

Springer-Lehrbuch

# Einführung in die Halbleiter-Schaltungstechnik

von  
Holger Göbel

2012

Einführung in die Halbleiter-Schaltungstechnik – Göbel

schnell und portofrei erhältlich bei [beck-shop.de](http://beck-shop.de) DIE FACHBUCHHANDLUNG

Thematische Gliederung:

Bauelemente, Schaltkreise – Bauelemente, Schaltkreise

Springer 2011

Verlag C.H. Beck im Internet:

[www.beck.de](http://www.beck.de)

ISBN 978 3 642 20886 7

---

# Inhaltsverzeichnis

Liste der verwendeten Symbole .....	1
<b>1 Grundlagen der Halbleiterphysik .....</b>	<b>7</b>
1.1 Grundlegende Begriffe .....	7
1.1.1 Das Bändermodell .....	7
1.1.2 Silizium als Halbleiter .....	9
1.1.3 Das thermodynamische Gleichgewicht .....	11
1.1.4 Dotierte Halbleiter .....	13
1.2 Grundgleichungen der Halbleiterphysik .....	18
1.2.1 Berechnung der Ladungsträgerdichten .....	18
1.2.2 Bestimmung der Lage des Ferminiveaus .....	25
1.3 Ladungsträgertransport, Strom .....	28
1.3.1 Elektronen- und Löcherstrom .....	28
1.3.2 Driftstrom .....	28
1.3.3 Diffusionsstrom .....	30
1.3.4 Bänderdiagramm bei Stromfluss .....	31
1.4 Ausgleichsvorgänge im Halbleiter .....	33
1.4.1 Starke und schwache Injektion .....	33
1.4.2 Die Kontinuitätsgleichung .....	35
1.4.3 Temporäre Störung des Gleichgewichts .....	36
1.4.4 Lokale Störung des Gleichgewichts .....	39
<b>2 Diode .....</b>	<b>45</b>
2.1 Aufbau und Wirkungsweise der Diode .....	45
2.1.1 Diode im thermodynamischen Gleichgewicht .....	45
2.1.2 Diode bei Anlegen einer äußeren Spannung .....	49
2.2 Ableitung der Diodengleichung .....	50
2.2.1 Diode mit langen Abmessungen .....	50
2.2.2 Diode mit kurzen Abmessungen .....	55
2.2.3 Abweichung von der idealen Diodenkennlinie .....	55
2.2.4 Kapazitätsverhalten des pn-Übergangs .....	56

2.3	Modellierung der Diode	63
2.3.1	Großsignalersatzschaltung der Diode	63
2.3.2	Schaltverhalten der Diode	63
2.3.3	Kleinsignalersatzschaltung der Diode	66
2.3.4	Durchbruchverhalten der Diode	68
2.4	Bänderdiagrammdarstellung der Diode	69
2.4.1	Regeln zur Konstruktion von Bänderdiagrammen	69
2.4.2	Bänderdiagramm der Diode	70
2.5	Metall-Halbleiter-Übergänge	71
2.5.1	Elektronenaffinität und Austrittsarbeit	72
2.5.2	Metall-Halbleiter-Übergang mit n-Halbleiter	73
2.5.3	Metall-Halbleiter-Übergang mit p-Halbleiter	78
<b>3</b>	<b>Bipolartransistor</b>	<b>81</b>
3.1	Aufbau und Wirkungsweise des Bipolartransistors	81
3.1.1	nnp- und pnp-Transistor	81
3.1.2	Funktion des Bipolartransistors	82
3.2	Ableitung der Transistorgleichungen	85
3.2.1	Transistor im normalen Verstärkerbetrieb	85
3.2.2	Transistor im inversen Verstärkerbetrieb	90
3.2.3	Transistor im Sättigungsbetrieb	91
3.2.4	Ausgangskennlinienfeld des Transistors	92
3.2.5	Basisweitenmodulation (Early-Effekt)	93
3.3	Modellierung des Bipolartransistors	95
3.3.1	Großsignalersatzschaltbild des Bipolartransistors	95
3.3.2	Schaltverhalten des Bipolartransistors	99
3.3.3	Kleinsignalersatzschaltbild des Bipolartransistors	101
3.3.4	Frequenzverhalten des Transistors	105
3.3.5	Durchbruchverhalten des Bipolartransistors	107
3.4	Bänderdiagrammdarstellung des Bipolartransistors	108
<b>4</b>	<b>Feldeffekttransistor</b>	<b>111</b>
4.1	Aufbau und Wirkungsweise des Feldeffekttransistors	111
4.1.1	n-Kanal MOS-Feldeffekttransistor	111
4.1.2	p-Kanal MOS-Feldeffekttransistor	113
4.1.3	Transistortypen und Schaltsymbole	113
4.2	Ableitung der Transistorgleichungen	115
4.2.1	Stromgleichung	115
4.2.2	Ausgangskennlinienfeld	118
4.2.3	Übertragungskennlinie	121
4.2.4	Kanallängenmodulation	121
4.3	Modellierung des MOSFET	123
4.3.1	Großsignalersatzschaltbild des MOSFET	123
4.3.2	Schaltverhalten des MOSFET	125
4.3.3	Kleinsignalersatzschaltbild des MOSFET	129

4.3.4	Durchbruchverhalten . . . . .	131
4.4	Bänderdiagrammdarstellung des MOSFET . . . . .	132
4.4.1	Bänderdiagramm der MOS-Struktur . . . . .	132
4.4.2	Bänderdiagramm des MOSFET . . . . .	135
4.4.3	Wirkungsweise des Transistors im Bänderdiagramm . . . . .	136
4.4.4	Substratsteuereffekt . . . . .	137
4.4.5	Kurzkanaleffekt . . . . .	137
<b>5</b>	<b>Optoelektronische Bauelemente . . . . .</b>	<b>139</b>
5.1	Grundlegende Begriffe . . . . .	139
5.1.1	Kenngrößen optischer Strahlung . . . . .	139
5.1.2	Ladungsträgergeneration und Fotoeffekt . . . . .	142
5.1.3	Direkte und indirekte Halbleiter . . . . .	144
5.2	Fotowiderstand . . . . .	148
5.2.1	Aufbau und Funktionsweise . . . . .	148
5.2.2	Stromgleichung . . . . .	149
5.2.3	Kenngrößen . . . . .	150
5.3	Fotodiode . . . . .	152
5.3.1	Aufbau und Funktion . . . . .	152
5.3.2	Stromgleichung . . . . .	153
5.3.3	Kenngrößen . . . . .	154
5.3.4	Betriebsarten der Fotodiode . . . . .	155
5.4	Solarzelle . . . . .	156
5.4.1	Funktion und Beschaltung . . . . .	156
5.4.2	Kenngrößen . . . . .	157
5.5	Fototransistor . . . . .	159
5.6	Lumineszenzdiode . . . . .	160
5.6.1	Aufbau und Funktionsweise . . . . .	160
5.6.2	Kenngrößen . . . . .	161
<b>6</b>	<b>Der Transistor als Verstärker . . . . .</b>	<b>165</b>
6.1	Grundlegende Begriffe und Konzepte . . . . .	165
6.1.1	Übertragungskennlinie und Verstärkung . . . . .	165
6.1.2	Arbeitspunkt und Betriebsarten . . . . .	167
6.1.3	Gleichstromersatzschaltung . . . . .	169
6.2	Arbeitspunkteinstellung mit 4-Widerstandsnetzwerk . . . . .	170
6.2.1	Arbeitspunkteinstellung beim Bipolartransistor . . . . .	170
6.2.2	Arbeitspunkteinstellung beim MOSFET . . . . .	173
6.3	Arbeitspunkteinstellung mit Stromspiegeln . . . . .	176
6.3.1	Stromspiegel . . . . .	176
6.3.2	Dimensionierung des Stromspiegels . . . . .	180
6.4	Wechselstromanalyse von Verstärkern . . . . .	181
6.4.1	Kleinsignalersatzschaltung . . . . .	181
6.4.2	Verstärkerschaltungen mit Bipolartransistor . . . . .	183
6.4.3	Verstärkerschaltungen mit MOSFET . . . . .	188

6.4.4	Verstärkerschaltungen mit Stromspiegel . . . . .	192
6.4.5	Mehrstufige Verstärker . . . . .	194
<b>7</b>	<b>Transistorgrundschaltungen</b> . . . . .	<b>199</b>
7.1	Emitterschaltung, Sourceschaltung . . . . .	199
7.1.1	Wechselstromersatzschaltbild der Emitterschaltung . . . . .	199
7.1.2	Spannungsverstärkung der Emitterschaltung . . . . .	201
7.1.3	Eingangswiderstand der Emitterschaltung . . . . .	203
7.1.4	Ausgangswiderstand der Emitterschaltung . . . . .	204
7.2	Kollektorschaltung, Drainschaltung . . . . .	207
7.2.1	Wechselstromersatzschaltbild der Kollektorschaltung . . . . .	207
7.2.2	Spannungsverstärkung der Kollektorschaltung . . . . .	208
7.2.3	Eingangswiderstand der Kollektorschaltung . . . . .	209
7.2.4	Ausgangswiderstand der Kollektorschaltung . . . . .	210
7.3	Basisschaltung, Gateschaltung . . . . .	211
7.3.1	Spannungsverstärkung der Basisschaltung . . . . .	213
7.3.2	Eingangswiderstand der Basisschaltung . . . . .	215
7.3.3	Ausgangswiderstand der Basisschaltung . . . . .	216
7.4	Push-Pull Ausgangsstufe . . . . .	217
<b>8</b>	<b>Operationsverstärker</b> . . . . .	<b>221</b>
8.1	Der einstufige Differenzverstärker . . . . .	221
8.1.1	Funktion des Differenzverstärkers . . . . .	221
8.1.2	Gleichstromanalyse des Differenzverstärkers . . . . .	222
8.1.3	Kleinsignalanalyse des Differenzverstärkers . . . . .	222
8.2	Mehrstufige Differenzverstärker . . . . .	228
8.2.1	CMOS Differenzeingangsstufe . . . . .	228
8.2.2	Verbesserte Differenzeingangsstufe . . . . .	232
8.2.3	Mehrstufiger Differenzverstärker . . . . .	234
8.2.4	Vom Differenzverstärker zum Operationsverstärker . . . . .	237
8.3	Schaltungen mit idealen Operationsverstärkern . . . . .	239
8.3.1	Invertierender Verstärker . . . . .	239
8.3.2	Nichtinvertierender Verstärker . . . . .	241
8.3.3	Addierer . . . . .	243
8.3.4	Subtrahierer . . . . .	243
8.3.5	Filterschaltungen . . . . .	244
<b>9</b>	<b>Frequenzverhalten analoger Schaltungen</b> . . . . .	<b>247</b>
9.1	Grundlegende Begriffe . . . . .	247
9.1.1	Amplituden- und Phasengang . . . . .	247
9.1.2	Die komplexe Übertragungsfunktion . . . . .	252
9.1.3	Verhalten im Zeitbereich . . . . .	256
9.2	Übertragungsfunktionen von Verstärkerschaltungen . . . . .	259
9.2.1	Komplexe Übertragungsfunktion und Grenzfrequenz . . . . .	259
9.2.2	Berechnung der Grenzfrequenzen . . . . .	261

9.3	Grenzfrequenz von Verstärkergrundschaltungen . . . . .	266
9.3.1	Emitterschaltung . . . . .	267
9.3.2	Miller-Effekt . . . . .	269
9.3.3	Emitterschaltung mit Gegenkopplungswiderstand . . . . .	270
9.3.4	Kollektorschaltung . . . . .	272
9.3.5	Basisschaltung . . . . .	275
9.4	Methoden zur Abschätzung der Grenzfrequenzen . . . . .	277
9.4.1	Kurzschluss-Zeitkonstanten-Methode . . . . .	277
9.4.2	Leerlauf-Zeitkonstanten-Methode . . . . .	279
<b>10</b>	<b>Rückkopplung in Verstärkern . . . . .</b>	<b>283</b>
10.1	Grundlegende Begriffe . . . . .	283
10.1.1	Prinzip der Gegenkopplung . . . . .	283
10.1.2	Rückkopplung und Verzerrungen . . . . .	284
10.1.3	Rückkopplung und Frequenzgang . . . . .	285
10.1.4	Rückkopplungsarten . . . . .	286
10.2	Serien-Parallel-Rückkopplung (Spannungsverstärker) . . . . .	288
10.2.1	Spannungsverstärker mit idealer Rückkopplung . . . . .	288
10.2.2	Spannungsverstärker mit realer Rückkopplung . . . . .	291
10.3	Parallel-Parallel-Rückkopplung (Transimpedanzverstärker) . . . . .	297
10.3.1	Transimpedanzverstärker mit idealer Rückkopplung . . . . .	297
10.3.2	Transimpedanzverstärker mit realer Rückkopplung . . . . .	299
10.4	Parallel-Serien-Rückkopplung (Stromverstärker) . . . . .	304
10.4.1	Stromverstärker mit idealer Rückkopplung . . . . .	304
10.4.2	Stromverstärker mit realer Rückkopplung . . . . .	305
10.5	Serien-Serien-Rückkopplung (Transadmittanzverstärker) . . . . .	307
10.5.1	Transadmittanzverstärker mit idealer Rückkopplung . . . . .	307
10.5.2	Transadmittanzverstärker mit realer Rückkopplung . . . . .	308
10.6	Rückkopplung und Oszillatoren . . . . .	310
10.6.1	Übertragungsfunktion der rückgekoppelten Anordnung . . . . .	310
10.6.2	Schwingbedingung . . . . .	314
10.6.3	Schleifenverstärkung der rückgekoppelten Anordnung . . . . .	315
10.7	Stabilität und Kompensation von Verstärkerschaltungen . . . . .	317
10.7.1	Bode-Diagramm des Operationsverstärkers . . . . .	318
10.7.2	Stabilitätskriterium . . . . .	320
10.7.3	Kompensation durch Polverschiebung . . . . .	322
10.7.4	Kompensation durch Polaufspaltung . . . . .	325
<b>11</b>	<b>Logikschaltungen . . . . .</b>	<b>329</b>
11.1	Grundlegende Begriffe . . . . .	329
11.1.1	Dioden-Transistor-Logik (DTL) . . . . .	331
11.1.2	Transistor-Transistor-Logik (TTL) . . . . .	332
11.2	MOS-Logikschaltungen . . . . .	333
11.2.1	n-MOS-Inverterschaltungen . . . . .	334
11.2.2	CMOS-Komplementärinverter . . . . .	334

11.2.3	Entwurf von CMOS-Gattern	341
11.2.4	Dimensionierung von CMOS-Gattern	342
11.2.5	C <sup>2</sup> MOS Logik	345
11.2.6	Domino-Logik	348
11.2.7	NORA-Logik	349
<b>12</b>	<b>Herstellung integrierter Schaltungen in CMOS-Technik</b>	<b>351</b>
12.1	Einführung	351
12.1.1	Die CMOS-Technologie	352
12.1.2	Grundsätzlicher Prozessablauf	353
12.2	Schichttechnik	354
12.2.1	Gasphasenabscheidung	355
12.2.2	Epitaxie	355
12.2.3	Thermische Oxidation	356
12.2.4	Kathodenzerstäubung	357
12.2.5	Ionenimplantation	357
12.2.6	Schleuderbeschichtung	358
12.3	Ätztechnik	358
12.3.1	Nassätzen	359
12.3.2	Physikalisches Trockenätzen	359
12.3.3	Chemisches Trockenätzen	360
12.3.4	Chemisch physikalisches Trockenätzen	360
12.3.5	Chemisch mechanisches Polieren	360
12.4	Lithografie	361
12.4.1	Prinzip der Fotolithografie	361
12.4.2	Kenngrößen der Fotolithografie	361
12.5	Der CMOS-Prozess	361
12.5.1	Prozessablauf	361
12.6	Layout von CMOS-Schaltungen	369
12.6.1	Herstellungsebenen und Masken	369
12.6.2	CMOS-Inverter	370
12.6.3	2-fach NOR-Gatter	371
12.7	Elektrische Eigenschaften der Entwurfsebenen	372
12.7.1	Metallebene	372
12.7.2	Kontakte und Vias	376
12.7.3	Polysiliziumebene	377
12.7.4	Implantationsebene	378
12.7.5	Wannen	378
12.8	Parasitäre Bauelemente	380
12.8.1	Dickoxidtransistor	380
12.8.2	Parasitärer Bipolartransistor	380
12.8.3	Parasitärer Thyristor	381
12.9	ASIC	384
12.9.1	Gate Arrays	384
12.9.2	Standardzellen	384

12.9.3	PLD	385
<b>13</b>	<b>Rechnergestützter Schaltungsentwurf</b>	<b>387</b>
13.1	Einführung	387
13.1.1	Entwurfsablauf	387
13.1.2	Simulationswerkzeuge für den Schaltungsentwurf	389
13.1.3	Simulationsarten	389
13.2	Aufbau eines Schaltungssimulators	392
13.2.1	Schaltungseingabe und Netzliste	392
13.2.2	Modellgleichungen und Parameterübergabe	393
13.3	Aufstellen der Netzwerkgleichungen bei der Schaltungssimulation	395
13.3.1	Netzwerk mit Stromquellen	395
13.3.2	Netzwerk mit Spannungsquellen	399
13.3.3	Berücksichtigung gesteuerter Quellen	401
13.3.4	Berücksichtigung nichtlinearer Bauelemente	403
13.3.5	Berücksichtigung von Induktivitäten und Kapazitäten	406
<b>A</b>	<b>Anhang</b>	<b>411</b>
A.1	Äquivalente Zweipole	411
A.1.1	Bestimmung von Ersatzspannungsquellen	411
A.1.2	Bestimmung von Ersatzstromquellen	412
A.2	Ein- und Ausgangswiderstand von Verstärkern	413
A.2.1	Bestimmung des Eingangswiderstandes	413
A.2.2	Bestimmung des Ausgangswiderstandes	413
A.3	Vierpolparameter	414
A.3.1	Darstellung von Vierpolen mit $g$ -Parametern	414
A.3.2	Darstellung von Vierpolen mit $h$ -Parametern	415
A.3.3	Darstellung von Vierpolen mit $y$ -Parametern	415
A.3.4	Darstellung von Vierpolen mit $z$ -Parametern	416
	<b>Literatur</b>	<b>417</b>
	<b>Sachverzeichnis</b>	<b>421</b>



<http://www.springer.com/978-3-642-20886-7>

Einführung in die Halbleiter-Schaltungstechnik

Göbel, H.

2012, XIII, 424 S. 444 Abb. Mit online files/update.,

Softcover

ISBN: 978-3-642-20886-7