

Leonhard Stiny

# Aktive elektronische Bauelemente

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

*3. Auflage*

 Springer Vieweg

---

# Aktive elektronische Bauelemente

---

Leonhard Stiny

# Aktive elektronische Bauelemente

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

3., überarbeitete Auflage

Mit 553 Abbildungen und 23 Tabellen

 Springer Vieweg

Leonhard Stiny  
Haag a. d. Amper, Deutschland

ISBN 978-3-658-14386-2  
DOI 10.1007/978-3-658-14387-9

ISBN 978-3-658-14387-9 (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 2009, 2015, 2016

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 Vieweg ist Teil von Springer Nature

Die eingetragene Gesellschaft ist Springer Fachmedien Wiesbaden GmbH

Die Anschrift der Gesellschaft ist: Abraham-Lincoln-Strasse 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, im Februar 2015

**Leonhard Stiny**

---

# Inhaltsverzeichnis

<b>1</b>	<b>Einleitung</b>	1
<b>2</b>	<b>Grundlagen der Halbleiter</b>	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
<b>3</b>	<b>Der pn-Übergang</b>	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 . . . . .	63
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
<b>4</b>	<b>Halbleiterdioden . . . . .</b>	<b>77</b>
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	90
4.5.5.3	Wechselstromwiderstand – Differenzieller Widerstand	90
4.5.5.4	Wirkung des differentiellen Widerstandes	91
4.5.6	Schaltverhalten von Dioden	93
4.5.6.1	Ideales Schaltverhalten	93
4.5.6.2	Umschalten von Sperr- in Flussrichtung	93
4.5.6.3	Umschalten von Fluss- in Sperrrichtung	95
4.5.6.4	Ein- und Ausschalten bei ohmsch-induktiver Last	96
4.6	Temperaturabhängigkeit der Diodenparameter	97
4.6.1	Temperaturabhängigkeit des Sperrstromes	97
4.6.2	Temperaturabhängigkeit der Durchlassspannung	98
4.6.3	Zusammenfassung: Temperaturabhängigkeit der Diodenparameter	99
4.7	Kenn- und Grenzdaten von Dioden	100
4.7.1	Grenzspannungen	100
4.7.2	Grenzströme	101
4.7.3	Sperrstrom	101
4.7.4	Maximale Verlustleistung	101
4.8	Auszüge aus Datenblättern von Dioden	102
4.8.1	Silizium-Epitaxial-Planar-Diode 1N 4148	102
4.8.2	Silizium-Diffusions-Dioden 1N 4001... 1N 4007	106
4.9	Herstellungsmethoden für pn-Übergänge	108
4.9.1	Legierungstechnik	108
4.9.2	Planartechnik	109
4.9.2.1	Diffusion	109
4.9.2.2	Epitaxie	110
4.9.2.3	Ionenimplantation	111
4.9.2.4	Kontaktierung	112
4.10	Aufbau von Halbleiterdioden	112
4.10.1	Einzeldiode	112
4.10.1.1	Spitzendioden	112
4.10.1.2	Flächendioden	114
4.10.1.3	Leistungsdioden	115
4.10.1.4	Gehäuse	116
4.10.2	Integrierte Diode	117
4.11	Diodentypen	118
4.11.1	Schaltdiode, Universaldiode	118
4.11.2	Gleichrichterdiode	118
4.11.3	Schottky-Diode	118
4.11.4	Suppressordiode	119

4.11.5	Temperatursensoren	123
4.11.6	DIAC	123
4.11.6.1	Dreischichtdiode	124
4.11.6.2	Fünfschichtdiode	124
4.11.6.3	Vierschichtdiode	125
4.11.6.4	Anwendungen der Mehrschichtdioden	126
4.11.6.5	Kennwerte von Mehrschichtdioden	127
4.11.7	Zenerdiode, Z-Diode	127
4.11.8	Avalanchediode	129
4.11.9	Stromregeldiode	129
4.11.10	Leuchtdiode (Lumineszenzdiode, LED)	130
4.11.10.1	Grundsätzliches	130
4.11.10.2	Funktionsprinzip	131
4.11.10.3	Herstellung	131
4.11.10.4	Material und Farben, Spektrum	132
4.11.10.5	Technische Ausführung, Aufbau	135
4.11.10.6	Flächen- und Kantenstrahler	135
4.11.10.7	Wirkungsgrad	138
4.11.10.8	Eigenschaften	138
4.11.10.9	Kennwerte und Grenzwerte	141
4.11.10.10	Anwendungen und Einsatzbereiche	142
4.11.11	Organische Leuchtdiode (OLED)	143
4.11.11.1	Vorteile	143
4.11.11.2	Nachteile	144
4.11.11.3	Organische Materialien	144
4.11.11.4	Aufbau	145
4.11.11.5	Funktionsweise	146
4.11.11.6	Aktivmatrix- und Passivmatrix-Displays	147
4.11.12	Laserdiode (LD)	148
4.11.12.1	Grundlagen	148
4.11.12.2	Realisierungsbedingungen für die Funktion der Laserdiode	151
4.11.12.3	Aufbau der Materialschichten	155
4.11.12.4	Aufbau des Laserresonators, DFB-, DBR-Laser	156
4.11.12.5	Kenngößen	158
4.11.12.6	Eigenschaften und Besonderheiten	160
4.11.12.7	Anwendungen	162
4.11.12.8	Beispiel für Datenblattangaben einer Laserdiode	162
4.11.13	Fotodiode	162
4.11.13.1	Funktionsweise	163
4.11.13.2	Betriebsarten	167
4.11.13.3	Aufbau	169

4.11.13.4	Eigenschaften	170
4.11.13.5	Ausführungsformen	171
4.11.13.6	Anwendungen	172
4.11.14	Solarzelle	172
4.11.14.1	Aufbau einer Silizium-Solarzelle	173
4.11.14.2	Solarzellentypen	174
4.11.14.3	Verluste in Solarzellen	175
4.11.14.4	Eigenschaften von Solarzellen	176
4.11.14.5	Kenndaten der Solarzelle	178
4.11.14.6	Ersatzschaltbild der Solarzelle	181
4.11.14.7	Bypass-Diode	182
4.11.15	Kapazitätsdiode (Varaktor-Diode)	182
4.11.15.1	Allgemeines	183
4.11.15.2	Funktionsweise und Eigenschaften	183
4.11.15.3	Ersatzschaltung, Güte	183
4.11.15.4	Grenzfrequenz $f_c$ (cut-off-frequency)	185
4.11.15.5	Temperaturabhängigkeit	185
4.11.15.6	Anwendungen	186
4.11.16	pin-Diode	188
4.11.16.1	Funktion	189
4.11.16.2	Anwendungen der pin-Diode	190
4.11.17	Tunneldiode (Esaki-Diode)	191
4.11.17.1	Grundlegendes zur Quantenphysik	192
4.11.17.2	Tunneleffekt	192
4.11.17.3	Aufbau und Funktion der Tunneldiode	194
4.11.17.4	Ersatzschaltung	196
4.11.17.5	Anwendungen der Tunneldiode	198
4.11.18	Rückwärtsdiode (Backwarddiode)	198
4.11.19	Gunndiode	199
4.11.19.1	Gunn-Effekt	199
4.11.19.2	Aufbau der Gunndiode	200
4.11.19.3	Funktionsweise der Gunndiode	200
4.11.19.4	Anwendungen der Gunndiode	205
4.11.20	IMPATT-Diode	206
4.11.20.1	Funktionsweise der IMPATT-Diode	206
4.11.20.2	Anwendungen der IMPATT-Diode	209
4.11.21	TRAPATT-Diode	209
4.11.22	BARITT-Diode	210
4.11.23	DOVETT-Diode	211
4.11.24	Ladungsspeicherungsdiode	212

4.11.25	Speicherschaltodiode (Step-Recovery-Diode)	212
4.11.26	Magnetdiode	214
4.11.26.1	Aufbau	214
4.11.26.2	Funktionsweise	214
4.11.26.3	Eigenschaften und Anwendungen	215
<b>5</b>	<b>Bipolare Transistoren</b>	<b>217</b>
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	$\beta$ -Grenzfrequenz	281
5.15.3.2	Transitfrequenz	282
5.15.3.3	Maximale Schwingfrequenz	284
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 Arbeits- punkte	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

<b>6</b>	<b>Feldeffekttransistoren</b>	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
<b>7</b>	<b>Thyristoren</b>	<b>421</b>
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
<b>8</b>	<b>Operationsverstärker</b>	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
<b>9</b>	<b>Grundlagen integrierter Halbleiterschaltungen</b>	<b>519</b>
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 <sup>2</sup> 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

<b>10 Halbleiterspeicher</b> . . . . .	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 <sup>2</sup> 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

<b>11</b>	<b>Anwendungsspezifische Integrierte Bausteine</b>	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
	<b>Liste verwendeter Formelzeichen</b>	<b>677</b>
	<b>Literatur</b>	<b>685</b>
	<b>Sachverzeichnis</b>	<b>689</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* (CuInSe<sub>2</sub>) und *Kupferindiumgalliumsulfid* (CuInGaS<sub>2</sub>).

**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 (...C=C–C=C–C...). 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 C<sub>18</sub>H<sub>12</sub>, besteht aus vier aneinander gereihten Benzolringen, die Verwendung erfolgt z. B. in elektrisch gepumpten organischen Halbleiter-Lasern) und *Pentacen* (C<sub>22</sub>H<sub>14</sub>, ein polyzyklischer aromatischer Kohlenwasserstoff mit fünf linear kondensierten Benzolringen, wird in organischen Feldeffekttransistoren verwendet).

## 2.2 Halbleiter zwischen Nichtleiter und Leiter

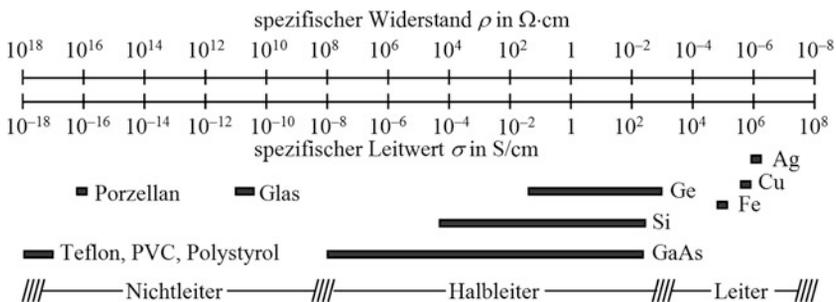
Der gerichtete Fluss elektrischer Ladungsträger wird als elektrischer Strom bezeichnet. In einem metallischen Leiter entspricht der elektrische Strom einer Bewegung von Elektronen in eine Vorzugsrichtung. Der elektrische Widerstand ist ein Maß dafür, wie stark ein leitfähiges Material den Stromdurchgang (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  $\rho$  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 proportionalem 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 aufgebaute 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

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

---

## 2.3 Aufbau der Atome

Die elektrische Leitfähigkeit von Stoffen lässt sich mit ihren atomaren Strukturen erklären. Materie ist aus *Atomen* bzw. *Molekülen* aufgebaut. Moleküle bestehen aus einem Verbund von Atomen. Die Bausteine der Atome werden als *Elementarteilchen* bezeichnet, da sie lange Zeit als kleinste Teilchen ohne unterteilbaren Aufbau angesehen wurden. Elementarteilchen sind *Elektronen*, *Protonen* und *Neutronen*. Da ein Elektron ein Elementarteilchen ist, wird seine Ladung *Elementarladung* genannt. Ein Elektron trägt die negative Ladung  $e = -1,602 \cdot 10^{-19} \text{ C}$  (Coulomb = As). Die Elementarladung ist die kleinste vorkommende Ladungsmenge. Einem Proton wird als Elementarteilchen die positive Elementarladung  $e = +1,602\,177\,33 \cdot 10^{-19} \text{ C}$  zugeordnet. Ein Neutron trägt keine elektrische Ladung. Der Atomkern besteht aus so genannten Nukleonen, den Protonen und den Neutronen, er ist somit immer positiv geladen. Um den Atomkern kreisen die Elektronen. Nach außen hin sind Atome (falls sie nicht ionisiert sind) elektrisch neutral. Sie bestehen aus genau so vielen positiven Protonen wie negativen Elektronen, die Ladungen neutralisieren sich. Die Anzahl der Neutronen kann unterschiedlich sein.

### 2.3.1 Bohr'sches Atommodell

Der Aufbau von Atomen kann mit unterschiedlichen Denkmodellen beschrieben werden. Wegen seiner Einfachheit wird häufig das *Bohr'sche Atommodell* verwendet. Dieses ist zwar veraltet, für viele Zwecke ist es aber ausreichend genau. Entsprechend diesem Atommodell besteht jedes Atom aus einem *Atomkern* und einer *Atomhülle*. Wie bereits erwähnt, besteht der Atomkern aus den Nukleonen (Protonen und Neutronen). In der Atomhülle befinden sich negativ geladene Elektronen, die sich auf definierten Kreisbahnen um den Atomkern herum bewegen. Elektronen mit gleichem Abstand vom Kern werden zu einer *Elektronenschale* zusammengefasst. Bei einem Atom sind maximal sieben Schalen mit unterschiedlichen Durchmessern möglich. Die Anzahl der Elektronen pro Schale ist begrenzt. Die Energie von Elektronen auf kernnahen Schalen ist niedriger als auf kernfernen Schalen.

Ein abgeschlossenes physikalisches System ist bestrebt, einen stabilen Zustand im Gleichgewicht und somit einen möglichst energiearmen Zustand anzunehmen. Dies gilt auch für Atome. Da Atome immer den energieärmsten Zustand minimaler freier Energie (genauer gesagt: minimaler freier Enthalpie) einnehmen wollen, werden die inneren Schalen zuerst mit Elektronen besetzt. Die Elektronen sind umso fester an das Atom gebunden, je näher sie am Kern sind.

Die äußerste Schale eines Atoms ist normalerweise nicht mit der maximal möglichen Anzahl von Elektronen aufgefüllt. Die Elektronen der äußersten Schale werden *Valenz-*