

*Stefan Goßner*

# Grundlagen der Elektronik

Halbleiter, Bauelemente  
und Schaltungen

Loch

Freies  
Elektron

11. korrigierte und ergänzte Auflage

Berichte aus der Elektronik

**Stefan Goßner**

## **Grundlagen der Elektronik**

Halbleiter, Bauelemente und Schaltungen

11. korrigierte und ergänzte Auflage

Shaker Verlag  
Düren 2019

**Bibliografische Information der Deutschen Nationalbibliothek**

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

Copyright Shaker Verlag 2019

Alle Rechte, auch das des auszugsweisen Nachdruckes, der auszugsweisen oder vollständigen Wiedergabe, der Speicherung in Datenverarbeitungsanlagen und der Übersetzung, vorbehalten.

Printed in Germany.

ISBN 978-3-8440-6784-2

ISSN 1436-3801

Shaker Verlag GmbH • Am Langen Graben 15a • 52353 Düren

Telefon: 02421 / 99 0 11 - 0 • Telefax: 02421 / 99 0 11 - 9

Internet: [www.shaker.de](http://www.shaker.de) • E-Mail: [info@shaker.de](mailto:info@shaker.de)

## Vorwort zur ersten Auflage

Dieses Buch entstand als begleitende Unterlage zu meiner Vorlesung *Grundlagen der Elektronik* für Studentinnen und Studenten der Fachrichtungen Elektrotechnik/Elektronik sowie Technische Informatik im zweiten und dritten Semester an der Technischen Fachhochschule (TFH) Berlin. Es kann aber auch Studenten an Universitäten den Einstieg in das komplexe Gebiet der Elektronik eröffnen.

Die Themen *Halbleiterphysik*, *pn-Übergang* und *Metall-Halbleiter-Übergänge* nehmen einen relativ breiten Raum ein. Mit einfachen modellhaften Vorstellungen wird versucht, die physikalischen Grundlagen und Vorgänge in Halbleiterbauelementen zu erläutern. Dies erscheint notwendig, da das Verständnis zahlreicher Eigenschaften von Halbleiterbauelementen nur auf der Basis eines ausreichenden Wissens über die physikalischen Zusammenhänge möglich ist (z.B. Temperaturabhängigkeit, dynamische Eigenschaften, Kennlinienverläufe, sich gegenseitig ausschließende Eigenschaften).

Breiter Raum wird den Teilen eingeräumt, in denen anwendungsbezogenes Wissen über die Funktionsweise und den Einsatz von Dioden, Transistoren und Operationsverstärkern behandelt wird.

Zahlreiche Abbildungen sollen die oftmals komplexe Materie anschaulicher machen.

Entwurf und Analyse elektronischer Schaltungen erfolgen heute grundsätzlich unter Einsatz rechnergestützter Hilfsmittel, z.B. mit Netzwerkanalyseprogrammen wie PSpice. Dies sind wertvolle Werkzeuge in der Hand des Fachmannes, sie ersetzen jedoch dessen Wissen über die Bauelemente und ihre Einsatzmöglichkeiten, über Schaltungen und ihre Eigenschaften, über Entwurfs- und Analysemethoden in keiner Weise. Nur wenn der Ingenieur in der Lage ist, eine Schaltung auch ohne Rechnerunterstützung zu entwerfen, zu verstehen und zu analysieren, wird er die rechnergestützten Werkzeuge effektiv nützen können.

Aus diesem Grunde wird in diesem Buch dem mit traditionellen Mitteln durchgeführten Entwurf, der Dimensionierung sowie der rechnerischen und grafischen Analyse elektronischer Grundsaltungen großes Gewicht beigemessen. Bei der Berechnung von Schaltungen werden nicht nur die Gleichungen angegeben, mit denen die wesentlichen Schaltungseigenschaften bestimmt werden können. Vielmehr wird jeweils versucht, die Herleitung dieser Gleichungen aufzuzeigen. Auf diese Weise sollen die Studenten in die Lage versetzt werden, in ähnlichen Fällen selbständig die entsprechenden Berechnungen vornehmen zu können. Da das in der Vorlesung „Grundlagen der Elektrotechnik“ erworbene Wissen über die Methoden der Schaltungsanalyse meist noch nicht ausreichend in anwendbare Fertigkeiten umgesetzt ist, werden die für diese Berechnungen notwendigen Analyseformen in einem Anhang dargestellt.

Das Buch ist entstanden, damit die Studenten während meiner Vorlesung keinen Rekord im Schnellschreiben und Schnellzeichnen aufstellen müssen, sondern ausreichend Zeit zum Mitdenken und Verstehen erhalten. Vielleicht wird es dem einen oder anderen aber nicht nur während des Studiums, sondern auch noch während seiner späteren beruflichen Tätigkeiten hilfreich sein.

Während der Erstellung dieser Unterlage habe ich immer wieder Fehler entdeckt und ausgemerzt. Trotzdem ist das Buch ganz sicher auch jetzt noch nicht fehlerfrei. Für entsprechende Hinweise bin ich sehr dankbar.

Berlin, im April 2001

Prof. Stefan Goßner

## Vorwort zur 11. Auflage

Das vorliegende Buch behandelt vorzugsweise Themen der Halbleiter-Elektronik auf der Basis von kristallinen Halbleitern. Die Kenntnis anderer elektronischer Bauelemente, wie z.B. Widerstände, Kondensatoren, Induktivitäten, und ihrer Funktionsweise wird vorausgesetzt.

Halbleiter haben insbesondere ab Mitte des 20. Jahrhunderts die Elektrotechnik und Elektronik revolutioniert. Langsame, energie- und raumfressende, verschleißende und teure elektronische Komponenten und Systeme mit meist begrenztem Funktionsumfang wurden ersetzt und verdrängt durch leistungsfähige, schnelle, verlustarme, miniaturisierte, langlebige und immer billigere Halbleiter-Bauelemente und -Systeme. Die erreichte Funktionalität halbleiter-basierter Systeme scheint fast grenzenlos zu sein und hat nicht nur zu einer weiteren industriellen Revolution geführt, sondern greift tief in unser tägliches Leben ein.

Mobil-Telefon, Internet, Geldautomaten, bargeldloses Bezahlen, elektronische Medien, moderne Informationstechnologie, Navigationssysteme, Smart Home usw. sind Errungenschaften, ohne die viele von uns sich das Leben kaum mehr vorstellen können. Behörden, Verwaltungen, Betriebe, Banken, Versicherungen, Wissenschaft usw. sind heute ohne halbleiter-basierte elektronische Systeme zur elektronischen Datenerfassung, -Speicherung, -Verarbeitung und -Übertragung nicht mehr existenzfähig. Nicht zuletzt hat die zu Grunde liegende technische Entwicklung dazu beigetragen, den Menschen auf den Mond zu bringen. Die Reise zum Mars wird vorbereitet.

Leider sind in unserem täglichen Leben auch einige weniger zu begrüßende Folgeerscheinungen zu beobachten: Mancher hat seine berufliche Tätigkeit verloren, weil sie durch elektronische Systeme besser und ökonomischer erledigt werden kann. Insbesondere Kinder und Jugendliche sind gefährdet, einer Handysucht oder einer Computer- und Video-Spielsucht zu erliegen. Während meiner Lehrtätigkeit musste ich feststellen, dass die durchaus positiv zu bewertenden Taschenrechner vielfach zum weitgehenden Verlust mathematischer Fertigkeiten meiner Studenten geführt haben: Kopfrechnen ist heute out. Man tut es nicht mehr, ja man kann es auch nicht mehr. Höhepunkt dieser Beobachtungen war, dass ein Student zur Lösung der Rechenaufgabe  $50 : 2$  eifrig in seiner Aktentasche nach dem Taschenrechner suchte.

Die technische Entwicklung neuzeitlicher elektronischer Bauelemente und System wird weitergehen. Sie werden noch leistungsfähiger, kleiner, schneller und komplexer werden. Es zeichnet sich ab, dass Wide-Bandgap-Halbleiter die Elektronik teilweise revolutionieren werden. Sie sind in dieser Auflage zum ersten Mal berücksichtigt.

Ziel dieses Lehrbuches ist es, dem interessierten Leser ein Grundverständnis über Halbleiter, ihre Eigenschaften und ihre Funktionsweise, über einfache (bis niedrig integrierte) Halbleiterbauelemente und ihre Anwendung sowie über Analyse- und Berechnungsmethoden einfacher elektronischer Schaltungen zu vermitteln. Dieses Grundverständnis ist Voraussetzung, um die Funktionsweise auch komplexerer Systeme zu verstehen.

„Gru, teurer Freund, ist alle Theorie“, steht schon in Goethes Faust. Damit dies nicht auf die Inhalte dieses Buches zutrifft, werden die einzelnen Fach-Kapitel durch Übungsaufgaben ergänzt.

Seit der 1. Auflage mit 334 Seiten sind bei dieser 11. Auflage 539 Seiten geworden. Bei mehr als 500 Seiten technischer Inhalte sind Fehler leider nicht auszuschließen. Sofern mir solche bekannt werden, veröffentliche ich die Korrekturen unter [www.prof-gossner.de](http://www.prof-gossner.de).

Neufahrn, im Juni 2019

Prof. Stefan Goßner

# Inhaltsverzeichnis

<b>1</b>	<b>EINFÜHRUNG IN DIE PHYSIK DER HALBLEITER</b>	<b>1</b>
1.1	Arten von Halbleitern	1
1.2	Einordnung der Halbleiter zwischen Leitern und Isolatoren	1
1.3	Aufbau von Leitern und Halbleitern	2
1.3.1	Aufbau der Atome	2
1.3.2	Kristallaufbau	4
1.4	Leitungsmechanismen in Halbleitern	6
1.4.1	Eigenleitung (Leitungsmechanismen im reinen Halbleiter)	6
1.4.2	Störstellenleitung	9
1.4.3	Ladungsträgerkonzentrationen im dotierten Halbleiter	11
1.4.4	Massenwirkungsgesetz	13
1.4.5	Leitfähigkeit des Halbleiters	13
1.4.6	Erklärung der Leitungsmechanismen im Halbleiter mit Energie-Modellen	14
1.4.7	Energie-Verteilung der freien Elektronen und der Löcher	16
1.4.8	Direkte und indirekte Halbleiter	20
1.4.9	Temperaturabhängigkeit von Halbleiterdaten	22
1.5	Übungsaufgaben zur Physik der Halbleiter	22
<b>2</b>	<b>DER PN-ÜBERGANG</b>	<b>24</b>
2.1	Der pn-Übergang ohne äußere Spannung	24
2.1.1	Der ideale abrupte pn-Übergang	24
2.1.2	Ladungsträgerdiffusion - Bildung einer Raumladungszone	24
2.1.3	Ladungsträgerdichte	25
2.1.4	Raumladungsdichte	25
2.1.5	Diffusionsspannung	26
2.1.6	Sperrschichtweite	27
2.1.7	Sperrschichtkapazität	27
2.1.8	Energiebänder-Modell des pn-Überganges	27
2.2	Der pn-Übergang mit äußerer Spannung	28
2.2.1	Sperrpolung	28
2.2.2	Flusspolung	30
2.2.3	Durchbruch bei hoher Feldstärke in Sperrpolung	32
2.2.4	Gesamtkennlinie des pn-Überganges	34
2.2.5	Temperaturabhängigkeit der Kennlinie	35
2.2.6	Schaltverhalten des pn-Übergangs	35
2.3	Übungsaufgaben zum pn-Übergang	39
<b>3</b>	<b>METALL-HALBLEITER-ÜBERGÄNGE</b>	<b>42</b>
3.1	Schottky-Kontakt (Sperrschicht-Kontakt)	43
3.1.1	Übergang von n-Halbleiter zu Metall mit größerer Austrittsarbeit ( $W_M > W_H$ )	43
3.1.2	Übergang von p-Halbleiter zu Metall mit geringerer Austrittsarbeit ( $W_M < W_H$ )	45
3.1.3	Eigenschaften des Schottky-Kontakts	47
3.2	Ohmscher Kontakt	48
3.2.1	Übergang von n-Halbleiter zu Metall mit kleinerer Austrittsarbeit ( $W_M < W_H$ )	48
3.2.2	Übergang von p-Halbleiter zu Metall mit größerer Austrittsarbeit ( $W_M > W_H$ )	49
3.2.3	Ohmscher Kontakt durch hochdotierte Halbleiterzwischenschicht	51
3.3	Übungsaufgaben zu Metall-Halbleiter-Übergängen	52

## Inhaltsverzeichnis

<b>4</b>	<b>DIE DIODE</b>	<b>53</b>
4.1	Allgemeines	53
4.2	Diodentypen	56
4.2.1	Universal- und Richtdiode	56
4.2.2	PIN-Dioden	57
4.2.3	Schaltdioden	58
4.2.4	Die Z-Diode	59
4.2.5	Suppressordiode	60
4.2.6	Kapazitätsdiode	60
4.2.7	Tunneldiode	61
4.2.8	Backward-Diode	62
4.2.9	Schottky-Diode	63
4.2.10	Weitere Diodenformen	63
4.3	Übungsaufgaben zu Dioden <sup>0</sup>	64
<b>5</b>	<b>STABILISIERUNGSSCHALTUNG MIT Z-DIODE</b>	<b>69</b>
5.1	Grundschialtung	69
5.1.1	Graphische Schaltungsanalyse	69
5.1.2	Rechnerische Schaltungsanalyse (Betrieb mit Gleichspannung)	72
5.2	Berechnung von Grenzwerten	74
5.2.1	Zulässiger Arbeitsbereich der Z-Diode	74
5.2.2	Grenzwerte für die Einzelbauelemente	75
5.3	Genauere Betrachtung des differentiellen Widerstandes	79
5.4	Überlagerung von Gleich- und Wechselspannung	80
5.4.1	Wechselanteil der stabilisierten Gleichspannung	80
5.4.2	Verlustleistung der Z-Diode	81
5.5	Übungsaufgaben zur Stabilisierungsschialtung mit Z-Diode	82
<b>6</b>	<b>NETZGLEICHRICHTER</b>	<b>83</b>
6.1	Gleichrichterschaltungen ohne Glättung (mit ohmscher Last)	83
6.1.1	Einweggleichrichter	83
6.1.2	Zweiweggleichrichter - Mittelpunktsschialtung	85
6.1.3	Zweiweggleichrichter - Brückengleichrichter (Graetz-Gleichrichter)	87
6.1.4	Genauere Berechnung der Zweiweggleichrichter	88
6.2	Gleichrichterschaltungen mit Glättung	90
6.2.1	Glättungsarten	91
6.2.2	Berechnung des Zweiweggleichrichters mit Glättungskondensator	92
6.2.3	Zusätzliche Glättung mit Sieb-Gliedern	100
6.3	Gleichrichter mit Pufferbatterie	101
6.4	Kondensatornetzteil	102
6.5	Übungsaufgaben zu Netzgleichrichtern	105
<b>7</b>	<b>DREHSTROMGLEICHRICHTER</b>	<b>108</b>
7.1	Mittelpunkt-Schialtung (Halbbrücke) (3-pulsiger Gleichrichter)	108
7.2	Drehstrom-Brückengleichrichter (6-pulsiger Gleichrichter)	110
7.3	Übungsaufgaben zu Drehstromgleichrichtern	113

## Inhaltsverzeichnis

<b>8</b>	<b>SPANNUNGSVERVIELFACHUNG</b>	<b>115</b>
8.1	Spannungsverdoppelung mit der Delonschaltung	115
8.2	Spannungsverdoppelung mit Villardschaltung	116
8.3	Spannungsvervielfachung durch Kaskadierung der Villardschaltung	118
8.4	Übungsaufgaben zur Spannungsvervielfachung	119
<b>9</b>	<b>DER BIPOLARE TRANSISTOR</b>	<b>120</b>
9.1	Aufbau und Herstellungsverfahren	120
9.2	Funktionsweise	122
9.2.1	Der Transistoreffekt	122
9.2.2	Strömungsmechanismen im Transistor	125
9.2.3	Einfluss der Kollektor-Basis-Spannung auf den Kollektorstrom	126
9.3	Schaltzeichen - Richtungspfeile für Ströme und Spannungen	127
9.4	Transistor-Grundsaltungen	127
9.4.1	Basisschaltung	127
9.4.2	Emitterschaltung	129
9.4.3	Kollektorschaltung	132
9.4.4	Umrechnung der Stromverstärkungen	133
9.5	Darlington- oder Super-Beta-Schaltung	133
9.6	Restströme	134
9.7	Grenzwerte	136
9.7.1	Grenzwert der Kollektor-Basis-Sperrspannung	136
9.7.2	Grenzwerte der Kollektor-Emitter-Spannung	137
9.7.3	Grenzwert der Basis-Emitter-Sperrspannung	140
9.7.4	Leistungsgrenzwert	140
9.7.5	Stromgrenzwerte	140
9.7.6	Safe Operation Area	140
9.8	Inverser Betrieb des Transistors	142
9.9	Das Ebers-Moll-Modell	142
9.10	Daten von Transistoren	143
9.11	Übungsaufgaben zu Aufbau und Funktionsweise des bipolaren Transistors	144
<b>10</b>	<b>GLEICHSTROMBETRIEB DES BIPOLAREN TRANSISTORS</b>	<b>146</b>
10.1	Einstellung von Gleichströmen und Gleichspannungen am Transistor	146
10.1.1	Einprägung des Basisstromes	146
10.1.2	Einprägung der Basis-Emitter-Spannung	147
10.1.3	Einstellung der Kollektor-Emitter-Spannung	147
10.2	Stabilisierung des Arbeitspunktes	148
10.2.1	Anforderungen an die Stabilität des Arbeitspunktes	148
10.2.2	Ursachen für Arbeitspunkt-Verschiebungen	148
10.2.3	Gegenkopplungsmaßnahmen zur Arbeitspunkt-Stabilisierung	149
10.2.4	Demonstration der Temperaturabhängigkeit und der Stabilisierung des Arbeitspunktes	151
10.2.5	Verfahren zur Berechnung von Abweichungen des Arbeitspunktes	152
10.2.6	Berechnung von Abweichungen des Arbeitspunktes einer gegebenen Schaltung	153
10.2.7	Stabilisierung des Arbeitspunktes bei der Schaltungsdimensionierung	155

## Inhaltsverzeichnis

<b>10.3 Dimensionierung einer Transistorschaltung und grafische Analyse des Arbeitspunktes</b>	<b>157</b>
10.3.1 Dimensionierung der Schaltung	157
10.3.2 Grafische Analyse des Arbeitspunktes	159
<b>10.4 Beispielschaltungen</b>	<b>162</b>
10.4.1 Konstantspannungsquelle	162
10.4.2 Einfache Konstantstromquelle	162
10.4.3 Einfacher Stromspiegel (Konstantstromquelle)	163
10.4.4 Wilson-Stromspiegel	165
<b>10.5 Gegenkopplung bei mehrstufigen Transistorverstärkern</b>	<b>165</b>
<b>10.6 Übungsaufgaben zum Gleichstrombetrieb des Transistors</b>	<b>167</b>
<b>11 DER BIPOLARE TRANSISTOR IM WECHSELSPANNUNGSVERSTÄRKER</b>	<b>171</b>
<b>11.1 Einstellung des Arbeitspunktes</b>	<b>171</b>
<b>11.2 Grundschaltung eines Wechselspannungsverstärkers in Emitterschaltung</b>	<b>171</b>
11.2.1 Prinzipieller Aufbau und Funktion	171
11.2.2 Analyse des Arbeitspunktes	172
11.2.3 Wechselstromanalyse	173
11.2.4 Verzerrungen und Begrenzungen des Ausgangssignals (Aussteuerungsgrenzen)	173
11.2.5 Technische Realisierung	175
<b>11.3 RC-gekoppelter Wechselspannungsverstärker in Emitterschaltung</b>	<b>176</b>
11.3.1 Grafische Analyse des Wechselstrom-Verhaltens	176
11.3.2 Berechnung der Wechselstromgrößen	180
11.3.3 Vergleich der Analyseergebnisse	182
11.3.4 Wechselspannungsverstärkung bei Stromgegenkopplung	182
11.3.5 Berechnung der Kondensatoren	185
11.3.6 Grenzfrequenzen	188
11.3.7 Frequenzgang des Transistors	189
<b>11.4 RC-gekoppelter Wechselspannungsverstärker in Basisschaltung</b>	<b>191</b>
11.4.1 Die Schaltung	191
11.4.2 Berechnung der Wechselstrom-Kenngrößen	191
11.4.3 Obere Grenzfrequenz der Basisschaltung	192
<b>11.5 RC-gekoppelter Wechselspannungsverstärker in Kollektorschaltung</b>	<b>193</b>
11.5.1 Stromlaufplan und Daten	193
11.5.2 Wechselstrom-Berechnungen	194
11.5.3 Bootstrapschaltung	197
<b>11.6 Vergleich der Transistor-Grundschaltungen</b>	<b>199</b>
<b>11.7 Lage des Arbeitspunktes im Kennlinienfeld</b>	<b>200</b>
11.7.1 Klein- und Mittelsignalverstärker	201
11.7.2 Leistungsverstärker - Transistorendstufen	201
<b>11.8 Übungsaufgaben zum Wechselspannungsverstärker mit bipolarem Transistor</b>	<b>203</b>
<b>12 DER BIPOLARE TRANSISTOR ALS SCHALTER</b>	<b>208</b>
<b>12.1 Der ideale Schalter (zum Vergleich)</b>	<b>208</b>
<b>12.2 Die Betriebszustände des Transistor-Schalters</b>	<b>210</b>
12.2.1 Ausgewählte Details aus der Halbleiter- und Transistorphysik	210
12.2.2 Prinzipielle Ansteuerungsvarianten	211

## Inhaltsverzeichnis

12.2.3	Der gesperrte Transistor	212
12.2.4	Der leitende Transistor (ungesättigt, $U_{CB} > 0$ )	213
12.2.5	Der leitende Transistor (gesättigt)	215
12.2.6	Kennlinien-Arbeitsbereiche des Transistors als Schalter	217
<b>12.3</b>	<b>Das dynamische Verhalten</b>	<b>218</b>
12.3.1	Einschaltvorgang	218
12.3.2	Der Ausschaltvorgang	222
<b>12.4</b>	<b>Maßnahmen zur Verbesserung des Schaltverhaltens</b>	<b>226</b>
<b>12.5</b>	<b>Schaltverlustleistung</b>	<b>228</b>
<b>12.6</b>	<b>Transistorschalter bei ohmscher, kapazitiver und induktiver Last<sup>0</sup></b>	<b>230</b>
12.6.1	Ohmsche Last	230
12.6.2	Ohmisch-induktive Last	230
12.6.3	Ohmisch-kapazitive Last	232
<b>12.7</b>	<b>Transistor in digitalen Grundsaltungen</b>	<b>233</b>
<b>12.8</b>	<b>Übungsaufgaben zum Transistor als Schalter</b>	<b>237</b>
<b>13</b>	<b>DER FELDEFFEKTTRANSISTOR (FET)</b>	<b>243</b>
<b>13.1</b>	<b>Allgemeines / Grundprinzip</b>	<b>243</b>
<b>13.2</b>	<b>Sperrschicht-FET</b>	<b>243</b>
13.2.1	Aufbau und Wirkungsprinzip	243
13.2.2	Einfluss der Kanalspannung auf die Kennlinie	244
13.2.3	Steuerung über das Gate	246
13.2.4	Die Kennlinien des Sperrschicht-FET	247
<b>13.3</b>	<b>IG-FET (isolated gate)</b>	<b>248</b>
13.3.1	Anreicherungstyp	248
13.3.2	Verarmungstyp	252
13.3.3	Vorteile der IG-FET	252
<b>13.4</b>	<b>Übersicht über alle FET-Typen</b>	<b>253</b>
<b>13.5</b>	<b>Daten von Feldeffekt-Transistoren</b>	<b>254</b>
<b>13.6</b>	<b>FET als Analogschalter</b>	<b>255</b>
13.6.1	Ein- und Ausschaltbedingungen	255
13.6.2	Grundsaltung eines FET-Analogschalters	255
13.6.3	Verbesserter FET-Analogschalter	257
13.6.4	Gegentakt-FET-Analogschalter	258
<b>13.7</b>	<b>Arbeitspunkt-Einstellung - Konstantstromquelle (J-FET)</b>	<b>259</b>
<b>13.8</b>	<b>J-FET-Wechselspannungsverstärker in Source-Schaltung</b>	<b>261</b>
13.8.1	Schaltung des J-FET-WS-Verstärkers	261
13.8.2	Wechselstrom-Ersatzschaltbild des J-FET in Source-Schaltung	261
13.8.3	Berechnung des Wechselspannungsverstärkers	262
<b>13.9</b>	<b>CMOS-Technik</b>	<b>263</b>
13.9.1	CMOS-Inverter	263
13.9.2	CMOS-NOR-Gatter	263
13.9.3	CMOS-NAND-Gatter	264
13.9.4	CMOS-Übertragungsgatter	265
<b>13.10</b>	<b>Übungsaufgaben zum Feldeffekttransistor</b>	<b>266</b>

## Inhaltsverzeichnis

<b>14 DER UNIJUNCTION-TRANSISTOR (UIT)</b>	<b>272</b>
14.1 Aufbau	272
14.2 Funktionsweise	272
14.3 Anwendungen	273
14.3.1 Kippschwinger mit Unijunction-Transistor	273
14.3.2 Langzeitgeber	275
14.4 Übungsaufgaben zum Unijunction-Transistor	275
<b>15 AUFBAU UND FUNKTIONSWEISE EINES OPERATIONSVERSTÄRKERS</b>	<b>276</b>
15.1 Allgemeines	276
15.2 Interner Aufbau	276
15.2.1 Eingangsstufe	277
15.2.2 Koppelstufe	281
15.2.3 Ausgangsstufe	281
15.2.4 Gesamtschaltung des OP 741	284
15.3 Eigenschaften und Daten von Operationsverstärkern	285
15.4 Moderne Operationsverstärker-Typen	288
15.5 Übungsaufgaben zu Aufbau und Funktionsweise des Operationsverstärkers (VV-OP)	288
<b>16 OPERATIONSVERSTÄRKER - GRUNDSCHALTUNGEN</b>	<b>289</b>
16.1 Anwendungsbeispiele ohne Rückkopplung oder mit Mitkopplung	289
16.1.1 Komparator	289
16.1.2 Schmitt-Trigger	290
16.2 Niederfrequente Anwendungsbeispiele mit Gegenkopplung	292
16.2.1 Invertierender Verstärker	293
16.2.2 Nicht-invertierender Verstärker	294
16.2.3 Addition (mit Inversion )	295
16.2.4 Subtraktion (Differenzverstärker)	296
16.2.5 Integration	297
16.2.6 Differentiation	298
16.2.7 Tiefpass oder Verzögerungsglied 1. Ordnung	299
16.2.8 Hochpass	301
16.2.9 Bandpass	302
16.2.10 PI-Regler (Proportional-Integral-Regler)	303
16.3 Fehler-Rechnung	304
16.3.1 Fehler durch Eingangs-Offset-Spannung	304
16.3.2 Fehler durch Eingangsströme (Bias-Ströme)	305
16.3.3 Fehler durch Ungleichheit der Eingangsströme (Eingangs-Offsetstrom)	306
16.4 Stabilitätsprobleme – Frequenzgangkorrektur	307
16.4.1 Schwingneigung durch ungewollte Mitkopplung	307
16.4.2 Die Schleifenverstärkung	308
16.4.3 Frequenzgangkorrektur	309
16.4.4 Stabilität bei kapazitiver Last und beim Differenzierer	312
16.5 Übungsaufgaben zu Operationsverstärker-Grundsaltungen	313

## Inhaltsverzeichnis

<b>17</b>	<b>SPEZIELLE SCHALTUNGSBEISPIELE MIT OPERATIONSVERSTÄRKERN</b>	<b>319</b>
17.1	Instrumentenverstärker	319
17.2	Präzisionsgleichrichter	320
17.3	Logarithmieren	320
17.4	Delogarithmieren	321
17.5	Multiplizierer	322
17.6	NIC (Negativ Impedance Converter)	323
17.7	Gyrator	325
17.8	Abtast-Halte-Glieder (Sample & Hold – Verstärker)	326
17.9	Fensterkomparatoren	329
17.10	Frequenz-Spannungs- und Spannungs-Frequenz-Wandler	330
17.11	Digital-Analog- und Analog-Digital-Umsetzer	332
17.11.1	Digital-Analog-Umsetzer	332
17.11.2	Analog-Digital-Wandler	335
17.12	Übungsaufgaben Spezielle Operationsverstärker-Schaltungen	341
<b>18</b>	<b>MULTIVIBRATOREN, OSZILLATOREN, FUNKTIONSGENERATOREN</b>	<b>347</b>
18.1	Überblick	347
18.2	Multivibratoren	347
18.2.1	Bistabile Multivibratoren (Flip-Flops)	347
18.2.2	Monostabiler Multivibrator (Mono-Flop, Oneshot, Univibrator)	348
18.2.3	Astabiler Multivibrator (Rechteckgenerator)	348
18.3	Multivibratoren mit dem Timer 555	351
18.4	Dreieck- und Sägezahngeneratoren	354
18.4.1	Dreieckgenerator	354
18.4.2	Sägezahngenerator	354
18.5	Sinusgeneratoren	355
18.5.1	Phasenschieberszillatoren	355
18.5.2	Wien-Oszillatoren	357
18.5.3	Sinussignal durch Integration einer Rechteckspannung	359
18.6	Übungsaufgaben zu Multivibratoren, Oszillatoren, Funktionsgeneratoren	359
<b>19</b>	<b>MEHRSCICHT- UND LEISTUNGS-HALBLEITER-BAUELEMENTE</b>	<b>362</b>
19.1	Thyristor	362
19.1.1	Aufbau und Funktionsweise	362
19.1.2	Haupteinsatzgebiete	366
19.2	TRIAC	368
19.3	DIAC	369
19.4	Leistungs-MOS-FET (Kurzkanalstrukturen)	370
19.4.1	VMOS-FET	370
19.4.2	DMOS-FET	371
19.5	IGBT	372
19.6	Leistungshalbleiter-Bauelemente in Silizium-Karbid-Technologie	372
19.7	Übungsaufgaben zu Leistungs-Halbleiterbauelementen	373

## Inhaltsverzeichnis

<b>20</b>	<b>OPTOELEKTRONISCHE BAUELEMENTE</b>	<b>374</b>
20.1	Fotowiderstand (LDR)	374
20.2	Fotodiode	375
20.2.1	PN-Übergang unter Lichteinwirkung	375
20.2.2	Diodenbetrieb der Fotodiode	377
20.2.3	Foto-PIN-Diode	377
20.2.4	Schottky-Fotodiode	377
20.2.5	Foto-Lawinen-Diode (Avalanche-Fotodiode)	377
20.2.6	Elementbetrieb der Fotodiode	378
20.3	Solarzelle	379
20.4	Fototransistor	380
20.5	Lumineszenz-Dioden - LED	381
20.5.1	Funktionsweise	381
20.5.2	LED-Displays	382
20.5.3	Optokoppler (geschlossen)	383
20.5.4	Optokoppler-Lichtschranken	384
20.5.5	LED als Leuchtmittel – LED-Lampen	384
20.6	Laser-Dioden	385
20.7	Lichtwellenleiter	388
20.8	Flüssigkristall-Displays	391
20.9	Übungsaufgaben zu optoelektronischen Bauelementen	393
<b>21</b>	<b>WIDE-BANDGAP-HALBLEITER - HALBLEITER DER ZUKUNFT</b>	<b>394</b>
21.1	Allgemeine Eigenschaften von Wide-Bandgap-Halbleitern	394
21.2	Spezielle Eigenschaften von Siliziumkarbid-Bauelementen	396
21.3	Spezielle Eigenschaften von Galliumnitrid-Bauelementen	397
21.4	Wide Bandgap-Halbleiter in elektronischen Geräten und Systemen	398
21.5	Zukunftsentwicklungen	398
21.6	Übungsaufgaben zu Wide-Bandgap-Halbleitern	399
<b>22</b>	<b>HALBLEITERBAUELEMENTE OHNE PN-ÜBERGANG (HOMOGENE HALBLEITERBAUELEMENTE)</b>	<b>400</b>
22.1	Heißeiter (NTC-Widerstände)	400
22.2	Kaltleiter (PTC-Widerstände)	402
22.3	Varistoren (VDR)	403
22.4	Fotowiderstand (LDR)	404
22.5	Feldplatte (MDR)	404
22.6	Hallgenerator	405
22.7	Dehnungsmessstreifen	405
22.8	Übungsaufgaben zu homogenen Halbleitern	406

## Inhaltsverzeichnis

<b>23</b>	<b>GLEICHSPANNUNGSWANDLER</b>	<b>408</b>
23.1	Drossel-Aufwärtswandler	408
23.2	Drossel-Abwärtswandler	410
23.3	Drossel-Inverswandler	412
23.4	Einschwingvorgänge	413
23.5	Anwendungsbeschränkungen	413
23.6	Übungsaufgaben zu Schaltwandlern	415
<b>24</b>	<b>THERMISCHE PROBLEME / WÄRMEABLEITUNG</b>	<b>416</b>
24.1	Temperaturerhöhung von Bauelementen durch Wärmefreisetzung	416
24.1.1	Verlustwärme - Verlustleistung	416
24.1.2	Wärmekapazität	416
24.2	Wärmeableitung	417
24.2.1	Der Wärmewiderstand	417
24.2.2	Wärmewiderstand bei Wärmeleitung	417
24.2.3	Wärmewiderstand bei Konvektion	418
24.2.4	Wärmestrahlung	418
24.2.5	Kühlflächenberechnung	418
24.3	Der Wärmestromkreis	419
24.4	Berechnung des Wärmestromkreises	421
24.4.1	Analogie thermischer und elektrischer Größen	421
24.4.2	Berechnung von Temperaturen im stationären Betrieb	422
24.4.3	Reduzierung der zulässigen Verlustleistung bei hoher Umgebungstemperatur	422
24.4.4	Impulsärmewiderstand	423
24.4.5	Thermische Ausgleichsvorgänge	424
24.5	Übungsaufgaben zu thermischen Problemen	427
<b>ANHANG A</b>	<b>- SCHALTUNGSANALYSE</b>	<b>430</b>
A.1	Grundlagen der Zweipoltheorie	430
A.2	Einfache Zweipole	431
A.2.1	Passive Zweipole	431
A.2.2	Aktive Zweipole	431
A.3	Ersatzwiderstand passiver Bauelemente	433
A.3.1	Berechnung eines Ersatzwiderstandes bei linearen Elementen	433
A.3.2	Graphisches Verfahren bei nichtlinearen Elementen	433
A.3.3	Linearisierung von Kennlinien	434
A.4	Ersatzschaltungen aktiver Zweipole	436
A.4.1	Aktive Zweipole mit einer Quelle	436
A.4.2	Aktiver Zweipol mit mehreren Quellen	437
A.5	Zusammenschaltung aktiver und passiver Zweipole	438
A.5.1	Der lineare Grundstromkreis	438
A.5.2	Der nichtlineare Grundstromkreis - Graphisches Schnittpunktverfahren	438
A.5.3	Stromkreise mit bipolarem Transistor	444

## Inhaltsverzeichnis

<b>ANHANG B - VIERPOLTHEORIE</b>	<b>447</b>
B.1 Vierpolgleichungen - Vierpolparameter	447
B.1.1 Die Z-Parameter	449
B.1.2 Die $\underline{Y}$ -Parameter	449
B.1.3 Die H-Parameter (= Hybrid-Parameter)	450
B.2 Transistor als linearer Vierpol	451
B.2.1 Die h-Parameter des Transistors	451
B.2.2 Ermittlung der h-Parameter aus den Kennlinien des Transistors	453
B.2.3 h-Parameter in Datenblättern von NF-Transistoren	454
B.2.4 Umrechnung der h-Parameter der Emitterschaltung auf die Basisschaltung	455
B.2.5 Theoretisch ermittelte Näherungswerte der Vierpolparameter des Transistors	456
<b>ANHANG C - LÖSUNGEN DER ÜBUNGSAUFGABEN</b>	<b>458</b>
C.1 Halbleiterphysik (zu Abschnitt 1)	458
C.2 Physik des pn-Übergangs (zu Abschnitt 2)	462
C.3 Metall-Halbleiter-Übergängen (zu Abschnitt 3)	465
C.4 Dioden (zu Abschnitt 4)	466
C.5 Stabilisierungsschaltung mit Z-Diode (zu Abschnitt 5)	472
C.6 Netzgleichrichter (zu Abschnitt 6)	474
C.7 Drehstromgleichrichter (zu Abschnitt 7)	476
C.8 Spannungsvervielfachung (zu Abschnitt 8)	477
C.9 Aufbau und Funktionsweise des bipolaren Transistors (zu Abschnitt 9)	478
C.10 Gleichstrombetrieb des Transistors (zu Abschnitt 10)	481
C.11 Wechselspannungsverstärker mit bipolarem Transistor (zu Abschnitt 11)	487
C.12 Transistor als Schalter (zu Abschnitt 12)	492
C.13 Feldeffekttransistor (zu Abschnitt 13)	497
C.14 Unijunctiontransistor (zu Abschnitt 14)	504
C.15 Aufbau und Funktionsweise des Operationsverstärkers (zu Abschnitt 15)	505
C.16 Operationsverstärker-Grundsaltungen (zu Abschnitt 16)	505
C.17 Operationsverstärker-Schaltungen (zu Abschnitt 17)	513
C.18 Multivibratoren, Oszillatoren, Funktionsgeneratoren (zu Abschnitt 18)	517
C.19 Leistungs-Halbleiterbauelementen (zu Abschnitt 19)	519
C.20 Optoelektrische Bauelemente (zu Abschnitt 20)	520
C.21 Wide-Bandgap-Halbleiter (zu Abschnitt 21)	521
C.22 Homogene Bauelemente (zu Abschnitt 22)	521
C.23 Gleichspannungswandler (zu Abschnitt 23)	522
C.24 Thermische Probleme (zu Abschnitt 24)	523
<b>ANHANG D - VERWENDETE GRÖßENSYMBOLE</b>	<b>526</b>
<b>LITERATURHINWEISE</b>	<b>532</b>
<b>STICHWORTVERZEICHNIS</b>	<b>533</b>