

**Stefan Goßner**

# **Grundlagen der Elektronik**

Halbleiter, Bauelemente und Schaltungen

10. ergänzte Auflage

**Stefan Goßner**

# **Grundlagen der Elektronik**

Halbleiter, Bauelemente und Schaltungen

10. ergänzte Auflage

Shaker Verlag  
Aachen 2018

**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 2018

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

Printed in Germany.

ISBN 978-3-8265-8825-9

ISSN 1436-3801

Shaker Verlag GmbH • Postfach 101818 • 52018 Aachen

Telefon: 02407 / 95 96 - 0 • Telefax: 02407 / 95 96 - 9

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

# Vorwort

Dieses Buch behandelt Themen der Halbleiterelektronik. Es ist hervorgegangen aus einem Skript zu meiner Vorlesung *Grundlagen der Elektronik* für Studentinnen und Studenten der Fachrichtungen Elektrotechnik/Elektronik sowie Technische Informatik an der Beuth-Hochschule für Technik (früher Technische Fachhochschule) Berlin und der Hochschule München. Inzwischen ist es so erweitert worden, dass es auch Studenten an Universitäten den Einstieg in das komplexe Gebiet der Elektronik eröffnen und dem Ingenieur in der Praxis zur Auffrischung seines Wissens über die Elektronik-Grundlagen dienen kann.

Die Themen *Halbleiterphysik*, *pn-Übergang* und *Metall-Halbleiter-Übergänge* stehen am Anfang des Buches. 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 anwendungsbezogenem Wissen über die Funktionsweise und den Einsatz analoger Halbleiterbauelemente, wie z.B. Dioden, Transistoren, Leistungshalbleiter, optoelektronische Bauelemente, Operationsverstärker und deren Schaltungstechnik gewidmet.

Zahlreiche Abbildungen machen die oftmals komplexe Materie anschaulicher.

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 nutzen und die Plausibilität ihrer Ergebnisse beurteilen können.

Aus diesem Grunde wird in diesem Buch dem mit traditionellen Mitteln durchgeführten Entwurf, der Dimensionierung sowie der rechnerischen und grafischen Analyse elektronischer Grundschaltungen großes Gewicht beigemessen. Bei der Berechnung von Schaltungen wird jeweils versucht, die Herleitung der Gleichungen zur Ermittlung der wesentlichen Schaltungseigenschaften aufzuzeigen. Auf diese Weise soll der Leser in die Lage versetzt werden, in ähnlichen Fällen selbständig die entsprechenden Berechnungen vorzunehmen. Da die Berechnungen der meisten Schaltungen ohne fundierte Kenntnisse der Methoden der Schaltungsanalyse nicht nachvollziehbar sind, werden die für diese Berechnungen notwendigen Analyseformen in einem Anhang dargestellt.

Ohne eigenes Nachvollziehen bleibt jede Theorie grau. Aus diesem Grunde sind jedem Kapitel Übungsaufgaben nachgestellt, deren Lösungen sich in einem weiteren Anhang finden.

Während der Erstellung dieses Buches 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. Korrekturen bekannter Fehler veröffentliche ich im Internet unter [www.prof-gossner.de](http://www.prof-gossner.de).

Neufahrn, im Februar 2018

Prof. Stefan Goßner



# Inhaltsverzeichnis

<b>1</b>	<b>EINFÜHRUNG IN DIE PHYSIK DER HALBLEITER</b>	<b>1</b>
1.1	Einordnung der Halbleiter zwischen Leitern und Isolatoren	1
1.2	Aufbau von Leitern und Halbleitern	1
1.2.1	Aufbau der Atome	1
1.2.2	Kristallaufbau	3
1.3	Leitungsmechanismen in Halbleitern	5
1.3.1	Eigenleitung (Leitungsmechanismen im reinen Halbleiter)	5
1.3.2	Störstellenleitung	7
1.3.3	Ladungsträgerkonzentrationen im dotierten Halbleiter	10
1.3.4	Massenwirkungsgesetz	12
1.3.5	Leitfähigkeit des Halbleiters	12
1.3.6	Erklärung der Leitungsmechanismen im Halbleiter mit Energie-Modellen	13
1.3.7	Energie-Verteilung der freien Elektronen und der Löcher	15
1.3.8	Temperaturabhängigkeit von Halbleiterdaten	19
1.4	Übungsaufgaben zur Physik der Halbleiter	19
<b>2</b>	<b>DER PN-ÜBERGANG</b>	<b>21</b>
2.1	Der pn-Übergang ohne äußere Spannung	21
2.1.1	Der ideale abrupte pn-Übergang	21
2.1.2	Ladungsträgerdiffusion - Bildung einer Raumladungszone	21
2.1.3	Ladungsträgerdichte	22
2.1.4	Raumladungsdichte	22
2.1.5	Diffusionsspannung	23
2.1.6	Sperrschichtweite	24
2.1.7	Sperrschichtkapazität	24
2.1.8	Energiebänder-Modell des pn-Überganges	24
2.2	Der pn-Übergang mit äußerer Spannung	25
2.2.1	Sperrpolung	25
2.2.2	Flusspolung	27
2.2.3	Durchbruch bei hoher Feldstärke in Sperrpolung	29
2.2.4	Gesamtkennlinie des pn-Überganges	31
2.2.5	Temperaturabhängigkeit der Kennlinie	32
2.2.6	Schaltverhalten des pn-Überganges	32
2.3	Übungsaufgaben zum pn-Übergang	36
<b>3</b>	<b>METALL-HALBLEITER-ÜBERGÄNGE</b>	<b>39</b>
3.1	Schottky-Kontakt (Sperrschicht-Kontakt)	40
3.1.1	Übergang von n-Halbleiter zu Metall mit größerer Austrittsarbeit ( $W_M > W_H$ )	40
3.1.2	Übergang von p-Halbleiter zu Metall mit geringerer Austrittsarbeit ( $W_M < W_H$ )	42
3.1.3	Eigenschaften des Schottky-Kontakts	44
3.2	Ohmscher Kontakt	45
3.2.1	Übergang von n-Halbleiter zu Metall mit kleinerer Austrittsarbeit ( $W_M < W_H$ )	45
3.2.2	Übergang von p-Halbleiter zu Metall mit größerer Austrittsarbeit ( $W_M > W_H$ )	46
3.2.3	Ohmscher Kontakt durch hochdotierte Halbleiterzwichenschicht	48
3.3	Übungsaufgaben zu Metall-Halbleiter-Übergängen	49

## Inhaltsverzeichnis

<b>4</b>	<b>DIE DIODE</b>	<b>50</b>
4.1	Allgemeines	50
4.2	Diodentypen	53
4.2.1	Universal- und Richtdiode	53
4.2.2	PIN-Dioden	54
4.2.3	Schaltdioden	55
4.2.4	Die Z-Diode	56
4.2.5	Kapazitätsdiode	57
4.2.6	Tunnel diode	58
4.2.7	Backward-Diode	59
4.2.8	Schottky-Diode	59
4.2.9	Weitere Diodenformen	60
4.3	Übungsaufgaben zu Dioden	61
<b>5</b>	<b>STABILISIERUNGSSCHALTUNG MIT Z-DIODE</b>	<b>66</b>
5.1	Grundschaltung	66
5.1.1	Graphische Schaltungsanalyse	66
5.1.2	Rechnerische Schaltungsanalyse (Betrieb mit Gleichspannung)	69
5.2	Berechnung von Grenzwerten	71
5.2.1	Zulässiger Arbeitsbereich der Z-Diode	71
5.2.2	Grenzwerte für die Einzelbauelemente	72
5.3	Genauere Betrachtung des differentiellen Widerstandes	76
5.4	Überlagerung von Gleich- und Wechselspannung	77
5.4.1	Wechselanteil der stabilisierten Gleichspannung	77
5.4.2	Verlustleistung der Z-Diode	78
5.5	Übungsaufgaben zur Stabilisierungsschaltung mit Z-Diode	79
<b>6</b>	<b>NETZGLEICHRICHTER</b>	<b>80</b>
6.1	Gleichrichterschaltungen ohne Glättung (mit ohmscher Last)	80
6.1.1	Einweggleichrichter	80
6.1.2	Zweiweggleichrichter - Mittelpunktschaltung	82
6.1.3	Zweiweggleichrichter - Brückengleichrichter (Graetz-Gleichrichter)	84
6.1.4	Genauere Berechnung der Zweiweggleichrichter	85
6.2	Gleichrichterschaltungen mit Glättung	87
6.2.1	Glättungsarten	88
6.2.2	Berechnung des Zweiweggleichrichters mit Glättungskondensator	89
6.2.3	Zusätzliche Glättung mit Sieb-Gliedern	97
6.3	Gleichrichter mit Pufferbatterie	98
6.4	Kondensatornetzteil	99
6.5	Übungsaufgaben zu Netzgleichrichtern	102
<b>7</b>	<b>DREHSTROMGLEICHRICHTER</b>	<b>105</b>
7.1	Mittelpunkt-Schaltung (Halbbrücke) (3-pulsiger Gleichrichter)	105
7.2	Drehstrom-Brückengleichrichter (6-pulsiger Gleichrichter)	107
7.3	Übungsaufgaben zu Drehstromgleichrichtern	110

## Inhaltsverzeichnis

<b>8</b>	<b>SPANNUNGSVERVIELFACHUNG</b>	<b>112</b>
8.1	Spannungsverdoppelung mit der Delonschaltung	112
8.2	Spannungsverdoppelung mit Villardschaltung	113
8.3	Spannungsvervielfachung durch Kaskadierung der Villardschaltung	115
8.4	Übungsaufgaben zur Spannungsvervielfachung	116
<b>9</b>	<b>DER BIPOLARE TRANSISTOR</b>	<b>117</b>
9.1	Aufbau und Herstellungsverfahren	117
9.2	Funktionsweise	119
9.2.1	Der Transistoreffekt	119
9.2.2	Strömungsmechanismen im Transistor	122
9.2.3	Einfluss der Kollektor-Basis-Spannung auf den Kollektorstrom	123
9.3	Schaltzeichen - Richtungspfeile für Ströme und Spannungen	124
9.4	Transistor-Grundsaltungen	124
9.4.1	Basisschaltung	124
9.4.2	Emitterschaltung	126
9.4.3	Kollektorschaltung	129
9.4.4	Umrechnung der Stromverstärkungen	130
9.5	Darlington- oder Super-Beta-Schaltung	130
9.6	Grenzwerte - Sicherer Arbeitsbereich – Safe Operating Area (SOA)	131
9.7	Inverser Betrieb des Transistors	134
9.8	Das Ebers-Moll-Modell	134
9.9	Daten von Transistoren	136
9.10	Übungsaufgaben zu Aufbau und Funktionsweise des bipolaren Transistors	136
<b>10</b>	<b>ARBEITSPUNKT DES BIPOLAREN TRANSISTORS / GLEICHSTROMBETRIEB</b>	<b>138</b>
10.1	Einstellung des Arbeitspunktes	138
10.1.1	Einprägung des Basisstromes	139
10.1.2	Einprägung der Basis-Emitter-Spannung	139
10.1.3	Einstellung der Kollektor-Emitter-Spannung	140
10.2	Stabilisierung des Arbeitspunktes	140
10.2.1	Anforderungen an die Stabilität des Arbeitspunktes	140
10.2.2	Ursachen für Arbeitspunkt-Verschiebungen	140
10.2.3	Gegenkopplungsmaßnahmen zur Arbeitspunkt-Stabilisierung	141
10.2.4	Demonstration der Temperaturabhängigkeit und der Stabilisierung des Arbeitspunktes	143
10.2.5	Verfahren zur Berechnung von Abweichungen des Arbeitspunktes	145
10.2.6	Berechnung von Abweichungen des Arbeitspunktes einer gegebenen Schaltung	146
10.2.7	Stabilisierung des Arbeitspunktes bei der Schaltungsdimensionierung	148
10.3	Dimensionierung einer Transistorschaltung und grafische Analyse des Arbeitspunktes	150
10.3.1	Dimensionierung der Schaltung	150
10.3.2	Grafische Analyse des Arbeitspunktes	152
10.4	Beispielschaltungen	154
10.4.1	Konstantspannungsquelle	154

## Inhaltsverzeichnis

10.4.2	Einfache Konstantstromquelle	155
10.4.3	Einfacher Stromspiegel (Konstantstromquelle)	156
10.4.4	Wilson-Stromspiegel	158
<b>10.5</b>	<b>Gegenkopplung bei mehrstufigen Transistorverstärkern</b>	<b>158</b>
<b>10.6</b>	<b>Übungsaufgaben zum Gleichstrombetrieb des Transistors</b>	<b>160</b>
<b>11</b>	<b>DER BIPOLARE TRANSISTOR IM WECHSELSPANNUNGSVERSTÄRKER</b>	<b>164</b>
<b>11.1</b>	<b>Grundschaltung eines Wechselspannungsverstärkers in Emitterschaltung</b>	<b>164</b>
11.1.1	Prinzipieller Aufbau und Funktion	164
11.1.2	Analyse des Arbeitspunktes	165
11.1.3	Wechselstromanalyse	165
11.1.4	Verzerrungen und Begrenzungen des Ausgangssignals (Aussteuerungsgrenzen)	166
11.1.5	Technische Realisierung	168
<b>11.2</b>	<b>RC-gekoppelter Wechselspannungsverstärker in Emitterschaltung</b>	<b>169</b>
11.2.1	Grafische Analyse des Wechselstrom-Verhaltens	169
11.2.2	Berechnung der Wechselstromgrößen	173
11.2.3	Wechselspannungsverstärkung bei Stromgegenkopplung	175
11.2.4	Berechnung der Kondensatoren	178
11.2.5	Grenzfrequenzen	181
11.2.6	Frequenzgang des Transistors	182
<b>11.3</b>	<b>RC-gekoppelter Wechselspannungsverstärker in Basisschaltung</b>	<b>184</b>
11.3.1	Die Schaltung	184
11.3.2	Berechnung der Wechselstrom-Kenngrößen	184
11.3.3	Obere Grenzfrequenz der Basisschaltung	185
<b>11.4</b>	<b>RC-gekoppelter Wechselspannungsverstärker in Kollektorschaltung</b>	<b>186</b>
11.4.1	Stromlaufplan und Daten	186
11.4.2	Wechselstrom-Berechnungen	187
11.4.3	Bootstrapschaltung	190
<b>11.5</b>	<b>Vergleich der Transistor-Grundschaltungen</b>	<b>192</b>
<b>11.6</b>	<b>Lage des Arbeitspunktes im Kennlinienfeld</b>	<b>193</b>
11.6.1	Klein- und Mittelsignalverstärker	194
11.6.2	Leistungsverstärker - Transistorendstufen	194
<b>11.7</b>	<b>Übungsaufgaben zum Wechselspannungsverstärker mit bipolarem Transistor</b>	<b>196</b>
<b>12</b>	<b>DER BIPOLARE TRANSISTOR ALS SCHALTER</b>	<b>201</b>
<b>12.1</b>	<b>Der ideale Schalter (zum Vergleich)</b>	<b>201</b>
<b>12.2</b>	<b>Die Betriebszustände des Transistor-Schalters</b>	<b>203</b>
12.2.1	Ausgewählte Details aus der Halbleiter- und Transistorphysik	203
12.2.2	Prinzipielle Ansteuerungsvarianten	204
12.2.3	Der gesperrte Transistor	205
12.2.4	Der leitende Transistor (ungesättigt, $U_{CB} > 0$ )	206
12.2.5	Der leitende Transistor (gesättigt)	209
12.2.6	Kennlinien-Arbeitsbereiche des Transistors als Schalter	211
<b>12.3</b>	<b>Das dynamische Verhalten</b>	<b>212</b>
12.3.1	Einschaltvorgang	212

## Inhaltsverzeichnis

12.3.2	Der Ausschaltvorgang	215
<b>12.4</b>	<b>Maßnahmen zur Verbesserung des Schaltverhaltens</b>	<b>220</b>
<b>12.5</b>	<b>Schaltverlustleistung</b>	<b>222</b>
<b>12.6</b>	<b>Transistorschalter bei ohmscher, kapazitiver und induktiver Last</b>	<b>224</b>
12.6.1	Ohmsche Last	224
12.6.2	Ohmisch-induktive Last	224
12.6.3	Ohmisch-kapazitive Last	226
<b>12.7</b>	<b>Transistor in digitalen Grundsaltungen</b>	<b>227</b>
<b>12.8</b>	<b>Übungsaufgaben zum Transistor als Schalter</b>	<b>231</b>
<b>13</b>	<b>DER FELDEFFEKTTRANSISTOR (FET)</b>	<b>237</b>
<b>13.1</b>	<b>Allgemeines / Grundprinzip</b>	<b>237</b>
<b>13.2</b>	<b>Sperrschicht-FET</b>	<b>237</b>
13.2.1	Aufbau und Wirkungsprinzip	237
13.2.2	Einfluss der Kanalspannung auf die Kennlinie	238
13.2.3	Steuerung über das Gate	240
13.2.4	Die Kennlinien des Sperrschicht-FET	241
<b>13.3</b>	<b>IG-FET (isolated gate)</b>	<b>242</b>
13.3.1	Anreicherungstyp	242
13.3.2	Verarmungstyp	246
13.3.3	Vorteile der IG-FET	246
<b>13.4</b>	<b>Übersicht über alle FET-Typen</b>	<b>247</b>
<b>13.5</b>	<b>Daten von Feldeffekt-Transistoren</b>	<b>248</b>
<b>13.6</b>	<b>FET als Analogschalter</b>	<b>249</b>
13.6.1	Ein- und Ausschaltbedingungen	249
13.6.2	Grundsaltung eines FET-Analogschalters	249
13.6.3	Verbesserter FET-Analogschalter	251
13.6.4	Gegentakt-FET-Analogschalter	252
<b>13.7</b>	<b>Arbeitspunkt-Einstellung - Konstantstromquelle (J-FET)</b>	<b>253</b>
<b>13.8</b>	<b>J-FET-Wechselspannungsverstärker in Source-Schaltung</b>	<b>255</b>
13.8.1	Schaltung des J-FET-WS-Verstärkers	255
13.8.2	Wechselstrom-Ersatzschaltbild des J-FET in Source-Schaltung	255
13.8.3	Berechnung des Wechselspannungsverstärkers	256
<b>13.9</b>	<b>CMOS-Technik</b>	<b>257</b>
13.9.1	CMOS-Inverter	257
13.9.2	CMOS-NOR-Gatter	257
13.9.3	CMOS-NAND-Gatter	258
13.9.4	CMOS-Übertragungsgatter	259
<b>13.10</b>	<b>Übungsaufgaben zum Feldeffekttransistor</b>	<b>260</b>
<b>14</b>	<b>DER UNIJUNCTION-TRANSISTOR</b>	<b>266</b>
<b>14.1</b>	<b>Aufbau</b>	<b>266</b>
<b>14.2</b>	<b>Funktionsweise</b>	<b>266</b>
<b>14.3</b>	<b>Anwendungen</b>	<b>267</b>
14.3.1	Kippschwinger mit Unijunction-Transistor (UIT)	268

## **Inhaltsverzeichnis**

14.3.2	Langzeitgeber	269
<b>14.4</b>	<b>Aufgaben zum Unijunction-Transistor</b>	<b>269</b>
<b>15</b>	<b>AUFBAU UND FUNKTIONSWEISE EINES OPERATIONSVERSTÄRKERS</b>	<b>270</b>
<b>15.1</b>	<b>Allgemeines</b>	<b>270</b>
<b>15.2</b>	<b>Interner Aufbau</b>	<b>270</b>
15.2.1	Eingangsstufe	271
15.2.2	Koppelstufe	275
15.2.3	Ausgangsstufe	275
15.2.4	Gesamtschaltung des OP 741	278
<b>15.3</b>	<b>Eigenschaften und Daten von Operationsverstärkern</b>	<b>279</b>
<b>15.4</b>	<b>Moderne Operationsverstärker-Typen</b>	<b>282</b>
<b>15.5</b>	<b>Übungsaufgaben zu Aufbau und Funktionsweise des Operationsverstärkers (VV-OP)</b>	<b>282</b>
<b>16</b>	<b>OPERATIONSVERSTÄRKER - GRUNDSCHALTUNGEN</b>	<b>283</b>
<b>16.1</b>	<b>Anwendungsbeispiele ohne Rückkopplung oder mit Mitkopplung</b>	<b>283</b>
16.1.1	Komparator	283
16.1.2	Schmitt-Trigger	284
<b>16.2</b>	<b>Niederfrequente Anwendungsbeispiele mit Gegenkopplung</b>	<b>286</b>
16.2.1	Invertierender Verstärker	287
16.2.2	Nicht-invertierender Verstärker	288
16.2.3	Addition (mit Inversion )	289
16.2.4	Subtraktion (Differenzverstärker)	290
16.2.5	Integration	291
16.2.6	Differentiation	292
16.2.7	Tiefpass oder Verzögerungsglied 1. Ordnung	293
16.2.8	Hochpass	295
16.2.9	Bandpass	296
16.2.10	PI-Regler (Proportional-Integral-Regler)	297
<b>16.3</b>	<b>Fehler-Rechnung</b>	<b>298</b>
16.3.1	Fehler durch Eingangs-Offset-Spannung	298
16.3.2	Fehler durch Eingangsströme (Bias-Ströme)	299
16.3.3	Fehler durch Ungleichheit der Eingangsströme (Eingangs-Offsetstrom)	300
<b>16.4</b>	<b>Stabilitätsprobleme – Frequenzgangkorrektur</b>	<b>301</b>
16.4.1	Schwingneigung durch ungewollte Mitkopplung	301
16.4.2	Die Schleifenverstärkung	302
16.4.3	Frequenzgangkorrektur	303
16.4.4	Stabilität bei kapazitiver Last und beim Differenzierer	306
<b>16.5</b>	<b>Übungsaufgaben zu Operationsverstärker-Grundsaltungen</b>	<b>307</b>
<b>17</b>	<b>SPEZIELLE SCHALTUNGSBEISPIELE MIT OPERATIONSVERSTÄRKERN</b>	<b>313</b>
<b>17.1</b>	<b>Instrumentenverstärker</b>	<b>313</b>
<b>17.2</b>	<b>Präzisionsgleichrichter</b>	<b>314</b>

## **Inhaltsverzeichnis**

<b>17.3</b>	<b>Logarithmieren</b>	<b>314</b>
<b>17.4</b>	<b>Delogarithmieren</b>	<b>315</b>
<b>17.5</b>	<b>Multiplizierer</b>	<b>316</b>
<b>17.6</b>	<b>NIC (Negativ Impedance Converter)</b>	<b>317</b>
<b>17.7</b>	<b>Gyrator</b>	<b>319</b>
<b>17.8</b>	<b>Abtast-Halte-Glieder (Sample &amp; Hold – Verstärker)</b>	<b>320</b>
<b>17.9</b>	<b>Fensterkomparatoren</b>	<b>323</b>
<b>17.10</b>	<b>Frequenz-Spannungs- und Spannungs-Frequenz-Wandler</b>	<b>324</b>
<b>17.11</b>	<b>Digital-Analog- und Analog-Digital-Umsetzer</b>	<b>326</b>
17.11.1	Digital-Analog-Umsetzer	326
17.11.2	Analog-Digital-Wandler	329
<b>17.12</b>	<b>Übungsaufgaben Spezielle Operationsverstärker-Schaltungen</b>	<b>335</b>
<b>18</b>	<b>MULTIVIBRATOREN, OSZILLATOREN, FUNKTIONSGENERATOREN</b>	<b>341</b>
<b>18.1</b>	<b>Überblick</b>	<b>341</b>
<b>18.2</b>	<b>Multivibratoren</b>	<b>341</b>
18.2.1	Bistabile Multivibratoren (Flip-Flops)	341
18.2.2	Monostabiler Multivibrator (Mono-Flop, Oneshot, Univibrator)	342
18.2.3	Astabiler Multivibrator (Rechteckgenerator)	342
<b>18.3</b>	<b>Multivibratoren mit dem Timer 555</b>	<b>345</b>
<b>18.4</b>	<b>Dreieck- und Sägezahngeneratoren</b>	<b>348</b>
18.4.1	Dreieckgenerator	348
18.4.2	Sägezahngenerator	348
<b>18.5</b>	<b>Sinusgeneratoren</b>	<b>349</b>
18.5.1	Phasenschieberschwingkreise	349
18.5.2	Wien-Oszillatoren	351
18.5.3	Sinussignal durch Integration einer Rechteckspannung	353
<b>18.6</b>	<b>Übungsaufgaben zu Multivibratoren, Oszillatoren, Funktionsgeneratoren</b>	<b>353</b>
<b>19</b>	<b>MEHRSCHICHT- UND LEISTUNGS-HALBLEITER- BAUELEMENTE</b>	<b>356</b>
<b>19.1</b>	<b>Thyristor</b>	<b>356</b>
19.1.1	Aufbau und Funktionsweise	356
19.1.2	Haupteinsatzgebiete	360
<b>19.2</b>	<b>TRIAC</b>	<b>362</b>
<b>19.3</b>	<b>DIAC</b>	<b>363</b>
<b>19.4</b>	<b>Leistungs-MOS-FET (Kurzkanalstrukturen)</b>	<b>364</b>
19.4.1	VMOS-FET	364
19.4.2	DMOS-FET	365
<b>19.5</b>	<b>IGBT</b>	<b>366</b>
<b>19.6</b>	<b>Übungsaufgaben zu Leistungs-Halbleiterbauelementen</b>	<b>367</b>

## Inhaltsverzeichnis

<b>20</b>	<b>OPTOELEKTRONISCHE BAUELEMENTE</b>	<b>368</b>
20.1	Fotowiderstand (LDR)	368
20.2	Fotodiode	369
20.2.1	PN-Übergang unter Lichteinwirkung	369
20.2.2	Diodenbetrieb der Fotodiode	370
20.2.3	Foto-PIN-Diode	371
20.2.4	Schottky-Fotodiode	371
20.2.5	Foto-Lawinen-Diode (Avalanche-Fotodiode)	371
20.2.6	Elementbetrieb der Fotodiode	372
20.3	Solarzelle	373
20.4	Fototransistor	374
20.5	Lumineszenz-Dioden	375
20.6	Displays	376
20.6.1	LED-Displays	376
20.6.2	Flüssigkristall-Displays	377
20.7	Optoelektronische Koppler	378
20.7.1	Optokoppler (geschlossen)	378
20.7.2	Optokoppler-Lichtschranken	379
20.8	Laser-Dioden	380
20.9	Lichtwellenleiter	383
20.10	Übungsaufgaben zu optoelektronischen Bauelementen	386
<b>21</b>	<b>HALBLEITERBAUELEMENTE OHNE PN-ÜBERGANG (HOMOGENE HALBLEITERBAUELEMENTE)</b>	<b>387</b>
21.1	Heißeiter (NTC-Widerstände)	387
21.2	Kaltleiter (PTC-Widerstände)	389
21.3	Varistoren (VDR)	390
21.4	Fotowiderstand (LDR)	391
21.5	Feldplatte (MDR)	391
21.6	Hallgenerator	392
21.7	Dehnungsmessstreifen	392
21.8	Übungsaufgaben zu homogenen Halbleitern	393
<b>22</b>	<b>GLEICHSPANNUNGSWANDLER</b>	<b>395</b>
22.1	Drossel-Aufwärtswandler	395
22.2	Drossel-Abwärtswandler	397
22.3	Drossel-Inverswandler	399
22.4	Einschwingvorgänge	400
22.5	Anwendungsbeschränkungen	400
22.6	Übungsaufgaben zu Schaltwandlern	402
<b>23</b>	<b>THERMISCHE PROBLEME / WÄRMEABLEITUNG</b>	<b>403</b>
23.1	Temperaturerhöhung von Bauelementen durch Wärmefreisetzung	403

## Inhaltsverzeichnis

23.1.1	Verlustwärme - Verlustleistung	403
23.1.2	Wärmekapazität	403
<b>23.2</b>	<b>Wärmeableitung</b>	<b>404</b>
23.2.1	Der Wärmewiderstand	404
23.2.2	Wärmewiderstand bei Wärmeleitung	404
23.2.3	Wärmewiderstand bei Konvektion	405
23.2.4	Wärmestrahlung	405
23.2.5	Kühlflächenberechnung	405
<b>23.3</b>	<b>Der Wärmestromkreis</b>	<b>406</b>
<b>23.4</b>	<b>Berechnung des Wärmestromkreises</b>	<b>408</b>
23.4.1	Analogie thermischer und elektrischer Größen	408
23.4.2	Berechnung von Temperaturen im stationären Betrieb	409
23.4.3	Reduzierung der zulässigen Verlustleistung bei hoher Umgebungstemperatur	409
23.4.4	Impulsärmewiderstand	410
23.4.5	Thermische Ausgleichsvorgänge	411
<b>23.5</b>	<b>Übungsaufgaben zu thermischen Problemen</b>	<b>414</b>
<b>ANHANG A - SCHALTUNGSANALYSE</b>		<b>417</b>
<b>A.1</b>	<b>Grundlagen der Zweipoltheorie</b>	<b>417</b>
<b>A.2</b>	<b>Einfache Zweipole</b>	<b>418</b>
A.2.1	Passive Zweipole	418
A.2.2	Aktive Zweipole	418
<b>A.3</b>	<b>Ersatzwiderstand passiver Bauelemente</b>	<b>420</b>
A.3.1	Berechnung eines Ersatzwiderstandes bei linearen Elementen	420
A.3.2	Graphisches Verfahren bei nichtlinearen Elementen	420
A.3.3	Linearisierung von Kennlinien	421
<b>A.4</b>	<b>Ersatzschaltungen aktiver Zweipole</b>	<b>423</b>
A.4.1	Aktive Zweipole mit einer Quelle	423
A.4.2	Aktiver Zweipol mit mehreren Quellen	424
<b>A.5</b>	<b>Zusammenschaltung aktiver und passiver Zweipole</b>	<b>425</b>
A.5.1	Der lineare Grundstromkreis	425
A.5.2	Der nichtlineare Grundstromkreis - Graphisches Schnittpunktverfahren	425
A.5.3	Stromkreise mit bipolarem Transistor	431
<b>ANHANG B - VIERPOLTHEORIE</b>		<b>434</b>
<b>B.1</b>	<b>Vierpolgleichungen - Vierpolparameter</b>	<b>434</b>
B.1.1	Die $\underline{Z}$ -Parameter	436
B.1.2	Die $\underline{Y}$ -Parameter	436
B.1.3	Die H-Parameter (= Hybrid-Parameter)	437
<b>B.2</b>	<b>Transistor als linearer Vierpol</b>	<b>438</b>
B.2.1	Die h-Parameter des Transistors	438
B.2.2	Ermittlung der h-Parameter aus den Kennlinien des Transistors	440
B.2.3	h-Parameter in Datenblättern von NF-Transistoren	441
B.2.4	Umrechnung der h-Parameter der Emitterschaltung auf die Basisschaltung	442
B.2.5	Theoretisch ermittelte Näherungswerte der Vierpolparameter des Transistors	443

## Inhaltsverzeichnis

<b>ANHANG C - LÖSUNGEN DER ÜBUNGSAUFGABEN</b>	<b>445</b>
C.1 Halbleiterphysik (zu Abschnitt 1)	445
C.2 Physik des pn-Übergangs (zu Abschnitt 2)	449
C.3 Metall-Halbleiter-Übergängen (zu Abschnitt 3)	452
C.4 Dioden (zu Abschnitt 4)	453
C.5 Stabilisierungsschaltung mit Z-Diode (zu Abschnitt 5)	459
C.6 Netzgleichrichter (zu Abschnitt 6)	461
C.7 Drehstromgleichrichter (zu Abschnitt 7)	463
C.8 Spannungsvervielfachung (zu Abschnitt 8)	464
C.9 Aufbau und Funktionsweise des bipolaren Transistors (zu Abschnitt 9)	465
C.10 Gleichstrombetrieb des Transistors (zu Abschnitt 10)	467
C.11 Wechselspannungsverstärker mit bipolarem Transistor (zu Abschnitt 11)	473
C.12 Transistor als Schalter (zu Abschnitt 12)	479
C.13 Feldeffekttransistor (zu Abschnitt 13)	484
C.14 Unijunctiontransistor (zu Abschnitt 14)	491
C.15 Aufbau und Funktionsweise des Operationsverstärkers (zu Abschnitt 15)	492
C.16 Operationsverstärker-Grundsaltungen (zu Abschnitt 16)	492
C.17 Operationsverstärker-Schaltungen (zu Abschnitt 17)	500
C.18 Multivibratoren, Oszillatoren, Funktionsgeneratoren (zu Abschnitt 18)	505
C.19 Leistungs-Halbleiterbauelementen (zu Abschnitt 19)	507
C.20 Optoelektrische Bauelemente (zu Abschnitt 20)	508
C.21 Homogene Bauelemente (zu Abschnitt 21)	509
C.22 Gleichspannungswandler (zu Abschnitt 22)	510
C.23 Thermische Probleme (zu Abschnitt 23)	511
<b>ANHANG D - VERWENDETE GRÖßENSYMBOLE</b>	<b>513</b>
<b>LITERATURHINWEISE</b>	<b>519</b>
<b>STICHWORTVERZEICHNIS</b>	<b>520</b>