

Leonhard Stiny

# Aktive elektronische Bauelemente

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

*2. Auflage*

 Springer Vieweg

---

# Aktive elektronische Bauelemente

---

Leonhard Stiny

# Aktive elektronische Bauelemente

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

2., überarbeitete und erweiterte Auflage

Mit 558 Abbildungen und 23 Tabellen

 Springer Vieweg

Leonhard Stiny  
Haag a. d. Amper, Deutschland

ISBN 978-3-658-09152-1  
DOI 10.1007/978-3-658-09153-8

ISBN 978-3-658-09153-8 (eBook)

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 2015

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 Gebrauchsnamen, Handelsnamen, Warenbezeichnungen usw. in diesem Werk berechtigt auch ohne besondere Kennzeichnung nicht zu der Annahme, dass solche Namen im Sinne der Warenzeichen- und Markenschutz-Gesetzgebung als frei zu betrachten wären und daher von jedermann benutzt werden dürften.

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.

Gedruckt auf säurefreiem und chlorfrei gebleichtem Papier.

Springer Fachmedien Wiesbaden GmbH ist Teil der Fachverlagsgruppe Springer Science+Business Media ([www.springer.com](http://www.springer.com))

---

# 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, im Februar 2015

**Leonhard Stiny**

---

# Inhaltsverzeichnis

<b>1</b>	<b>Einleitung</b>	<b>1</b>
<b>2</b>	<b>Grundlagen der Halbleiter</b>	<b>5</b>
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	10
2.3.3	Schalenmodell und Wechselwirkung	12
2.3.4	Bändermodell und Fermi-Statistik	13
2.4	Direkte und indirekte Halbleiter	21
2.4.1	Quanten und Wellen	21
2.4.2	Direkte Rekombination	23
2.4.3	Indirekte Rekombination	23
2.5	Eigenleitung	25
2.5.1	Eigenleitungsdichte	25
2.5.2	Ladungsträgerlebensdauer	29
2.5.3	Beweglichkeit	29
2.6	Störstellenleitung	30
2.6.1	Dotieren	31
2.6.2	Störstellenleitung im Bändermodell	33
2.6.3	Allgemeines zu dotierten Halbleitern	34
2.6.4	Einfluss der Temperatur auf dotierte Halbleiter	35
2.6.5	Auswirkung der Temperatur auf Halbleiterbauelemente	36
<b>3</b>	<b>Der pn-Übergang</b>	<b>39</b>
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	40
3.1.3	Ladungsträgerdichte	42
3.1.4	Raumladungsdichte	43

3.1.5	Diffusionsspannung . . . . .	44
3.1.6	Sperrschichtweite . . . . .	46
3.1.7	Sperrschichtkapazität . . . . .	47
3.1.8	Energiebänder-Modell des pn-Übergangs . . . . .	47
3.2	Der pn-Übergang mit äußerer Spannung . . . . .	48
3.2.1	Äußere Spannung in Sperrrichtung . . . . .	48
3.2.1.1	Verbreiterung der Grenzschicht . . . . .	48
3.2.1.2	Sperr sättigungsstrom . . . . .	49
3.2.1.3	Sperrschichtweite und Sperrschichtkapazität . . . . .	52
3.2.2	Äußere Spannung in Flussrichtung . . . . .	54
3.3	Durchbruchmechanismen beim pn-Übergang . . . . .	58
3.3.1	Lawinendurchbruch . . . . .	58
3.3.2	Zener-Durchbruch . . . . .	60
3.3.3	Überlappung von Lawinen- und Zener-Effekt . . . . .	62
3.3.4	Thermischer Durchbruch (2. Durchbruch) . . . . .	62
3.3.5	Durchgriff (punch-through) . . . . .	63
3.4	Schaltverhalten des pn-Übergangs . . . . .	65
3.4.1	Einschaltvorgang . . . . .	65
3.4.1.1	Kapazitives Verhalten (die Spannung steigt langsamer als der Strom) . . . . .	66
3.4.1.2	Induktives Verhalten (Überschwingen der Spannung) . . . . .	66
3.4.2	Aus- und Umschaltvorgang . . . . .	67
3.4.2.1	Unterbrechen des Durchlassstromes . . . . .	67
3.4.2.2	Umschalten von Fluss- in Sperrbetrieb . . . . .	67
3.5	Gesamtkennlinie des pn-Übergangs . . . . .	68
3.6	Halbleiter-Metall-Übergang . . . . .	69
<b>4</b>	<b>Halbleiterdioden</b> . . . . .	<b>71</b>
4.1	Ausführung . . . . .	71
4.2	Aufbau . . . . .	71
4.3	Elektrische Funktion . . . . .	72
4.4	Bauarten . . . . .	73
4.5	Verhalten einer Diode . . . . .	74
4.5.1	Kennlinienbereiche . . . . .	75
4.5.1.1	Durchlassbereich . . . . .	76
4.5.1.2	Sperrbereich . . . . .	77
4.5.1.3	Durchbruchbereich . . . . .	77
4.5.2	Näherungen für die Diodenkennlinie . . . . .	77
4.5.2.1	Näherung 0. Ordnung . . . . .	78
4.5.2.2	Näherung 1. Ordnung . . . . .	78
4.5.2.3	Näherung 2. Ordnung . . . . .	78
4.5.3	Beschreibung durch Gleichungen . . . . .	80

4.5.4	Bestimmung der Diodenparameter mit Regressionsverfahren . . .	82
4.5.5	Kleinsignalverhalten von Dioden . . . . .	84
4.5.5.1	Arbeitspunkt . . . . .	84
4.5.5.2	Gleichstromwiderstand . . . . .	84
4.5.5.3	Wechselstromwiderstand – Differenzieller Widerstand	84
4.5.5.4	Wirkung des differentiellen Widerstandes . . . . .	85
4.5.6	Schaltverhalten von Dioden . . . . .	87
4.5.6.1	Ideales Schaltverhalten . . . . .	87
4.5.6.2	Umschalten von Sperr- in Flussrichtung . . . . .	87
4.5.6.3	Umschalten von Fluss- in Sperrrichtung . . . . .	89
4.5.6.4	Ein- und Ausschalten bei ohmsch-induktiver Last . . .	90
4.6	Temperaturabhängigkeit der Diodenparameter . . . . .	91
4.6.1	Temperaturabhängigkeit des Sperrstromes . . . . .	91
4.6.2	Temperaturabhängigkeit der Durchlassspannung . . . . .	92
4.6.3	Zusammenfassung: Temperaturabhängigkeit der Diodenparameter . . . . .	93
4.7	Kenn- und Grenzdaten von Dioden . . . . .	94
4.7.1	Grenzspannungen . . . . .	94
4.7.2	Grenzströme . . . . .	95
4.7.3	Sperrstrom . . . . .	95
4.7.4	Maximale Verlustleistung . . . . .	95
4.8	Auszüge aus Datenblättern von Dioden . . . . .	96
4.8.1	Silizium-Epitaxial-Planar-Diode 1N 4148 . . . . .	96
4.8.2	Silizium-Diffusions-Dioden 1N 4001... 1N 4007 . . . . .	100
4.9	Herstellungsmethoden für pn-Übergänge . . . . .	102
4.9.1	Legierungstechnik . . . . .	102
4.9.2	Planartechnik . . . . .	103
4.9.2.1	Diffusion . . . . .	103
4.9.2.2	Epitaxie . . . . .	104
4.9.2.3	Ionenimplantation . . . . .	105
4.9.2.4	Kontaktierung . . . . .	106
4.10	Aufbau von Halbleiterdioden . . . . .	106
4.10.1	Einzeldiode . . . . .	106
4.10.1.1	Spitzendioden . . . . .	106
4.10.1.2	Flächendioden . . . . .	108
4.10.1.3	Leistungsdioden . . . . .	109
4.10.1.4	Gehäuse . . . . .	110
4.10.2	Integrierte Diode . . . . .	111
4.11	Diodentypen . . . . .	112
4.11.1	Schaltdiode, Universaldiode . . . . .	112
4.11.2	Gleichrichterdiode . . . . .	112
4.11.3	Schottky-Diode . . . . .	112

---

4.11.4	Suppressordiode	113
4.11.5	Temperatursensoren	117
4.11.6	DIAC	117
4.11.6.1	Dreischichtdiode	118
4.11.6.2	Fünfschichtdiode	118
4.11.6.3	Vierschichtdiode	119
4.11.6.4	Anwendungen der Mehrschichtdioden	120
4.11.6.5	Kennwerte von Mehrschichtdioden	121
4.11.7	Zenerdiode, Z-Diode	121
4.11.8	Avalanchediode	123
4.11.9	Stromregeldiode	123
4.11.10	Leuchtdiode (Lumineszenzdiode, LED)	124
4.11.10.1	Grundsätzliches	124
4.11.10.2	Funktionsprinzip	125
4.11.10.3	Herstellung	125
4.11.10.4	Material und Farben, Spektrum	126
4.11.10.5	Technische Ausführung, Aufbau	129
4.11.10.6	Flächen- und Kantenstrahler	129
4.11.10.7	Wirkungsgrad	132
4.11.10.8	Eigenschaften	132
4.11.10.9	Kennwerte und Grenzwerte	135
4.11.10.10	Anwendungen und Einsatzbereiche	136
4.11.11	Organische Leuchtdiode (OLED)	137
4.11.11.1	Vorteile	137
4.11.11.2	Nachteile	138
4.11.11.3	Organische Materialien	138
4.11.11.4	Aufbau	139
4.11.11.5	Funktionsweise	140
4.11.11.6	Aktivmatrix- und Passivmatrix-Displays	141
4.11.12	Laserdiode (LD)	142
4.11.12.1	Grundlagen	142
4.11.12.2	Realisierungsbedingungen für die Funktion der Laserdiode	144
4.11.12.3	Aufbau der Materialschichten	147
4.11.12.4	Aufbau des Laserresonators, DFB-, DBR-Laser	149
4.11.12.5	Kenngößen	150
4.11.12.6	Eigenschaften und Besonderheiten	153
4.11.12.7	Anwendungen	154
4.11.12.8	Beispiel für Datenblattangaben einer Laserdiode	154
4.11.13	Fotodiode	155
4.11.13.1	Funktionsweise	155
4.11.13.2	Betriebsarten	159

4.11.13.3	Aufbau	161
4.11.13.4	Eigenschaften	162
4.11.13.5	Ausführungsformen	163
4.11.13.6	Anwendungen	164
4.11.14	Solarzelle	164
4.11.14.1	Aufbau einer Silizium-Solarzelle	165
4.11.14.2	Solarzellentypen	166
4.11.14.3	Verluste in Solarzellen	167
4.11.14.4	Eigenschaften von Solarzellen	168
4.11.14.5	Kenndaten der Solarzelle	170
4.11.14.6	Ersatzschaltbild der Solarzelle	173
4.11.14.7	Bypass-Diode	174
4.11.15	Kapazitätsdiode (Varaktor-Diode)	174
4.11.15.1	Allgemeines	175
4.11.15.2	Funktionsweise und Eigenschaften	175
4.11.15.3	Ersatzschaltung, Güte	175
4.11.15.4	Grenzfrequenz $f_c$ (cut-off-frequency)	177
4.11.15.5	Temperaturabhängigkeit	177
4.11.15.6	Anwendungen	178
4.11.16	pin-Diode	180
4.11.16.1	Funktion	181
4.11.16.2	Anwendungen der pin-Diode	182
4.11.17	Tunneldiode (Esaki-Diode)	183
4.11.17.1	Grundlegendes zur Quantenphysik	184
4.11.17.2	Tunneleffekt	184
4.11.17.3	Aufbau und Funktion der Tunneldiode	186
4.11.17.4	Ersatzschaltung	188
4.11.17.5	Anwendungen der Tunneldiode	189
4.11.18	Rückwärtsdiode (Backwarddiode)	190
4.11.19	Gunndiode	191
4.11.19.1	Gunn-Effekt	191
4.11.19.2	Aufbau der Gunndiode	191
4.11.19.3	Funktionsweise der Gunndiode	192
4.11.19.4	Anwendungen der Gunndiode	196
4.11.20	IMPATT-Diode	197
4.11.20.1	Funktionsweise der IMPATT-Diode	197
4.11.20.2	Anwendungen der IMPATT-Diode	200
4.11.21	TRAPATT-Diode	201
4.11.22	BARITT-Diode	202
4.11.23	DOVETT-Diode	203
4.11.24	Ladungsspeicherungsdiode	203

4.11.25	Speicherschaltodiode (Step-Recovery-Diode)	203
4.11.26	Magnetdiode	205
4.11.26.1	Aufbau	205
4.11.26.2	Funktionsweise	206
4.11.26.3	Eigenschaften und Anwendungen	206
<b>5</b>	<b>Bipolare Transistoren</b>	<b>207</b>
5.1	Definition und Klassifizierung von Transistoren	207
5.2	Grundsätzlicher Aufbau des Transistors	210
5.3	Richtungen von Strömen und Spannungen	211
5.4	Betriebszustände (Arbeitsbereiche)	212
5.4.1	Aktiver Zustand (Normalbetrieb, Vorwärtsbetrieb)	212
5.4.2	Gesättigter Zustand (Sättigungsbetrieb)	213
5.4.3	Gesperrter Zustand (Sperrbetrieb)	213
5.4.4	Inverser Zustand (Inversbetrieb, Rückwärtsbetrieb)	214
5.5	Signaldynamik und Signalgröße	214
5.6	Funktionsweise	215
5.7	Die drei Grundschaltungen des Bipolartransistors	220
5.8	Einsatz als Verstärker oder Schalter	221
5.8.1	Verstärkerbetrieb	221
5.8.2	Schalterbetrieb	223
5.9	Kennlinien des Transistors	224
5.9.1	Eingangskennlinie	224
5.9.1.1	Verlauf der Eingangskennlinie	224
5.9.1.2	Differenzieller Eingangswiderstand	227
5.9.2	Ausgangskennlinie	228
5.9.2.1	Ausgangskennlinienfeld für Spannungs- und Stromsteuerung	228
5.9.2.2	Aktiver Bereich	229
5.9.2.3	Übersteuerungsbereich	230
5.9.2.4	Sperrbereich	231
5.9.2.5	Differenzieller Ausgangswiderstand	234
5.9.3	Steuerkennlinien	235
5.9.3.1	Strom-Steuerkennlinie	235
5.9.3.2	Spannungs-Steuerkennlinie	236
5.9.4	Rückwirkungskennlinie	237
5.9.5	Vierquadranten-Kennlinienfeld	238
5.10	Durchbruchspannungen und Grenzströme	240
5.10.1	Durchbruch 1. Art	240
5.10.1.1	Basis-Emitter-Diode	240
5.10.1.2	Basis-Kollektor-Diode	240
5.10.1.3	Kollektor-Emitter-Strecke	241

5.10.2	Durchbruch 2.Art	242
5.10.3	Grenzströme	242
5.11	Maximale Verlustleistung	242
5.11.1	Statischer Betrieb	242
5.11.2	Pulsbetrieb	245
5.12	Erlaubter Arbeitsbereich	247
5.13	Rauschen beim Bipolartransistor	248
5.13.1	Allgemeines zum Rauschen	248
5.13.2	Beschreibung stochastischer Signale	250
5.13.3	Rauschquellen beim Bipolartransistor	259
5.13.3.1	Thermisches Rauschen (Widerstandsrauschen)	259
5.13.3.2	Schrotrauschen (Schottky-Rauschen)	260
5.13.3.3	$1/f$ -Rauschen	261
5.13.3.4	Popcorn-Rauschen	261
5.13.3.5	Generations-Rekombinations-Rauschen	262
5.13.3.6	Stromverteilungsrauschen	262
5.13.3.7	Avalanche-Rauschen	262
5.13.4	Rauschzahl	262
5.13.4.1	Definition und Eigenschaften	262
5.13.4.2	Bereich weißes Rauschen	264
5.13.4.3	Bereich $1/f$ -Rauschen	265
5.13.4.4	Bereich hoher Frequenzen	266
5.14	Beschreibung durch Gleichungen	266
5.15	Abhängigkeiten der Stromverstärkung	267
5.15.1	Abhängigkeit der Stromverstärkung vom Arbeitspunkt	267
5.15.2	Abhängigkeit der Stromverstärkung von der Grundschaltung	268
5.15.2.1	Stromverstärkung der Basisschaltung	268
5.15.2.2	Stromverstärkung der Emitterschaltung	270
5.15.2.3	Stromverstärkung der Kollektorschaltung	270
5.15.2.4	Umrechnung der Stromverstärkungen	271
5.15.3	Stromverstärkung in Abhängigkeit der Frequenz, Grenzfrequenzen	271
5.15.3.1	$\beta$ -Grenzfrequenz	271
5.15.3.2	Transitfrequenz	272
5.15.3.3	Maximale Schwingfrequenz	274
5.16	Dynamisches Schaltverhalten des Bipolartransistors	274
5.16.1	Schaltzeiten	275
5.16.1.1	Einschaltverzögerung $t_d$	275
5.16.1.2	Anstiegszeit $t_r$	275
5.16.1.3	Speicherzeit $t_s$	276
5.16.1.4	Abfallzeit $t_f$	277
5.16.1.5	Verkürzung der Schaltzeiten	277

5.17	Modelle und Ersatzschaltungen des Bipolartransistors	278
5.17.1	Die physikalische Ersatzschaltung	279
5.17.1.1	Das Ebers-Moll-Modell	280
5.17.1.2	Transportmodell	283
5.17.1.3	Gummel-Poon-Modell	284
5.17.1.4	Gleichstrom-Kleinsignalersatzschaltbild	285
5.17.2	Die formale Ersatzschaltung	291
5.17.2.1	Allgemeines zum Vierpol	291
5.17.2.2	$h$ -Parameter	293
5.17.2.3	Bestimmung der $h$ -Parameter aus den Kennlinien	294
5.17.2.4	Umrechnung der $h$ -Parameter zwischen Grundsaltungen	296
5.17.2.5	Umrechnung von $h$ -Parametern für andere Arbeits- punkte	297
5.17.2.6	$y$ -Parameter	299
5.17.2.7	Umrechnung zwischen $y$ - und $h$ -Parametern	300
5.17.2.8	$s$ -Parameter	301
5.17.2.9	Vierpolparameter und physikalisches Ersatzschaltbild	304
5.17.2.10	Berechnung des Betriebsverhaltens	304
5.17.3	Wechselstrom-Kleinsignalersatzschaltbild	307
5.18	Aufbau und Herstellungsverfahren von Bipolartransistoren	308
5.18.1	Spitzentransistor	308
5.18.2	Legierungstransistor	309
5.18.3	Mesatransistor	309
5.18.4	Planartransistor	310
5.18.4.1	Herstellung von Einzeltransistoren, innerer Aufbau	311
5.18.4.2	Bauformen, Gehäuse von Einzeltransistoren	311
5.18.4.3	Integrierte Transistoren, Herstellung und innerer Aufbau	313
5.18.4.4	Herstellungsprozess am Beispiel eines npn-Transistors	314
5.18.4.5	Emitterrandverdrängung	316
5.19	Hetero-Bipolartransistor (HBT)	317
5.20	Darlington-Transistor	320
5.20.1	Verlauf der Stromverstärkung	322
5.20.1.1	Stromverstärkung im Bereich 1	322
5.20.1.2	Stromverstärkung im Bereich 2 und 3	323
5.20.2	Schaltverhalten	324
5.20.3	Kleinsignalverhalten	325
5.20.4	Weitere Besonderheiten des Darlington-Transistors	326

<b>6</b>	<b>Feldeffekttransistoren</b>	327
6.1	Allgemeine Eigenschaften	327
6.2	Funktionsprinzip und Klassifikation	329
6.2.1	Praxis mit Feldeffekttransistoren	331
6.2.2	Unterschiede zwischen unipolaren und bipolaren Transistoren	333
6.3	Die drei Grundsaltungen des Feldeffekttransistors	334
6.4	Prinzipieller Aufbau und Wirkungsweise des Sperrschicht-FET	335
6.4.1	JFET ohne äußere Spannung	335
6.4.2	$U_{GS}$ variabel, $U_{DS}$ klein und konstant	336
6.4.3	$U_{DS}$ variabel, $U_{GS} = 0$	338
6.4.4	$U_{DS}$ und $U_{GS}$ variabel	339
6.4.5	Kennlinien des JFET, Beschreibung durch Gleichungen	341
6.4.5.1	Begriffe	341
6.4.5.2	Kennlinienarten	342
6.4.5.3	Übertragungskennlinie	342
6.4.5.4	Ausgangskennlinienfeld	343
6.4.6	Temperaturabhängigkeit der JFET-Parameter	345
6.5	Prinzipieller Aufbau und Wirkungsweise des MOSFETs	347
6.5.1	MOS-Kondensator, Grundlagen des MOSFETs	347
6.5.2	Aufbau eines n-Kanal MOSFET	349
6.5.2.1	Anreicherungstyp	349
6.5.2.2	Verarmungstyp	350
6.5.3	Wirkungsweise des n-Kanal MOSFET, Anreicherungstyp	352
6.5.4	Wirkungsweise des n-Kanal MOSFET, Verarmungstyp	356
6.5.5	Kennlinien des MOSFETs, Beschreibung durch Gleichungen	358
6.5.5.1	n-Kanal MOSFET, Anreicherungstyp	358
6.5.5.2	n-Kanal MOSFET, Verarmungstyp	362
6.5.6	MOSFET als steuerbarer Widerstand	363
6.5.7	Temperaturabhängigkeit der MOSFET-Parameter	365
6.6	Modelle und Ersatzschaltungen des Feldeffekttransistors	367
6.6.1	Statisches Verhalten	367
6.6.2	Dynamisches Verhalten	368
6.6.3	Kleinsignalmodell	369
6.6.3.1	Gleichstrom-Kleinsignalersatzschaltbild	369
6.6.3.2	Wechselstrom-Kleinsignalersatzschaltbild	371
6.6.3.3	Grenzfrequenzen bei Kleinsignalbetrieb	373
6.7	Grenzdaten und Sperrströme	374
6.7.1	Durchbruchspannungen	375
6.7.1.1	Gate-Durchbruch	375
6.7.1.2	Drain-Source-Durchbruch	375
6.7.2	Grenzströme	376
6.7.2.1	Drainstrom	376

6.7.2.2	Rückwärtsdiode	376
6.7.2.3	Gatestrom	376
6.7.3	Sperrströme	377
6.7.4	Maximale Verlustleistung	377
6.7.5	Erlaubter Arbeitsbereich	377
6.8	Der FET als Schalter	378
6.8.1	Schaltstufen mit FET	378
6.8.2	Dynamisches Verhalten von FET-Schaltstufen	380
6.9	Rauschen beim Feldeffekttransistor	381
6.10	Spezielle Bauformen von Feldeffekttransistoren	382
6.10.1	Leistungs-MOSFETs	382
6.10.1.1	Allgemeines, Vorteile, Einsatzgebiete	382
6.10.1.2	FET mit DMOS-Struktur	383
6.10.1.3	FET mit VMOS-Struktur	384
6.10.1.4	HEXFET	386
6.10.1.5	SIPMOS-Transistor	387
6.10.1.6	LDMOS-Transistor	387
6.10.1.7	FREDFET	388
6.10.2	Intelligente Leistungs-FETs	388
6.10.2.1	TEMPFET (Temperature Protected FET)	389
6.10.2.2	PROFET (Protected FET)	389
6.10.3	Weitere Bauformen von FETs	389
6.10.3.1	Dual-Gate MOSFET	389
6.10.3.2	MESFET	390
6.10.3.3	HEMT (MODFET)	391
6.10.3.4	ISFET	393
6.10.3.5	ENFET	394
6.10.3.6	TFT-Transistor	394
6.11	Insulated Gate Bipolar Transistor (IGBT)	395
6.11.1	Struktureller Aufbau	396
6.11.2	NPT- und PT-Struktur	396
6.11.3	Funktionsweise	399
6.11.4	IGBT Latch-Up	400
6.11.5	Kennlinien	402
6.11.5.1	Vorwärtssperrzustand	403
6.11.5.2	Durchlasszustand	403
6.11.5.3	Rückwärtsbetrieb	404
6.11.6	Schaltverhalten	405
6.11.6.1	Übersicht	405
6.11.6.2	Ein- und Ausschalten im Detail, Vergleich MOSFET – IGBT	405
6.11.7	Trench-IGBT	408

<b>7</b>	<b>Thyristoren</b>	411
7.1	Einteilung der Thyristoren	411
7.2	Einrichtungs-Thyristortriode (Thyristor)	412
7.2.1	Grundlagen der Funktionsweise	413
7.2.2	Aufbau	414
7.2.3	Strom-Spannungs-Kennlinie	416
7.2.3.1	Betrieb in Sperrrichtung	416
7.2.3.2	Betrieb in (Vorwärts-)Blockierrichtung	417
7.2.4	Der Zündvorgang	419
7.2.4.1	Erläuterung des Zündvorgangs mit Hilfe des Zweittransistormodells	419
7.2.4.2	Die Zündbedingung	420
7.2.4.3	Zündung ohne Steuerstrom ( $I_G = 0$ )	422
7.2.4.4	Zündung durch den Steuerstrom	422
7.2.5	Löschen des Thyristors	425
7.2.6	Kennlinie des Steuerkreises	425
7.2.7	Temperaturabhängigkeit	426
7.2.8	Dynamische Eigenschaften	427
7.2.8.1	Kritische Spannungsanstiegsgeschwindigkeit $du/dt$	427
7.2.8.2	Kritische Stromanstiegsgeschwindigkeit $di/dt$	427
7.2.8.3	Einschaltverhalten	428
7.2.8.4	Ausschaltverhalten	429
7.2.9	Spannungs- und Stromgrenzwerte	430
7.2.10	Phasenanschnittsteuerung mit Thyristor	432
7.2.10.1	Funktionsweise der Phasenanschnittsteuerung	432
7.2.10.2	Berechnung der Änderung der Leistungsaufnahme	434
7.2.11	Zusammenfassung der Eigenschaften von Thyristoren	435
7.2.12	Vergleich von Thyristor und mechanischem Schalter	435
7.3	Spezielle Bauformen des Thyristors	436
7.3.1	Zweirichtungs-Thyristordiode (TRIAC)	436
7.3.2	Einrichtungs-Thyristortetrode	438
7.3.3	Asymmetrisch sperrende Thyristoren	439
7.3.3.1	Rückwärts leitender Thyristor (RCT)	439
7.3.3.2	Asymmetrisch sperrender Thyristor (ASCR)	439
7.3.4	Gate Turn-Off Thyristor (GTO)	440
7.3.4.1	Übersicht	440
7.3.4.2	Halbleiterstruktur	440
7.3.4.3	Stationäre Strom-Spannungskennlinie	441
7.3.4.4	Vorgang beim Abschalten	441
7.3.4.5	Zusammenfassung der Eigenschaften des GTO	442
7.3.5	MOS-gesteuerter Thyristor (MCT)	442
7.3.5.1	Übersicht	442

7.3.5.2	Halbleiterstruktur . . . . .	443
7.3.5.3	Schalteigenschaften des p-MCT . . . . .	444
7.3.5.4	Zusammenfassung der Eigenschaften von MCTs . . . . .	445
7.3.6	Lichtgesteuerter Thyristor (LTT) . . . . .	445
7.3.7	Feldgesteuerter Thyristor (FCT) . . . . .	446
7.3.7.1	Übersicht . . . . .	446
7.3.7.2	Schalteigenschaften des FCT . . . . .	446
7.3.8	Gate-Commutated Thyristor (GCT, IGCT) . . . . .	447
7.3.9	Unijunction-Transistor (UJT) . . . . .	448
7.3.9.1	Wirkungsweise . . . . .	448
7.3.9.2	Anwendung . . . . .	450
<b>8</b>	<b>Operationsverstärker . . . . .</b>	<b>453</b>
8.1	Allgemeines, Überblick . . . . .	453
8.2	Schaltsymbol, Anschlüsse . . . . .	454
8.3	Ausführungsformen . . . . .	455
8.4	Betriebsspannungen . . . . .	456
8.5	Operationsverstärker-Typen . . . . .	458
8.5.1	Normaler Operationsverstärker . . . . .	458
8.5.2	Transkonduktanz-Verstärker . . . . .	459
8.5.3	Transimpedanz-Verstärker . . . . .	460
8.5.4	Strom-Verstärker . . . . .	461
8.6	Der normale Operationsverstärker . . . . .	461
8.6.1	Begriffsdefinitionen . . . . .	462
8.6.2	Differenzverstärkung, Leerlaufspannungsverstärkung $V_0$ . . . . .	464
8.6.3	Übertragungskennlinie . . . . .	464
8.6.4	Gleichtaktverstärkung, Gleichtaktunterdrückung . . . . .	466
8.6.5	Eingangswiderstände . . . . .	468
8.6.5.1	Differenzeingangswiderstand . . . . .	469
8.6.5.2	Gleichtakteingangswiderstand . . . . .	469
8.6.6	Ausgangswiderstand . . . . .	470
8.6.7	Eingangsströme . . . . .	471
8.6.7.1	Eingangsruhestrom . . . . .	471
8.6.7.2	Offsetstrom (Eingangsfehlstrom) . . . . .	472
8.6.8	Offsetspannung . . . . .	473
8.6.9	Verstärkungseinstellung durch Gegenkopplung . . . . .	476
8.6.10	Verstärkungs-Bandbreiteprodukt . . . . .	477
8.6.10.1	Frequenzgang der Leerlaufverstärkung . . . . .	477
8.6.10.2	Erhöhung der Bandbreite durch Gegenkopplung . . . . .	479
8.6.11	Frequenzgangkorrektur . . . . .	480
8.6.11.1	Mehrstufiger Verstärker . . . . .	480
8.6.11.2	Schwingbedingung . . . . .	481

---

8.6.11.3	Amplituden- und Phasenrand . . . . .	484
8.6.11.4	Prinzip der Frequenzgangkorrektur . . . . .	485
8.6.11.5	Frequenzgangkorrektur am Operationsverstärker . . . . .	486
8.6.12	Spannungsbereich und Stromaufnahme . . . . .	492
8.6.13	Temperaturbereich . . . . .	493
8.6.14	Anstiegsgeschwindigkeit . . . . .	493
8.6.15	Maximale Ausgangsspannung . . . . .	495
8.6.16	Einschwingzeit (Settling Time) . . . . .	495
8.6.17	Zeitverzögerung nach Überlast . . . . .	496
8.6.18	Rauschen . . . . .	497
8.7	Der ideale Operationsverstärker . . . . .	500
8.8	Interner Aufbau von Operationsverstärkern . . . . .	501
8.8.1	Übersicht . . . . .	501
8.8.2	Die Eingangsstufe (Differenzverstärker) . . . . .	502
8.8.2.1	Grundschtaltung des Differenzverstärkers . . . . .	503
8.8.2.2	Realisierung der Konstantstromquelle . . . . .	505
8.8.2.3	Übertragungskennlinie des npn-Differenzverstärkers . . . . .	506
8.8.2.4	Übertragungskennlinie des n-Kanal MOSFET-Differenzverstärkers . . . . .	507
8.8.3	Die Koppelstufe . . . . .	507
8.8.4	Die Ausgangsstufe . . . . .	509
8.9	Tipps zum praktischen Einsatz von Operationsverstärkern . . . . .	509
<b>9</b>	<b>Grundlagen integrierter Halbleiterschaltungen . . . . .</b>	<b>513</b>
9.1	Allgemeines zu integrierten Schaltungen . . . . .	513
9.1.1	Definition und Arten der Integration . . . . .	513
9.1.1.1	Hybride Integration . . . . .	514
9.1.1.2	Monolithische Integration . . . . .	518
9.1.1.3	Multi Chip Module . . . . .	519
9.1.2	Vor- und Nachteile integrierter Schaltungen . . . . .	519
9.1.3	Einteilung integrierter Schaltungen . . . . .	520
9.1.3.1	Integrationsgrad . . . . .	520
9.1.3.2	Befestigungsart auf der Leiterplatte . . . . .	521
9.1.3.3	Technologie . . . . .	521
9.1.3.4	Schaltzeiten . . . . .	521
9.1.3.5	Temperaturbereiche . . . . .	523
9.1.3.6	Schaltungsart . . . . .	523
9.1.3.7	Anwendungsbereich . . . . .	523
9.1.3.8	Programmierbare Logik . . . . .	525
9.1.3.9	Zugänglichkeit . . . . .	525
9.2	Kenngrößen digitaler Schaltkreise . . . . .	526
9.2.1	Betriebsspannung . . . . .	526

9.2.2	Pegelbereiche und Übertragungskennlinie logischer Schaltungen	526
9.2.3	Spannungspegel, Störabstand	527
9.2.4	Lastfaktoren	529
9.2.5	Ausgangsstufen	530
9.2.6	Schaltzeiten	530
9.2.7	Verlustleistung	531
9.3	Logikbaureihen	532
9.3.1	Übersicht Bipolare Schaltkreisfamilien	532
9.3.2	Übersicht MOS-Schaltkreisfamilien	533
9.4	Bipolare Schaltkreisfamilien	534
9.4.1	RTL	534
9.4.2	DTL	534
9.4.3	ECL	536
9.4.4	I <sup>2</sup> L	539
9.4.5	TTL	540
9.4.5.1	Funktion	540
9.4.5.2	TTL-Ausgangsschaltungen	542
9.4.5.3	TTL-Schaltungsvarianten	545
9.4.5.4	TTL-kompatible High-Speed-CMOS-Logik	551
9.5	MOS-Schaltkreisfamilien	554
9.5.1	Vorteile von MOSFETs in integrierten Schaltungen	554
9.5.2	PMOS-Technologie	555
9.5.3	NMOS-Technologie	555
9.5.4	CMOS-Technologie	557
9.5.4.1	Allgemeine Eigenschaften	557
9.5.4.2	Statische CMOS-Logik	557
9.5.4.3	CMOS-Inverter	559
9.5.4.4	CMOS-Gatter	561
9.5.4.5	Prinzipieller Aufbau von CMOS-Bauelementen	562
9.5.4.6	Eingangs-Schutzschaltung	562
9.5.4.7	Latch-up-Effekt	563
9.5.4.8	Transmissionsgatter	564
9.5.4.9	Dynamische CMOS-Logik	564
9.5.5	BICMOS-Logik	566
<b>10</b>	<b>Halbleiterspeicher</b>	<b>569</b>
10.1	Einteilung digitaler Halbleiterspeicher	569
10.2	Allgemeiner Aufbau der Speicherbausteine	571
10.2.1	Speicherorganisation	571
10.2.2	Der Adressdekoder	574
10.2.3	Die Speicherzelle	575
10.2.4	Aufbau von Speicherbausteinen, Zusammenfassung	576

---

10.2.5	Busleitungen, Steuersignale . . . . .	576
10.2.6	Kenndaten . . . . .	577
10.2.6.1	Kapazität und Organisation eines Speicherbausteines . . . . .	577
10.2.6.2	Zeitverhalten von Speichern . . . . .	578
10.3	Einteilung der Tabellenspeicher . . . . .	579
10.4	Einteilung der Festwertspeicher . . . . .	579
10.4.1	Masken-ROM . . . . .	580
10.4.2	Mit Programmiergerät programmierbare PROMs . . . . .	581
10.4.2.1	PROM, ein Mal programmierbar . . . . .	581
10.4.2.2	EPROM, löschar und mehrfach programmierbar . . . . .	582
10.4.3	In der Schaltung löschar- und programmierbare PROMs . . . . .	586
10.4.3.1	EEPROM (E <sup>2</sup> PROM, Electrically Erasable PROM) . . . . .	586
10.4.3.2	Flash-EEPROM . . . . .	590
10.4.4	MRAM (Magnetic Random Access Memory) . . . . .	597
10.4.4.1	Grundlagen, magnetoresistive Effekte . . . . .	597
10.4.4.2	Funktionsweise . . . . .	598
10.4.4.3	Lese- und Schreibvorgang . . . . .	599
10.4.5	FRAM (Ferroelectric Random Access Memory) . . . . .	600
10.4.5.1	Grundlagen, Ferroelektrika . . . . .	600
10.4.5.2	Aufbau und Funktionsweise . . . . .	601
10.4.5.3	Lese- und Schreibvorgang . . . . .	602
10.4.5.4	OUM (Ovonic Unified Memory) . . . . .	603
10.5	Einteilung der flüchtigen Speicher . . . . .	604
10.5.1	Statisches RAM (SRAM) . . . . .	605
10.5.1.1	Die SRAM-Speicherzelle . . . . .	605
10.5.1.2	Die SRAM-Speichermatrix . . . . .	607
10.5.1.3	Spezielle Typen statischer RAM . . . . .	609
10.5.2	Dynamisches RAM (DRAM) . . . . .	610
10.5.2.1	Die Ein-Transistor-DRAM-Zelle . . . . .	610
10.5.2.2	Architektur und interne Steuerung . . . . .	611
10.5.2.3	Lesevorgang . . . . .	614
10.5.2.4	Schreibvorgang . . . . .	615
10.5.2.5	Refresh-Arten . . . . .	616
10.5.2.6	Organisationsarten und Typen von DRAMs . . . . .	617
<b>11</b>	<b>Anwendungsspezifische Integrierte Bausteine . . . . .</b>	<b>621</b>
11.1	Einsatz von ASICs . . . . .	621
11.2	Einteilung von ASICs . . . . .	622
11.2.1	Full-Custom-ASIC . . . . .	623
11.2.2	Standardzellen-ASIC . . . . .	623
11.2.3	Gate Array . . . . .	624
11.2.4	Programmierbare Logikbausteine . . . . .	625

---

11.3 Entwurfsablauf eines ASIC	626
11.3.1 Vorüberlegungen	626
11.3.1.1 Infrastruktur	626
11.3.1.2 Technologie	627
11.3.1.3 Entwurfsstrategie	627
11.3.1.4 Stückzahlen, Kosten, Zeit	628
11.3.2 Schaltungsentwicklung	628
11.3.2.1 Entwurfsschritte	628
11.3.2.2 Handrechnung	631
11.3.3 Schaltungseingabe	631
11.3.3.1 Schaltplaneingabe	632
11.3.3.2 Hardwarebeschreibungssprachen	633
11.3.3.3 Schaltungssynthese	633
11.3.4 Simulation	634
11.3.4.1 Grundlagen	634
11.3.4.2 Parameterstreuungsabschätzung	634
11.3.5 Layout	635
11.3.5.1 Layerbezeichnungen	636
11.3.5.2 Schematic Driven Layout	636
11.3.5.3 Automatische Platzierung und Verdrahtung	636
11.3.5.4 Mixed-Mode Layoutregeln	637
11.3.5.5 Dummystrukturen zur Nachkorrektur	637
11.3.5.6 Testpads	638
11.3.6 Entwurfsprüfung	638
11.3.6.1 ERC	638
11.3.6.2 DRC	638
11.3.6.3 LVS	638
11.3.7 Fertigung	639
11.3.7.1 Allgemeines	639
11.3.7.2 Maskenerstellung	639
11.3.7.3 Single Run	639
11.3.7.4 MPW-Run	640
11.3.7.5 Backup-Wafer	640
11.3.8 Mechanischer Aufbau	640
11.3.8.1 Bonddrähte	640
11.3.8.2 Mechanische Spannungen im Substrat	641
11.3.9 Test	641
11.3.9.1 Anforderungen und Fehlerarten	641
11.3.9.2 Teststrategie	642
11.3.9.3 Fehlermodelle	643
11.3.9.4 Prüfpfadtechnik	643

---

11.3.9.5	Boundary Scan	643
11.3.9.6	Testarten	644
11.4	Einteilung programmierbarer Logikbausteine	645
11.4.1	Übersicht und Begriffe	645
11.4.2	Architektur anwenderprogrammierbarer Logikschaltkreise	647
11.4.2.1	Kurzdarstellung von Verbindungsstrukturen	647
11.4.2.2	Elementare kombinatorische Schaltkreise	647
11.4.2.3	Grundsätzliches zur Architektur	649
11.4.2.4	Technologien	652
11.4.2.5	Wichtige Kennwerte	652
11.4.3	PAL	653
11.4.3.1	Kombinatorische PALs	653
11.4.3.2	Sequenzielle (Registered) PALs	653
11.4.4	GAL	657
11.4.5	CPLD	660
11.4.6	FPGA	664
11.4.6.1	Interne Struktur eines FPGA	664
11.4.6.2	Vorteile von FPGAs, Anwendungsgebiete	664
11.4.6.3	Aufbau eines FPGA	665
11.4.6.4	Architektur und Verdrahtung	667
11.4.6.5	Wahl eines FPGA	667
11.4.6.6	Programmiertechnologien	668
<b>Liste verwendeter Formelzeichen</b>		<b>671</b>
<b>Literatur</b>		<b>679</b>
<b>Sachverzeichnis</b>		<b>683</b>

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.

Gleichung 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 ( $\text{SiO}_2$ ) 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,  $\text{SiO}_2$ ) 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 ( $\text{CuInSe}_2$ ) und Kupferindiumgalliumsulfid ( $\text{CuInGaS}_2$ ).

**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

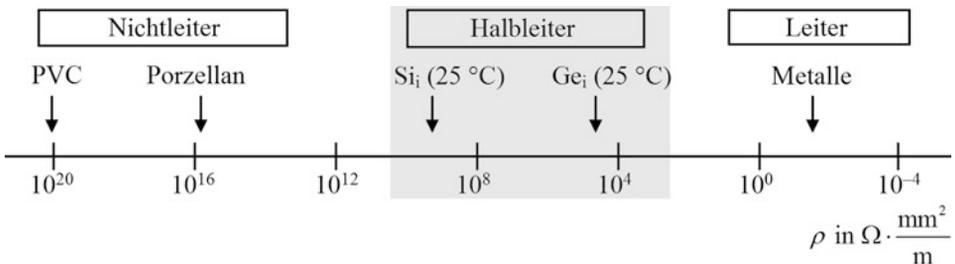
Unter elektrischem Strom wird der gerichtete Transport elektrischer Ladung durch bewegliche Ladungsträger in einem Medium verstanden. In einem Leiter entspricht der elektrische Strom einer Bewegung von Elektronen. Ein Medium setzt dem Stromfluss einen bestimmten Widerstand entgegen, der sich durch den spezifischen Widerstand  $\rho$  des jeweiligen Mediums ausdrücken lässt. Sehr bekannte Halbleiter sind Silizium und Germanium. *Halbleiter liegen mit ihrem spezifischen Widerstand zwischen den Nichtleitern (Isolatoren) und den Leitern (Abb. 2.2).*

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;
- ist auch während des Betriebs wunschgemäß einstellbar (z. B. durch eine Steuerspannung oder einen Steuerstrom).



**Abb. 2.2** Einordnung der Halbleiter Silizium und Germanium zwischen Leitern und Isolatoren, entsprechend ihrem spezifischen Widerstand

## 2.3 Aufbau der Atome

Die elektrische Leitfähigkeit von Stoffen lässt sich mit ihren atomaren Strukturen erklären. Alle Atome bestehen aus den Elementarteilchen *Elektronen*, *Protonen* (die Anzahl entscheidet über die Art des Elements) und *Neutronen* (außer bei Wasserstoff immer vorhanden). Elektronen und Protonen tragen eine elektrische Ladung, die *Elementarladung*.

Ein Elektron hat die negative Ladung  $e = -1,602\,177\,33 \cdot 10^{-19}$  As, ein Proton besitzt die positive Ladung  $|e|$ . Das Neutron ist elektrisch neutral, es trägt keine elektrische Ladung. Der Atomkern besteht aus Protonen und Neutronen, um ihn kreisen die Elektronen.

Für jedes Atom gilt, dass die Anzahl der Elektronen, die den Atomkern in der Atomhülle umkreisen, gleich ist der Anzahl der Protonen im Atomkern. Die positiven und negativen Ladungen kompensieren sich, somit ist das Atom elektrisch neutral.

### 2.3.1 Bohr'sches Atommodell

Der Aufbau der Atome lässt sich in Form von Modellen beschreiben. Sehr bekannt ist das *Bohr'sche Atommodell* mit folgender Vorstellung:

Die Protonen und Neutronen sind im so genannten Atomkern konzentriert. Die Elektronen umkreisen den Atomkern. Die Energie der Elektronen bestimmt den Durchmesser der Elektronenbahnen. Die Elektronen können nach den Gesetzen der Quantenmechanik nicht beliebige, sondern nur bestimmte Energien annehmen. Aus diesem Grunde sind nur bestimmte Bahnradien möglich. Dabei hat ein Elektron auf einer zulässigen Bahn stets einen bestimmten Wert an potenzieller Energie gegenüber dem Kern. Dieser Energiewert kann sich durch Aufnahme oder Abgabe von Energie ändern, dann ergibt sich auch eine andere Bahn mit einem anderen Abstand vom Kern. Elektronen können also zwischen den erlaubten Energieniveaus hin- und herspringen. Bei hoher Energiezufuhr kann ein Elektron den Atomverband sogar verlassen, das Atom ist dann ionisiert. Für jedes Elektron im Verbund eines Atoms sind aber nur bestimmte diskrete Energiewerte zulässig. Das Atommodell geht daher von diskreten *Elektronenschalen* mit unterschiedlichen Durchmessern aus.

*Kernnahe Schalen bedeuten niedrige, kernferne Schalen hohe Energie der Elektronen.*

Abbildung 2.3 zeigt in einer stark vereinfachten Darstellung ein Atom mit dem Atomkern in der Mitte und mit einem Elektron. Bei niedriger Temperatur (z. B.  $T = 300$  K) ist das Atom in einem energetisch niedrigen Zustand. In dem dargestellten Atommodell befindet sich das Elektron auf der inneren Schale. Durch Erhöhen der Temperatur auf z. B.  $T = 450$  K gelangt das Elektron auf eine weiter außen liegende Schale. Dies entspricht einem angeregten Energiezustand. Trägt man die möglichen Energiewerte  $E$ , die das Atom annehmen kann, in einem einfachen Diagramm auf, so ergeben sich mehrere diskrete Zustände (Energienlinien), deren Anzahl und Abstände für das Atom charakteristisch sind.