl	272
5.13.4.1	Definition und Eigenschaften	272
5.13.4.2	Bereich weißes Rauschen	274
5.13.4.3	Bereich $1/f$ -Rauschen	275
5.13.4.4	Bereich hoher Frequenzen	276
5.14	Beschreibung durch Gleichungen	276
5.15	Abhängigkeiten der Stromverstärkung	277
5.15.1	Abhängigkeit der Stromverstärkung vom Arbeitspunkt	277
5.15.2	Abhängigkeit der Stromverstärkung von der Grundschaltung	278
5.15.2.1	Stromverstärkung der Basisschaltung	278
5.15.2.2	Stromverstärkung der Emitterschaltung	280
5.15.2.3	Stromverstärkung der Kollektorschaltung	280
5.15.2.4	Umrechnung der Stromverstärkungen	281
5.15.3	Stromverstärkung in Abhängigkeit der Frequenz, Grenzfrequenzen	281
5.15.3.1	β -Grenzfrequenz	281
5.15.3.2	Transitfrequenz	282
5.15.3.3	Maximale Schwingfrequenz	283
5.16	Dynamisches Schaltverhalten des Bipolartransistors	284
5.16.1	Schaltzeiten	285
5.16.1.1	Einschaltverzögerung t_d	285
5.16.1.2	Anstiegszeit t_r	285
5.16.1.3	Speicherzeit t_s	286
5.16.1.4	Abfallzeit t_f	287
5.16.1.5	Verkürzung der Schaltzeiten	287

5.17	Modelle und Ersatzschaltungen des Bipolartransistors	288
5.17.1	Die physikalische Ersatzschaltung	289
5.17.1.1	Das Ebers-Moll-Modell	290
5.17.1.2	Transportmodell	293
5.17.1.3	Gummel-Poon-Modell	294
5.17.1.4	Gleichstrom-Kleinsignalersatzschaltbild	295
5.17.2	Die formale Ersatzschaltung	301
5.17.2.1	Allgemeines zum Vierpol	301
5.17.2.2	h -Parameter	303
5.17.2.3	Bestimmung der h -Parameter aus den Kennlinien	304
5.17.2.4	Umrechnung der h -Parameter zwischen Grundsaltungen	306
5.17.2.5	Umrechnung von h -Parametern für andere Arbeitspunkte	307
5.17.2.6	y -Parameter	309
5.17.2.7	Umrechnung zwischen y - und h -Parametern	310
5.17.2.8	s -Parameter	311
5.17.2.9	Vierpolparameter und physikalisches Ersatzschaltbild	314
5.17.2.10	Berechnung des Betriebsverhaltens	314
5.17.3	Wechselstrom-Kleinsignalersatzschaltbild	317
5.18	Aufbau und Herstellungsverfahren von Bipolartransistoren	318
5.18.1	Spitzentransistor	318
5.18.2	Legierungstransistor	319
5.18.3	Mesatransistor	319
5.18.4	Planartransistor	320
5.18.4.1	Herstellung von Einzeltransistoren, innerer Aufbau	321
5.18.4.2	Bauformen, Gehäuse von Einzeltransistoren	321
5.18.4.3	Integrierte Transistoren, Herstellung und innerer Aufbau	323
5.18.4.4	Herstellungsprozess am Beispiel eines npn-Transistors	324
5.18.4.5	Emitterrandverdrängung	326
5.19	Hetero-Bipolartransistor (HBT)	327
5.20	Darlington-Transistor	330
5.20.1	Verlauf der Stromverstärkung	332
5.20.1.1	Stromverstärkung im Bereich 1	332
5.20.1.2	Stromverstärkung im Bereich 2 und 3	333
5.20.2	Schaltverhalten	334
5.20.3	Kleinsignalverhalten	335
5.20.4	Weitere Besonderheiten des Darlington-Transistors	336

6	Feldeffekttransistoren	337
6.1	Allgemeine Eigenschaften	337
6.2	Funktionsprinzip und Klassifikation	339
6.2.1	Praxis mit Feldeffekttransistoren	341
6.2.2	Unterschiede zwischen unipolaren und bipolaren Transistoren	343
6.3	Die drei Grundsaltungen des Feldeffekttransistors	344
6.4	Prinzipieller Aufbau und Wirkungsweise des Sperrschicht-FET	345
6.4.1	JFET ohne äußere Spannung	345
6.4.2	U_{GS} variabel, U_{DS} klein und konstant	346
6.4.3	U_{DS} variabel, $U_{GS} = 0$	348
6.4.4	U_{DS} und U_{GS} variabel	349
6.4.5	Kennlinien des JFET, Beschreibung durch Gleichungen	351
6.4.5.1	Begriffe	351
6.4.5.2	Kennlinienarten	352
6.4.5.3	Übertragungskennlinie	352
6.4.5.4	Ausgangskennlinienfeld	353
6.4.6	Temperaturabhängigkeit der JFET-Parameter	355
6.5	Prinzipieller Aufbau und Wirkungsweise des MOSFETs	357
6.5.1	MOS-Kondensator, Grundlagen des MOSFETs	357
6.5.2	Aufbau eines n-Kanal MOSFET	359
6.5.2.1	Anreicherungstyp	359
6.5.2.2	Verarmungstyp	360
6.5.3	Wirkungsweise des n-Kanal MOSFET, Anreicherungstyp	362
6.5.4	Wirkungsweise des n-Kanal MOSFET, Verarmungstyp	366
6.5.5	Kennlinien des MOSFETs, Beschreibung durch Gleichungen	368
6.5.5.1	n-Kanal MOSFET, Anreicherungstyp	368
6.5.5.2	n-Kanal MOSFET, Verarmungstyp	372
6.5.6	MOSFET als steuerbarer Widerstand	373
6.5.7	Temperaturabhängigkeit der MOSFET-Parameter	375
6.6	Modelle und Ersatzschaltungen des Feldeffekttransistors	377
6.6.1	Statisches Verhalten	377
6.6.2	Dynamisches Verhalten	378
6.6.3	Kleinsignalmodell	379
6.6.3.1	Gleichstrom-Kleinsignalersatzschaltbild	379
6.6.3.2	Wechselstrom-Kleinsignalersatzschaltbild	381
6.6.3.3	Grenzfrequenzen bei Kleinsignalbetrieb	383
6.7	Grenzdaten und Sperrströme	384
6.7.1	Durchbruchspannungen	385
6.7.1.1	Gate-Durchbruch	385
6.7.1.2	Drain-Source-Durchbruch	385

6.7.2	Grenzströme	386
6.7.2.1	Drainstrom	386
6.7.2.2	Rückwärtsdiode	386
6.7.2.3	Gatestrom	386
6.7.3	Sperrströme	387
6.7.4	Maximale Verlustleistung	387
6.7.5	Erlaubter Arbeitsbereich	387
6.8	Der FET als Schalter	388
6.8.1	Schaltstufen mit FET	388
6.8.2	Dynamisches Verhalten von FET-Schaltstufen	390
6.9	Rauschen beim Feldeffekttransistor	391
6.10	Spezielle Bauformen von Feldeffekttransistoren	392
6.10.1	Leistungs-MOSFETs	392
6.10.1.1	Allgemeines, Vorteile, Einsatzgebiete	392
6.10.1.2	FET mit DMOS-Struktur	393
6.10.1.3	FET mit VMOS-Struktur	394
6.10.1.4	HEXFET	396
6.10.1.5	SIPMOS-Transistor	396
6.10.1.6	LDMOS-Transistor	397
6.10.1.7	FREDFET	398
6.10.2	Intelligente Leistungs-FETs	398
6.10.2.1	TEMPFET (Temperature Protected FET)	399
6.10.2.2	PROFET (Protected FET)	399
6.10.3	Weitere Bauformen von FETs	399
6.10.3.1	Dual-Gate MOSFET	399
6.10.3.2	MESFET	400
6.10.3.3	HEMT (MODFET)	401
6.10.3.4	ISFET	403
6.10.3.5	ENFET	404
6.10.3.6	TFT-Transistor	405
6.11	Insulated Gate Bipolar Transistor (IGBT)	405
6.11.1	Struktureller Aufbau	406
6.11.2	NPT- und PT-Struktur	406
6.11.3	Funktionsweise	409
6.11.4	IGBT Latch-Up	410
6.11.5	Kennlinien	412
6.11.5.1	Vorwärtssperrzustand	413
6.11.5.2	Durchlasszustand	413
6.11.5.3	Rückwärtsbetrieb	414

6.11.6	Schaltverhalten	415
6.11.6.1	Übersicht	415
6.11.6.2	Ein- und Ausschalten im Detail, Vergleich MOSFET – IGBT	415
6.11.7	Trench-IGBT	418
7	Thyristoren	421
7.1	Einteilung der Thyristoren	421
7.2	Einrichtungs-Thyristortriode (Thyristor)	422
7.2.1	Grundlagen der Funktionsweise	423
7.2.2	Aufbau	424
7.2.3	Strom-Spannungs-Kennlinie	426
7.2.3.1	Betrieb in Sperrrichtung	426
7.2.3.2	Betrieb in (Vorwärts-)Blockierrichtung	427
7.2.4	Der Zündvorgang	429
7.2.4.1	Erläuterung des Zündvorgangs mit Hilfe des Zweittransistormodells	429
7.2.4.2	Die Zündbedingung	430
7.2.4.3	Zündung ohne Steuerstrom ($I_G = 0$)	432
7.2.4.4	Zündung durch den Steuerstrom	432
7.2.5	Löschen des Thyristors	435
7.2.6	Kennlinie des Steuerkreises	435
7.2.7	Temperaturabhängigkeit	436
7.2.8	Dynamische Eigenschaften	437
7.2.8.1	Kritische Spannungsanstiegsgeschwindigkeit du/dt	437
7.2.8.2	Kritische Stromanstiegsgeschwindigkeit di/dt	437
7.2.8.3	Einschaltverhalten	438
7.2.8.4	Ausschaltverhalten	439
7.2.9	Spannungs- und Stromgrenzwerte	440
7.2.10	Phasenanschnittsteuerung mit Thyristor	442
7.2.10.1	Funktionsweise der Phasenanschnittsteuerung	442
7.2.10.2	Berechnung der Änderung der Leistungsaufnahme	444
7.2.11	Zusammenfassung der Eigenschaften von Thyristoren	445
7.2.12	Vergleich von Thyristor und mechanischem Schalter	445
7.3	Spezielle Bauformen des Thyristors	446
7.3.1	Zweirichtungs-Thyristordiode (TRIAC)	446
7.3.2	Einrichtungs-Thyristortetrode	448
7.3.3	Asymmetrisch sperrende Thyristoren	449
7.3.3.1	Rückwärts leitender Thyristor (RCT)	449
7.3.3.2	Asymmetrisch sperrender Thyristor (ASCR)	449

7.3.4	Gate Turn-Off Thyristor (GTO)	450
7.3.4.1	Übersicht	450
7.3.4.2	Halbleiterstruktur	450
7.3.4.3	Stationäre Strom-Spannungskennlinie	451
7.3.4.4	Vorgang beim Abschalten	451
7.3.4.5	Zusammenfassung der Eigenschaften des GTO	452
7.3.5	MOS-gesteuerter Thyristor (MCT)	452
7.3.5.1	Übersicht	452
7.3.5.2	Halbleiterstruktur	453
7.3.5.3	Schalteigenschaften des p-MCT	454
7.3.5.4	Zusammenfassung der Eigenschaften von MCTs	455
7.3.6	Lichtgesteuerter Thyristor (LTT)	455
7.3.7	Feldgesteuerter Thyristor (FCT)	456
7.3.7.1	Übersicht	456
7.3.7.2	Schalteigenschaften des FCT	456
7.3.8	Gate-Commutated Thyristor (GCT, IGCT)	457
7.3.9	Unijunction-Transistor (UJT)	458
7.3.9.1	Wirkungsweise	458
7.3.9.2	Anwendung	460
8	Operationsverstärker	463
8.1	Allgemeines, Überblick	463
8.2	Schaltymbol, Anschlüsse	464
8.3	Ausführungsformen	465
8.4	Betriebsspannungen	466
8.5	Operationsverstärker-Typen	468
8.5.1	Normaler Operationsverstärker	468
8.5.2	Transkonduktanz-Verstärker	469
8.5.3	Transimpedanz-Verstärker	470
8.5.4	Strom-Verstärker	471
8.6	Der normale Operationsverstärker	471
8.6.1	Begriffsdefinitionen	472
8.6.2	Differenzverstärkung, Leerlaufspannungsverstärkung V_0	474
8.6.3	Übertragungskennlinie	474
8.6.4	Gleichtaktverstärkung, Gleichtaktunterdrückung	476
8.6.5	Eingangswiderstände	478
8.6.5.1	Differenzeingangswiderstand	479
8.6.5.2	Gleichtakteingangswiderstand	479
8.6.6	Ausgangswiderstand	480
8.6.7	Eingangsströme	481
8.6.7.1	Eingangsruhestrom	481
8.6.7.2	Offsetstrom (Eingangsfehlstrom)	482

8.6.8	Offsetspannung	483
8.6.9	Verstärkungseinstellung durch Gegenkopplung	486
8.6.10	Verstärkungs-Bandbreiteprodukt	487
8.6.10.1	Frequenzgang der Leerlaufverstärkung	487
8.6.10.2	Erhöhung der Bandbreite durch Gegenkopplung	489
8.6.11	Frequenzgangkorrektur	490
8.6.11.1	Mehrstufiger Verstärker	490
8.6.11.2	Schwingbedingung	491
8.6.11.3	Amplituden- und Phasenrand	494
8.6.11.4	Prinzip der Frequenzgangkorrektur	495
8.6.11.5	Frequenzgangkorrektur am Operationsverstärker	496
8.6.12	Spannungsbereich und Stromaufnahme	500
8.6.13	Temperaturbereich	500
8.6.14	Anstiegsgeschwindigkeit	500
8.6.15	Maximale Ausgangsspannung	502
8.6.16	Einschwingzeit (Settling Time)	503
8.6.17	Zeitverzögerung nach Überlast	504
8.6.18	Rauschen	504
8.7	Der ideale Operationsverstärker	507
8.8	Interner Aufbau von Operationsverstärkern	508
8.8.1	Übersicht	508
8.8.2	Die Eingangsstufe (Differenzverstärker)	509
8.8.2.1	Grundschialtung des Differenzverstärkers	510
8.8.2.2	Realisierung der Konstantstromquelle	512
8.8.2.3	Übertragungskennlinie des npn-Differenzverstärkers	513
8.8.2.4	Übertragungskennlinie des n-Kanal MOSFET-Differenzverstärkers	514
8.8.3	Die Koppelstufe	514
8.8.4	Die Ausgangsstufe	516
8.9	Tipps zum praktischen Einsatz von Operationsverstärkern	516
9	Grundlagen integrierter Halbleiterschaltungen	519
9.1	Allgemeines zu integrierten Schaltungen	519
9.1.1	Definition und Arten der Integration	519
9.1.1.1	Hybride Integration	520
9.1.1.2	Monolithische Integration	524
9.1.1.3	Multi Chip Module	525
9.1.2	Vor- und Nachteile integrierter Schaltungen	525
9.1.3	Einteilung integrierter Schaltungen	526
9.1.3.1	Integrationsgrad	526
9.1.3.2	Befestigungsart auf der Leiterplatte	527
9.1.3.3	Technologie	527

9.1.3.4	Schaltzeiten	527
9.1.3.5	Temperaturbereiche	529
9.1.3.6	Schaltungsart	529
9.1.3.7	Anwendungsbereich	529
9.1.3.8	Programmierbare Logik	531
9.1.3.9	Zugänglichkeit	531
9.2	Kenngrößen digitaler Schaltkreise	532
9.2.1	Betriebsspannung	532
9.2.2	Pegelbereiche und Übertragungskennlinie logischer Schaltungen	532
9.2.3	Spannungspegel, Störabstand	533
9.2.4	Lastfaktoren	535
9.2.5	Ausgangsstufen	536
9.2.6	Schaltzeiten	536
9.2.7	Verlustleistung	537
9.3	Logikbaureihen	538
9.3.1	Übersicht Bipolare Schaltkreisfamilien	538
9.3.2	Übersicht MOS-Schaltkreisfamilien	539
9.4	Bipolare Schaltkreisfamilien	540
9.4.1	RTL	540
9.4.2	DTL	540
9.4.3	ECL	542
9.4.4	I ² L	545
9.4.5	TTL	546
9.4.5.1	Funktion	546
9.4.5.2	TTL-Ausgangsschaltungen	548
9.4.5.3	TTL-Schaltungsvarianten	551
9.4.5.4	TTL-kompatible High-Speed-CMOS-Logik	557
9.5	MOS-Schaltkreisfamilien	560
9.5.1	Vorteile von MOSFETs in integrierten Schaltungen	560
9.5.2	PMOS-Technologie	561
9.5.3	NMOS-Technologie	561
9.5.4	CMOS-Technologie	563
9.5.4.1	Allgemeine Eigenschaften	563
9.5.4.2	Statische CMOS-Logik	563
9.5.4.3	CMOS-Inverter	565
9.5.4.4	CMOS-Gatter	567
9.5.4.5	Prinzipieller Aufbau von CMOS-Bauelementen	568
9.5.4.6	Eingangs-Schutzschaltung	568
9.5.4.7	Latch-up-Effekt	569
9.5.4.8	Transmissionsgatter	570
9.5.4.9	Dynamische CMOS-Logik	570
9.5.5	BICMOS-Logik	572

10 Halbleiterspeicher	575
10.1 Einteilung digitaler Halbleiterspeicher	575
10.2 Allgemeiner Aufbau der Speicherbausteine	577
10.2.1 Speicherorganisation	577
10.2.2 Der Adressdekoder	580
10.2.3 Die Speicherzelle	581
10.2.4 Aufbau von Speicherbausteinen, Zusammenfassung	582
10.2.5 Busleitungen, Steuersignale	582
10.2.6 Kenndaten	583
10.2.6.1 Kapazität und Organisation eines Speicherbausteines	583
10.2.6.2 Zeitverhalten von Speichern	584
10.3 Einteilung der Tabellenspeicher	585
10.4 Einteilung der Festwertspeicher	585
10.4.1 Masken-ROM	586
10.4.2 Mit Programmiergerät programmierbare PROMs	587
10.4.2.1 PROM, ein Mal programmierbar	587
10.4.2.2 EPROM, löschar und mehrfach programmierbar	588
10.4.3 In der Schaltung löschar- und programmierbare PROMs	592
10.4.3.1 EEPROM (E ² PROM, Electrically Erasable PROM)	592
10.4.3.2 Flash-EEPROM	596
10.4.4 MRAM (Magnetic Random Access Memory)	603
10.4.4.1 Grundlagen, magnetoresistive Effekte	603
10.4.4.2 Funktionsweise	604
10.4.4.3 Lese- und Schreibvorgang	605
10.4.5 FRAM (Ferroelectric Random Access Memory)	606
10.4.5.1 Grundlagen, Ferroelektrika	606
10.4.5.2 Aufbau und Funktionsweise	607
10.4.5.3 Lese- und Schreibvorgang	608
10.4.5.4 OUM (Ovonic Unified Memory)	609
10.5 Einteilung der flüchtigen Speicher	610
10.5.1 Statisches RAM (SRAM)	611
10.5.1.1 Die SRAM-Speicherzelle	611
10.5.1.2 Die SRAM-Speichermatrix	613
10.5.1.3 Spezielle Typen statischer RAM	615
10.5.2 Dynamisches RAM (DRAM)	616
10.5.2.1 Die Ein-Transistor-DRAM-Zelle	616
10.5.2.2 Architektur und interne Steuerung	617
10.5.2.3 Lesevorgang	620
10.5.2.4 Schreibvorgang	621
10.5.2.5 Refresh-Arten	622
10.5.2.6 Organisationsarten und Typen von DRAMs	623

11	Anwendungsspezifische Integrierte Bausteine	627
11.1	Einsatz von ASICs	627
11.2	Einteilung von ASICs	628
11.2.1	Full-Custom-ASIC	629
11.2.2	Standardzellen-ASIC	629
11.2.3	Gate Array	630
11.2.4	Programmierbare Logikbausteine	631
11.3	Entwurfsablauf eines ASIC	632
11.3.1	Vorüberlegungen	632
11.3.1.1	Infrastruktur	632
11.3.1.2	Technologie	633
11.3.1.3	Entwurfsstrategie	633
11.3.1.4	Stückzahlen, Kosten, Zeit	634
11.3.2	Schaltungsentwicklung	634
11.3.2.1	Entwurfsschritte	634
11.3.2.2	Handrechnung	637
11.3.3	Schaltungseingabe	637
11.3.3.1	Schaltplaneingabe	638
11.3.3.2	Hardwarebeschreibungssprachen	639
11.3.3.3	Schaltungssynthese	639
11.3.4	Simulation	640
11.3.4.1	Grundlagen	640
11.3.4.2	Parameterstreuungsabschätzung	640
11.3.5	Layout	641
11.3.5.1	Layerbezeichnungen	642
11.3.5.2	Schematic Driven Layout	642
11.3.5.3	Automatische Platzierung und Verdrahtung	642
11.3.5.4	Mixed-Mode Layoutregeln	643
11.3.5.5	Dummysstrukturen zur Nachkorrektur	643
11.3.5.6	Testpads	644
11.3.6	Entwurfsprüfung	644
11.3.6.1	ERC	644
11.3.6.2	DRC	644
11.3.6.3	LVS	644
11.3.7	Fertigung	645
11.3.7.1	Allgemeines	645
11.3.7.2	Maskenerstellung	645
11.3.7.3	Single Run	645
11.3.7.4	MPW-Run	646
11.3.7.5	Backup-Wafer	646

11.3.8	Mechanischer Aufbau	646
11.3.8.1	Bonddrähte	646
11.3.8.2	Mechanische Spannungen im Substrat	647
11.3.9	Test	647
11.3.9.1	Anforderungen und Fehlerarten	647
11.3.9.2	Teststrategie	648
11.3.9.3	Fehlermodelle	649
11.3.9.4	Prüfpfadtechnik	649
11.3.9.5	Boundary Scan	649
11.3.9.6	Testarten	650
11.4	Einteilung programmierbarer Logikbausteine	651
11.4.1	Übersicht und Begriffe	651
11.4.2	Architektur anwenderprogrammierbarer Logikschaltkreise	653
11.4.2.1	Kurzdarstellung von Verbindungsstrukturen	653
11.4.2.2	Elementare kombinatorische Schaltkreise	653
11.4.2.3	Grundsätzliches zur Architektur	655
11.4.2.4	Technologien	658
11.4.2.5	Wichtige Kennwerte	658
11.4.3	PAL	659
11.4.3.1	Kombinatorische PALs	659
11.4.3.2	Sequenzielle (Registered) PALs	659
11.4.4	GAL	663
11.4.5	CPLD	666
11.4.6	FPGA	670
11.4.6.1	Interne Struktur eines FPGA	670
11.4.6.2	Vorteile von FPGAs, Anwendungsgebiete	670
11.4.6.3	Aufbau eines FPGA	671
11.4.6.4	Architektur und Verdrahtung	673
11.4.6.5	Wahl eines FPGA	673
11.4.6.6	Programmiertechnologien	674
	Liste verwendeter Formelzeichen	677
	Literatur	685
	Stichwortverzeichnis	689

Elektronische Bauelemente sind als Komponenten einer elektronischen Schaltung deren kleinste funktionale Einheiten. Die mit elektrischen Leitungen untereinander verbundenen Bauelemente bilden in ihrer Zusammenschaltung ganz oder teilweise den Aufbau z. B. einer Baugruppe oder eines Gerätes mit einer bestimmten Funktion.

Elektronische Bauelemente können in die zwei großen Gruppen der *passiven* und der *aktiven* Bauelemente eingeteilt werden.

Passive Bauelemente besitzen keine eingebaute (Hilfs-)Leistungsquelle, ihre Ausgangsleistung kann nie größer als ihre Eingangsleistung sein. Passive Bauelemente zeigen keine Verstärkerwirkung, sie sind stets zweipolig, häufig verbrauchen oder speichern sie elektrische Energie. Zu den passiven Bauelementen gehören Widerstände, Kondensatoren und induktive Bauelemente, aber auch Dioden.

Da Dioden aus Halbleitermaterial aufgebaut sind, wie dies bei den meisten aktiven Bauelementen der Fall ist, werden sie hier zusammen mit den aktiven elektronischen Bauelementen behandelt. In einem Werk über passive elektronische Bauelemente würde das vorbereitende Grundlagenwissen über Halbleiter nur für Dioden alleine einen zu großen Raum einnehmen, obwohl es für die sehr große Anzahl aktiver Bauelemente ebenfalls benötigt wird.

Aktive Bauelemente zeigen meist in irgendeiner Form eine Verstärkerwirkung des Eingangssignales oder erzeugen Schwingungen, im Allgemeinen wird hierzu eine Hilfsenergiequelle benötigt. Zu den aktiven Bauelementen gehören auch Spannungs- und Stromquellen, z. B. Batterien und Akkumulatoren.

Passive und aktive Bauelemente können jeweils in *lineare* und *nichtlineare* Bauelemente eingeteilt werden.

Lineare Bauelemente zeigen zwischen Ausgangs- und Eingangsgröße einen linearen Zusammenhang. In der Regel bezieht sich die Aussage der Linearität bzw. Nichtlinearität auf den Zusammenhang bestimmter Größen, meist Strom und Spannung oder deren zeitliche Ableitungen, also z. B. auf die I - U -Kennlinie. Ein lineares elektrisches Netzwerk ist aus Schaltelementen mit linearer Charakteristik (gerader Kennlinie) aufgebaut. Zu die-

sen Bauelementen gehören Ohm'sche Widerstände, Kapazitäten und Induktivitäten. Die Linearität eines Ohm'schen Widerstandes ($R = \text{const.}$) ist unmittelbar aus der linearen Abhängigkeit der Spannung vom Strom ($U = I \cdot R$) bzw. des Stromes von der Spannung ($I = \frac{1}{R} \cdot U$) einsichtig. Bei einem Kondensator ist der Strom proportional dem Differenzialquotienten der Spannung:

$$i(t) = C \cdot \frac{du(t)}{dt} \quad (1.1)$$

Bei einer Spule ist die Spannung proportional dem Differenzialquotienten des Stromes:

$$u(t) = L \cdot \frac{di(t)}{dt} \quad (1.2)$$

Die Gl. 1.1 und 1.2 sind *lineare* Differenzialgleichungen mit konstanten Koeffizienten „C“ bzw. „L“. Somit sind auch Kapazitäten und Induktivitäten lineare Bauteile. Für sie gilt ja auch der lineare Zusammenhang $\underline{U} = \underline{I} \cdot \underline{Z}$ zwischen Spannung und Strom im Ohm'schen Gesetz mit komplexen Größen.

Lineare vierpolige Netzwerkelemente sind auch Überträger mit idealisierten Gegeninduktivitäten M sowie gesteuerte Quellen.

Eine Diode mit ihrer gekrümmten Strom-Spannungs-Kennlinie ist z. B. kein lineares Bauteil.

Hinweis: Bei Mitkopplung geht die Linearität eines Systems verloren!

Lineare Bauelemente genügen sowohl dem Superpositionsprinzip als auch dem Proportionalitätsprinzip.

Ein System oder ein Bauelement ist genau dann linear, wenn es für beliebige (stückweise stetige) Eingangssignale $x(t)$ für alle t die beiden folgenden Eigenschaften aufweist:

$$\mathbf{S}\{\vec{x}_1(t) + \vec{x}_2(t) + \dots + \vec{x}_n(t)\} = \mathbf{S}\{\vec{x}_1(t)\} + \mathbf{S}\{\vec{x}_2(t)\} + \dots + \mathbf{S}\{\vec{x}_n(t)\} \quad (1.3)$$

$$\mathbf{S}\{k \cdot \vec{x}(t)\} = k \cdot \mathbf{S}\{\vec{x}(t)\} \quad (1.4)$$

($k =$ beliebige Konstante)

\mathbf{S} ist in Gl. 1.3 und Gl. 1.4 ein Operator, welcher die Verknüpfung zwischen den Ein- und Ausgangsgrößen des Systems festlegt.

Bei Gl. 1.3 ist die Bedingung der Superposition (Überlagerungseigenschaft) erfüllt, es gilt der Überlagerungssatz. Die Antwort auf eine Summe von Erregungen ist gleich der Summe der Antworten auf die einzelnen Erregungen.

Gl. 1.4 beschreibt die Verstärkungseigenschaft oder Skalierung (Multiplikation mit einer Konstanten k). Die Antwort auf die k -fache Erregung ist gleich der k -fachen Antwort auf die Erregung (Proportionalitätsprinzip).

Superpositions- und Proportionalitätsprinzip können in der Linearitätsrelation zusammengefasst werden.

Ein System oder ein Bauelement ist linear, wenn die Linearitätsrelation gilt.

$$\mathbf{S}\{k_1 \vec{x}_1(t) + k_2 \vec{x}_2(t) + \dots + k_n \vec{x}_n(t)\} = k_1 \mathbf{S}\{\vec{x}_1(t)\} + k_2 \mathbf{S}\{\vec{x}_2(t)\} + \dots + k_n \mathbf{S}\{\vec{x}_n(t)\} \quad (1.5)$$

Reale Systeme erfüllen die Eigenschaft der Linearität meistens nur in einem eingeschränkten Bereich der Variablen. Bei vielen Anwendungen besteht jedoch der idealisierte Sachverhalt der Linearität zumindest näherungsweise und beschreibt das Wesentliche. Würde man die Linearität eines Systems nicht einführen, so würde dessen Untersuchung unnötig kompliziert.

Häufig erhält man für eine Erregung $\vec{x}(t)$ die Antwort $\vec{y}(t)$ als Lösung einer Differenzialgleichung. Ist die Differenzialgleichung linear, so gilt der Superpositionssatz: Die Lösung für eine Linearkombination von Erregungen ist gleich der Linearkombination der Lösungen für die einzelnen Erregungen. Dies ist aber exakt die Aussage von Gl. 1.5. Somit folgt:

Wird ein System durch eine lineare Differenzialgleichung beschrieben, so ist das System linear. Die Ordnung der Differenzialgleichung kann beliebig, ihre Koeffizienten konstant oder nicht konstant sein.

Für einen Betrieb mit Wechselspannung oder -strom gilt, dass die Antwort eines linearen Systems auf eine Erregung mit einer Schwingung der Frequenz f eine Schwingung mit der gleichen Frequenz ist. Ein *nichtlineares System* hingegen verzerrt Eingangssignale nichtlinear und die Antwort enthält Schwingungen mit *neuen Frequenzen*, die in den Eingangssignalen nicht enthalten sind. Die ursprünglichen Frequenzverhältnisse lassen sich dann nicht mehr ohne weiteres rekonstruieren.

Nichtlineare Bauelemente weisen einen nichtlinearen Zusammenhang zwischen Ausgangs- und Eingangsgröße auf, die Kennlinie ist nicht gerade sondern gekrümmt.

Diskret wird ein elektronisches Bauteil genannt, wenn es nur aus einer einzigen Funktionseinheit besteht (Beispiel: einzelner Transistor). Dagegen bilden in **integrierten Schaltkreisen** (ICs) mehrere gleichartige oder unterschiedliche Funktionseinheiten (z. B. Widerstände, Dioden und Transistoren) ein komplexes Bauelement (z. B. einen Verstärker).

Häufig sind Halbleiter das Basismaterial aktiver elektronischer Bauelemente. Im Folgenden werden einige grundlegende Eigenschaften von Halbleitern behandelt. Für das Verständnis von Eigenschaften und Funktion von Bauelementen, die aus Halbleitermaterial aufgebaut sind, ist dieses Wissen unerlässlich. Es wird auch für den praktischen Einsatz von Halbleiter-Bauelementen benötigt, um die Konsequenzen geänderter Einsatz- oder Randbedingungen (z. B. einer Temperaturänderung) abschätzen zu können.

2.1 Halbleiter im Periodensystem der Elemente

Das Periodensystem der Elemente (ein Ausschnitt ist in Abb. 2.1 dargestellt) gliedert sich in sieben Perioden (Zeilen, = Anzahl der Schalen) und acht Hauptgruppen (Spalten, = Anzahl der Valenzelektronen). In den Gruppen sind Elemente mit gleichen chemischen Eigenschaften zusammengefasst, wobei die Atommasse in jeder Gruppe von oben nach unten zunimmt.

Man unterscheidet zwischen **Elementhalbleitern** und **Verbindungshalbleitern**.

Elementhalbleiter bestehen (bis auf Verschmutzungen) nur aus Atomen *eines* Elementes. Die Elementhalbleiter haben vier Valenzelektronen, sie kommen aus der vierten Hauptgruppe des periodischen Systems der Elemente, zu ihnen gehören *Germanium* (Ge) und *Silizium* (Si).

Silizium kommt im Quarzsand (SiO_2) als zweithäufigstes Element der Erdrinde vor. Zunächst wird aus dem Sand das Siliziumpulver gewonnen, welches durch ein spezielles Schmelzverfahren (Zonenschmelzen) und ein Ziehverfahren von Verunreinigungen befreit und in einen Kristall umgewandelt wird.

Technisch ist von Bedeutung, dass Silizium durch Verbindung mit Sauerstoff (Siliziumdioxid, SiO_2) einen hervorragenden Isolator bildet.

Zu den Elementhalbleitern gehört auch der Kohlenstoff (C), dessen Kristallisationsform „Diamant“ in reiner Form ein sehr guter Isolator ist, aber eigentlich einen Halbleiter

Abb. 2.1 Ausschnitt aus dem Periodensystem der Elemente

		Hauptgruppen				
		II	III	IV	V	VI
Periode	2	Be 4 10,81	B 5 10,82	C 6 12,01	N 7 14,00	O 8 15,99
	3	Mg 12 24,30	Al 13 26,97	Si 14 28,06	P 15 31,02	S 16 32,06
	4	Zn 30 65,39	Ga 31 69,72	Ge 32 72,6	As 33 74,91	Se 34 78,96
	5	Cd 48 112,41	In 49 114,76	Sn 50 118,7	Sb 51 121,76	Te 52 127,6
	6	Hg 80 200,59	Tl 81 204,3	Pb 82 207,2	Bi 83 208,9	Po 84 208,9

mit sehr großem Bandabstand darstellt. Man kann ihn durch gezielte „Verschmutzung“ leitend machen. In diesem Sinne ist Diamant ein Halbleiter mit einigen hervorragenden technischen Eigenschaften.

Verbindungshalbleiter umfassen chemische Verbindungen *zweier* Stoffe in einem Kristallgitter, die im Mittel vier Valenzelektronen besitzen. Verbindungshalbleiter bestehen jeweils aus Stoffen der III. und V. oder der II. und VI. Hauptgruppe des Periodensystems.

III-V-Halbleiter sind z. B. *Galliumarsenid* (GaAs), Indiumantimonid (InSb) oder Indiumphosphid (InP). Beispiele für II-VI-Halbleiter sind Zinkoxid (ZnO), Zinksulfid (ZnS), Zinkselenid (ZnSe) und Cadmiumsulfid (CdS).

Es gibt auch III-VI-Halbleiter, dies sind z. B. Galliumsulfid (GaS), Galliumtellurid (GaTe) und Indiumsulfid (InS). Weiterhin sind I-III-VI-Halbleiter beispielsweise Kupferindiumdiselenid (CuInSe_2) und Kupferindiumgalliumsulfid (CuInGaS_2).

Organische Halbleiter sind eine Gruppe neuer Halbleiter. Organische Materialien sind im Allgemeinen elektrisch isolierend. Moleküle oder Polymere können elektrisch leitend werden, wenn sie ein konjugiertes Bindungssystem besitzen, bestehend aus Doppelbindungen, Dreifachbindungen und aromatischen Ringen. Als erstes wurde dies bei Polyacetylen beobachtet. Polyacetylen ist ein lineares Polymer mit abwechselnder Doppelbindung und Einfachbindung ($\dots \text{C}=\text{C}-\text{C}=\text{C}-\text{C}\dots$). Wird diesem Kunststoff ein Donator wie etwa Chlor, Brom oder Iod angefügt (oxidative Dotierung), liegen zusätzliche Elektronen vor. Durch das Hinzufügen eines Atoms wie Natrium (reduktive Dotierung) erhält der Kunststoff einen Akzeptor. Durch diese chemische Änderung brechen die Doppelbindungen auf, und es entsteht ein durchgehendes Leitungsband. Das ursprünglich nicht leitende Polymer wird elektrisch leitend. Beispiele für organische Halbleiter sind *Tetracen* (Summenformel $\text{C}_{18}\text{H}_{12}$, besteht aus vier aneinander gereihten Benzolringen, die Verwendung erfolgt z. B. in elektrisch gepumpten organischen Halbleiter-Lasern) und *Pentacen* ($\text{C}_{22}\text{H}_{14}$, ein polyzyklischer aromatischer Kohlenwasserstoff mit fünf linear kondensierten Benzolringen, wird in organischen Feldeffekttransistoren verwendet).

2.2 Halbleiter zwischen Nichtleiter und Leiter

Der gerichtete Fluss elektrischer Ladungsträger wird als elektrischer Strom bezeichnet. In einem metallischen Leiter entspricht der elektrische Strom einer Bewegung von Elektronen in eine Vorzugsrichtung. Der elektrische Widerstand ist ein Maß dafür, wie stark ein leitfähiges Material den Stromdurchgang (den Stromfluss) behindert. Die Ursache dieser Behinderung sind Zusammenstöße der fließenden Elektronen mit ortsfesten, um ihre Ruhelage schwingenden Atomrümpfen (thermische Schwingungsbewegung der Atomrümpfe). Die Größe des elektrischen Widerstandes wird wesentlich von den Materialeigenschaften (der Materialart) bestimmt. Die Materialkonstante ρ wird als *spezifischer Widerstand* bezeichnet. Je nach Zahl der frei beweglichen Ladungsträger pro Stoffvolumen werden Werkstoffe der Elektrotechnik in Leiter, Halbleiter und Nichtleiter (Isolatoren) eingeteilt. Wie der Name sagt, liegen Halbleiter mit ihrer Leitfähigkeit bzw. dem zur Leitfähigkeit umgekehrt proportionalen spezifischen Widerstand zwischen den Leitern und den Nichtleitern (Abb. 2.2). Die Leitfähigkeit von Halbleitern ist größer als von Nichtleitern und geringer als von Leitern. Sehr bekannte Halbleiter sind Silizium und Germanium.

In keiner Stoffeigenschaft unterscheiden sich Materialien so stark wie in der elektrischen Leitfähigkeit. Zwischen der Leitfähigkeit eines guten metallischen Leiters und eines guten Isolators liegen 25 Zehnerpotenzen!

Metalle haben eine hohe Leitfähigkeit, die jedoch kaum steuerbar ist. Silizium ist heute der wichtigste Halbleiter, es weist im reinen (nicht gezielt verunreinigten) Kristallzustand bei tieferen Temperaturen eine Leitfähigkeit entsprechend eines guten Isolators auf und ist damit eigentlich nicht zur Realisierung elektronischer Bauelemente geeignet. Der Vorteil von Silizium ist, dass es technische Möglichkeiten gibt, seine Leitfähigkeit gezielt zu verändern.

Die Leitfähigkeit aus Silizium aufgebauter Strukturen ist

- stark temperaturabhängig, sie nimmt mit steigender Temperatur zu;
- kann in weiten Grenzen durch das Einbringen von Fremdatomen (**Dotieren**) aus einer anderen chemischen Hauptgruppe beeinflusst werden;

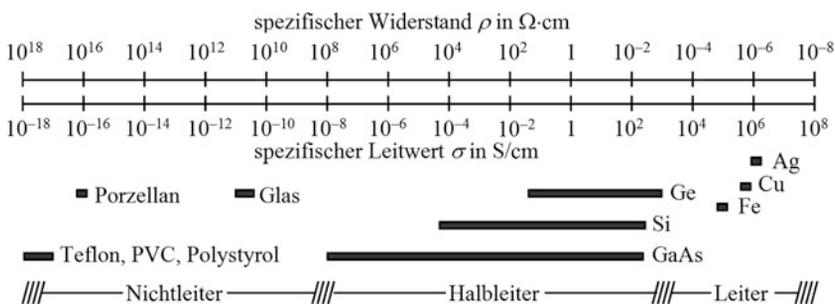


Abb. 2.2 Spezifischer Widerstand und spezifische Leitfähigkeit von Nichtleitern, Halbleitern und Leitern bei Zimmertemperatur