

---

Massoud Momeni

# Grundlagen der Mikroelektronik 1

---

# Inhaltsverzeichnis

<b>1 Einführung in die Elektronik</b> .....	1
1.1 Grundlegende Konzepte .....	2
1.1.1 Ohmsches Gesetz .....	2
1.1.2 Knotenregel (1. Kirchhoffsches Gesetz) .....	5
1.1.3 Maschenregel (2. Kirchhoffsches Gesetz) .....	7
1.1.4 Parallelschaltung von Widerständen .....	8
1.1.5 Stromteiler .....	10
1.1.6 Reihenschaltung von Widerständen .....	11
1.1.7 Spannungsteiler .....	12
1.2 Zweipoltheorie .....	14
1.2.1 Zählfeilsysteme .....	15
1.2.2 Ideale und lineare Stromquellen .....	16
1.2.3 Ideale und lineare Spannungsquellen .....	17
1.2.4 Ersatzstromquelle .....	19
1.2.5 Ersatzspannungsquelle .....	21
1.2.6 Superposition .....	24
1.3 Zweitorthorie .....	27
1.3.1 Ein- und Ausgangswiderstand .....	28
1.3.2 Zweitorthparameter .....	30
1.3.3 Gesteuerte ideale Quellen .....	39
Zusammenfassung .....	41
<b>2 Halbleiterphysik</b> .....	43
2.1 Halbleitermaterialien .....	44
2.1.1 Ladungsträger im intrinsischen Halbleiter .....	46
2.1.2 Dotierung .....	50
2.1.3 Ladungsträger im extrinsischen Halbleiter .....	52
2.1.4 Verbindungshalbleiter .....	56

2.2	Stromtransportmechanismen . . . . .	57
2.2.1	Driftstrom . . . . .	58
2.2.2	Diffusionsstrom . . . . .	64
2.2.3	Gesamtstrom . . . . .	68
	Zusammenfassung. . . . .	69
<b>3</b>	<b>Diode</b> . . . . .	<b>71</b>
3.1	Struktur . . . . .	72
3.2	Diode im thermischen Gleichgewicht . . . . .	75
3.2.1	Funktionsprinzip . . . . .	75
3.2.2	Diffusionsspannung . . . . .	78
3.2.3	Elektrische Feldstärke . . . . .	80
3.2.4	Weite der Raumladungszone . . . . .	81
3.3	Diode mit angelegter Spannung. . . . .	84
3.3.1	Sperrpolung . . . . .	85
3.3.2	Flusspolung . . . . .	88
3.3.3	Strom-Spannungs-Kennlinie . . . . .	92
3.3.4	Temperaturverhalten . . . . .	95
3.3.5	Durchbruchmechanismen . . . . .	99
3.4	Modellierung der Diode. . . . .	102
3.4.1	Ideales Diodenmodell . . . . .	106
3.4.2	Diodenmodell mit konstantem Spannungsabfall. . . . .	109
3.4.3	Diodenmodell mit konstantem Spannungsabfall und Widerstand. . . . .	111
3.4.4	Diodenmodell für den Durchbruch . . . . .	113
3.4.5	Zusammenfassung der Diodenmodelle und Analysemethoden . . . . .	118
3.5	Anwendungen . . . . .	119
3.5.1	Spannungsbegrenzung . . . . .	120
3.5.2	Spannungsstabilisierung . . . . .	126
3.5.3	Gleichrichtung . . . . .	128
	Zusammenfassung. . . . .	140
<b>4</b>	<b>Bipolartransistor</b> . . . . .	<b>143</b>
4.1	Struktur und Zählpfeilrichtungen. . . . .	144
4.2	Betriebsbereiche. . . . .	146
4.3	Funktionsweise und Stromgleichungen . . . . .	149
4.3.1	Vorwärtsaktiver Betrieb . . . . .	149
4.3.2	Rückwärtsaktiver Betrieb. . . . .	156
4.3.3	Sättigungs- und Sperrbetrieb . . . . .	159

4.4	Strom-Spannungs-Kennlinien	161
4.4.1	Eingangskennlinie $I_B = f(V_{BE})$	162
4.4.2	Übertragungskennlinie $I_C = f(V_{BE})$	163
4.4.3	Ausgangskennlinie $I_C = f(V_{CE})$	163
4.5	Modellierung des Bipolartransistors	166
4.5.1	Vorwärtsaktiver Betrieb	166
4.5.2	Rückwärtsaktiver Betrieb	169
4.5.3	Transportmodell	173
4.5.4	Sättigungs- und Sperrbetrieb	173
4.5.5	Zusammenfassung der Transistormodelle	177
4.6	Basisweitenmodulation oder Early-Effekt	177
4.7	<i>pnp</i> -Bipolartransistor	183
4.7.1	Vorwärtsaktiver Betrieb	183
4.7.2	Rückwärtsaktiver Betrieb	186
4.7.3	Sättigungsbetrieb	187
4.7.4	Sperrbetrieb	189
4.7.5	Transportmodell	190
4.7.6	Zusammenfassung der Transistormodelle	191
4.7.7	Basisweitenmodulation oder Early-Effekt	191
	Zusammenfassung	192
<b>5</b>	<b>Feldeffekttransistor</b>	195
5.1	Struktur und Zählpfeilrichtungen	196
5.2	Funktionsweise und Betriebsbereiche des FET	198
5.2.1	MOS-Kondensator	199
5.2.2	FET mit angelegter Gate-Spannung	202
5.2.3	FET mit angelegter Gate- und Drain-Spannung	204
5.3	Stromgleichungen	206
5.3.1	Triodenbereich	206
5.3.2	Sättigungsbereich	211
5.3.3	Sperrbereich	215
5.4	Strom-Spannungs-Kennlinien	216
5.4.1	Übertragungskennlinie $I_D = f(V_{GS})$	217
5.4.2	Ausgangskennlinie $I_D = f(V_{DS})$	217
5.5	Kanallängenmodulation	220
5.6	Body-Effekt	224
5.7	<i>p</i> -Kanal-Transistor	228
5.8	Zusammenfassung der Transistormodelle	232
5.9	CMOS-Technologie	233
5.10	Vergleich von Feldeffekt- und Bipolartransistoren	235
	Zusammenfassung	236

<b>6 Kleinsignalmodellierung und Arbeitspunkteinstellung</b> .....	239
6.1 Groß- und Kleinsignalverhalten .....	240
6.2 Arbeitspunkteinstellung beim Bipolartransistor .....	251
6.2.1 Rückkopplungswiderstand am Emitter .....	252
6.2.2 Rückkopplungswiderstand zwischen Kollektor und Basis .....	257
6.3 Arbeitspunkteinstellung beim Feldeffekttransistor .....	260
6.3.1 Rückkopplungswiderstand am Source .....	261
6.3.2 Rückkopplungswiderstand zwischen Drain und Gate .....	264
6.4 Kleinsignalmodellierung .....	266
6.4.1 Diode .....	266
6.4.2 Bipolartransistor .....	273
6.4.3 Feldeffekttransistor .....	281
6.4.4 Vergleich der Kleinsignalmodelle von Feldeffekt- und Bipolartransistoren .....	288
6.5 Groß- und Kleinsignalanalyse .....	291
Zusammenfassung .....	297
<b>7 Grundsaltungen</b> .....	299
7.1 Grundlegende Betrachtungen .....	300
7.2 Klassifizierung der Verstärkergrundsaltungen .....	305
7.3 Emitterschaltung .....	308
7.3.1 Emitterschaltung mit Degeneration .....	314
7.3.2 Emitterschaltung mit Basiswiderstand .....	319
7.3.3 Emitterschaltung mit Vorspannungsnetzwerk .....	322
7.4 Source-Schaltung .....	323
7.4.1 Source-Schaltung mit Degeneration .....	328
7.5 Basisschaltung .....	329
7.5.1 Basisschaltung mit Degeneration .....	335
7.5.2 Basisschaltung mit Basiswiderstand .....	337
7.5.3 Basisschaltung mit Vorspannungsnetzwerk .....	339
7.6 Gate-Schaltung .....	341
7.6.1 Gate-Schaltung mit Degeneration .....	342
7.7 Kollektorschaltung (Emitterfolger) .....	343
7.7.1 Kollektorschaltung mit Basiswiderstand .....	349
7.7.2 Kollektorschaltung mit Vorspannungsnetzwerk .....	351
7.8 Drain-Schaltung (Source-Folger) .....	352
7.9 Übersicht der wichtigsten Ergebnisse .....	353
Zusammenfassung .....	365
<b>8 Operationsverstärker</b> .....	367
8.1 Grundlegende Betrachtungen .....	368
8.2 Lineare gegengekoppelte Schaltungen mit idealen Operationsverstärkern .....	372

8.2.1	Invertierender Verstärker . . . . .	372
8.2.2	Nichtinvertierender Verstärker . . . . .	375
8.2.3	Spannungsfolger . . . . .	378
8.2.4	Addierverstärker . . . . .	379
8.2.5	Subtrahierverstärker . . . . .	380
8.2.6	Instrumentationsverstärker . . . . .	384
8.2.7	Integrator und Differenzierer . . . . .	385
8.3	Nichtlineare gegengekoppelte Schaltungen mit idealen Operationsverstärkern . . . . .	392
8.3.1	Präzisionsgleichrichter . . . . .	392
8.3.2	Logarithmischer Verstärker . . . . .	397
8.3.3	Exponentieller Verstärker . . . . .	399
8.3.4	Wurzelverstärker . . . . .	400
8.4	Nichtlineare mitgekoppelte Schaltungen . . . . .	401
8.4.1	Komparator . . . . .	401
8.4.2	Bistabile Kippstufe oder Schmitt-Trigger . . . . .	403
8.4.3	*Astabile Kippstufe . . . . .	409
8.4.4	*Monostabile Kippstufe . . . . .	413
8.5	*Nichtidealer Operationsverstärker . . . . .	416
8.5.1	Spannungsverstärkung . . . . .	418
8.5.2	Eingangswiderstand . . . . .	425
8.5.3	Ausgangswiderstand . . . . .	433
8.5.4	Eingangs-Offset-Spannung . . . . .	439
8.5.5	Eingangsstrom und Eingangs-Offset-Strom . . . . .	443
8.5.6	Ausgangsspannungshub . . . . .	448
8.5.7	3-dB-Grenzfrequenz und -Bandbreite . . . . .	449
8.5.8	Anstiegs- und Abfallrate der Ausgangsspannung . . . . .	457
8.5.9	Leistungsbandbreite . . . . .	462
	Zusammenfassung . . . . .	463
<b>9</b>	<b>Einführung in die rechnergestützte Schaltungssimulation mit SPICE . . . . .</b>	<b>465</b>
9.1	Netzlisten . . . . .	466
9.2	Netzwerkelemente . . . . .	468
9.2.1	Widerstände . . . . .	470
9.2.2	Kondensatoren und Spulen . . . . .	471
9.2.3	Unabhängige Spannungs- und Stromquellen . . . . .	473
9.2.4	Gesteuerte Quellen . . . . .	478
9.2.5	Dioden . . . . .	479
9.2.6	Bipolartransistoren . . . . .	480
9.2.7	Feldeffekttransistoren . . . . .	482
9.2.8	Operationsverstärker . . . . .	485

9.3	Bauelementmodelle .....	488
9.3.1	Dioden .....	489
9.3.2	Bipolartransistoren .....	490
9.3.3	Feldeffekttransistoren .....	493
9.4	Analysearten .....	497
9.4.1	Arbeitspunktanalyse (.OP) .....	497
9.4.2	Gleichstromanalyse (.DC) .....	498
9.4.3	Wechselstromanalyse (.AC) .....	500
9.4.4	Transientenanalyse (.TRAN) .....	502
	Zusammenfassung .....	504
<b>Anhang A Spannungsverlauf der astabilen Kippstufe .....</b>		<b>507</b>
<b>Anhang B Übersetzungstabelle Englisch-Deutsch .....</b>		<b>511</b>
<b>Anhang C Schaltzeichen .....</b>		<b>531</b>
<b>Anhang D Formeln zur Berechnung von Ein- und Ausgangswiderständen ....</b>		<b>537</b>
<b>Anhang E Einheiten und Umrechnungsfaktoren .....</b>		<b>543</b>
<b>Anhang F Physikalische Konstanten und Materialeigenschaften .....</b>		<b>547</b>
<b>Literatur .....</b>		<b>549</b>
<b>Stichwortverzeichnis .....</b>		<b>551</b>