

Michael Reisch

# Elektronische Bauelemente

Funktion, Grundsaltungen,  
Modellierung mit SPICE

2., vollständig neu bearbeitete Auflage

Mit 1125 Abbildungen und 67 Tabellen

# Inhaltsverzeichnis

<b>1. Grundlagen</b>	<b>1</b>
1.1 Elektrische Netzwerke, CAD-Werkzeuge	2
1.2 Ideale Netzwerkelemente	5
1.2.1 Widerstände	6
1.2.2 Kapazitäten	9
1.2.3 Induktivitäten	10
1.2.4 Unabhängige Quellen	11
1.2.5 Gesteuerte Quellen	11
1.3 Lineare Netzwerke	12
1.3.1 Impedanzen, Admittanzen	12
1.3.2 Darstellung in Frequenz- und Zeitbereich	15
1.3.3 Übertragungsfaktor	18
1.3.4 Der RC-Tiefpaß	23
1.3.5 Der RC-Hochpaß	30
1.3.6 RC-Bandpass	35
1.3.7 Der LRC-Reihenschwingkreis	38
1.4 Nichtlineare Netzwerke	45
1.4.1 Harmonische, Kompressionspunkt	45
1.4.2 Intermodulation, Mischprodukte	47
1.5 Literaturverzeichnis	50
<b>2. Aktive Vierpole</b>	<b>51</b>
2.1 Transistoren als Verstärker und Schalter	51
2.2 Kleinsignalanalyse, Vierpolkenngößen	54
2.2.1 Leitwertparameter	54
2.2.2 Die Wahl des Bezugspunkts	58
2.2.3 Hybridparameter	60
2.2.4 Vierpoldarstellungen und Ersatzschaltungen	60
2.3 Kenngrößen beschalteter Vierpole	64
2.3.1 Eingangsimpedanz, Ausgangsimpedanz, Übertragungsfaktoren	65
2.3.2 Leistungsverstärkung	68
2.3.3 Stabilität, MAG, MSG	70
2.3.4 Reflexionskoeffizienten	71
2.4 S-Parameter	73
2.5 Verstärker	75
2.5.1 Gegenkopplung	76
2.5.2 Mitkopplung, Oszillatoren	83
2.6 Literaturverzeichnis	84

<b>3. Rauschen</b>	85
3.1 Grundlagen	85
3.1.1 Autokorrelation, Wiener-Khintchine-Relation	86
3.1.2 Rauschquellen	87
3.1.3 Korrelation	88
3.2 Rauschmechanismen	88
3.2.1 Schrotrauschen	90
3.2.2 Thermisches Rauschen	92
3.2.3 1/f-Rauschen	98
3.3 Analyse rauschender Netzwerke	99
3.4 Rauschende lineare Vierpole	101
3.4.1 Äquivalente Rauschbandbreite	103
3.4.2 Signal-Rausch-Verhältnis, Rauschzahl	103
3.5 Literaturverzeichnis	108
<b>4. SPICE</b>	109
4.1 Steuerdatei, Netzliste, Modellanweisungen	109
4.1.1 Die Netzliste	110
4.1.2 Die .MODEL-Anweisung	113
4.1.3 Die .SUBCKT-Anweisung	115
4.2 Ergebnisausgabe	116
4.2.1 Die .OUT-Datei	116
4.2.2 PROBE	117
4.3 Erste Schritte	119
4.3.1 Kennlinien, .DC-Analyse	119
4.3.2 Frequenzgänge, .AC-Analyse	121
4.3.3 Einschwingvorgänge, .TRAN-Analyse	122
4.4 Steuerbefehle	124
4.4.1 Gleichstromanalyse	125
4.4.2 Transientenanalyse	130
4.4.3 Frequenzanalyse	134
4.4.4 Weitere Steueranweisungen	136
4.5 Unabhängige Quellen V, I	138
4.5.1 Gleichquellen	139
4.5.2 Wechselquellen (AC)	139
4.5.3 Zeitabhängige Quellen	139
4.6 Gesteuerte Quellen	144
4.6.1 Lineare gesteuerte Quellen	144
4.6.2 Rauschquellen	146
4.6.3 Nichtlineare gesteuerte Quellen	148
4.6.4 Analog Behavioral Modeling	150
4.7 Literaturverzeichnis	152

<b>5. Praktischer Schaltungsaufbau</b>	153
5.1 Leiterplatten	154
5.1.1 Substratmaterialien	154
5.1.2 Herstellung	155
5.1.3 Bedrahtete und oberflächenmontierte Bauteile (SMD)	157
5.1.4 Einlagen- und Mehrlagenleiterplatten	158
5.1.5 Layout	160
5.1.6 Montage der Bauteile	163
5.2 Hybridschaltungen	166
5.3 Verlustleistung und Eigenerwärmung	168
5.3.1 Temperaturabhängigkeit von Bauteilkenngößen	168
5.3.2 Wärmewiderstand, thermische Zeitkonstante	169
5.3.3 Thermische Ersatzschaltung	172
5.3.4 Zulässige Verlustleistung und Wärmeabfuhr	173
5.3.5 Wärmeabtransport, Kühlkörper	177
5.3.6 Peltier-Kühler	183
5.4 Qualität und Zuverlässigkeit	188
5.4.1 Ausfallstatistik	189
5.4.2 Thermischer Streß, Arrhenius-Gesetz	192
5.4.3 Elektrostatische Entladungen	193
5.5 Literaturverzeichnis	197
<b>6. Operationsverstärker</b>	199
6.1 Prinzipien, Kenndaten	199
6.1.1 NF-Kenngrößen, NF-Ersatzschaltung	199
6.1.2 Frequenzverhalten und Kleinsignalmodell	205
6.1.3 Kenngrößen für transienten Großsignalbetrieb	208
6.1.4 Ausführungen	209
6.2 Lineare Grundsaltungen	211
6.2.1 Der invertierende Verstärker	211
6.2.2 Der nichtinvertierende Verstärker	221
6.2.3 Der Subtrahierer	224
6.2.4 Der Addierer	228
6.2.5 Der Integrierer	229
6.2.6 Der Differenzierer	231
6.2.7 Der Logarithmierer	232
6.2.8 Strom-Spannungs-Wandler	233
6.2.9 Negative Widerstände	233
6.2.10 Gesteuerte Quellen	234
6.2.11 Gyrator	235
6.2.12 Aktive Filter	237
6.3 Rückkopplung und Stabilität	242
6.3.1 Gegenkopplung, Stabilitätsanalyse	242
6.3.2 Frequenzgangkorrektur	249
6.4 Rauschen von Operationsverstärkern	253
6.4.1 Rauschersatzschaltung	253
6.4.2 Rauschen des nichtinvertierenden Verstärkers	253
6.5 Makromodelle für die Schaltungssimulation	258
6.6 Literaturverzeichnis	263

<b>7. Widerstände</b>	265
7.1 Physikalische Grundlagen	265
7.2 Ohmsche Widerstände	269
7.2.1 Kenngrößen und Ersatzschaltung realer Widerstände	269
7.2.2 Drahtwiderstände	280
7.2.3 Massewiderstände	281
7.2.4 Schichtwiderstände	281
7.2.5 Potentiometer	284
7.2.6 Modellierung ohmscher Widerstände in SPICE	285
7.3 Heißleiter	287
7.4 Keramische Kaltleiter (PTC-Widerstände)	293
7.5 PPTC-Widerstände (Poly Switch)	301
7.6 Sicherungen	302
7.6.1 Feinsicherungen	302
7.6.2 Überlastschutz mit keramischen Kaltleitern	303
7.7 Varistoren (VDR-Widerstände)	306
7.8 Edelgasgefüllte Überspannungsableiter	312
7.9 Literaturverzeichnis	313
<b>8. Kondensatoren</b>	315
8.1 Physikalische Grundlagen	315
8.1.1 Polarisationsmechanismen	316
8.1.2 Ionenleitung, Durchschlag	318
8.1.3 Dielektrische Absorption	319
8.1.4 Ferroelektrika	320
8.2 Bauformen	322
8.3 Kenngrößen und Ersatzschaltung des realen Kondensators	324
8.3.1 Kenndaten, Grenzwerte	324
8.3.2 Grenzspannungen, Pulsbelastbarkeit	325
8.3.3 Parallelersatzschaltung	327
8.3.4 Serienersatzschaltung	329
8.3.5 Parallel- und Reihenschaltung von Kondensatoren	331
8.3.6 Modellierung von Kapazitäten in SPICE	332
8.3.7 Anwendung: Stütz- und Abblockkondensatoren	334
8.3.8 Zuverlässigkeit von Kondensatoren	336
8.4 Ausführungen	337
8.4.1 Metallpapierkondensatoren	337
8.4.2 Folienkondensatoren	337
8.4.3 Keramikkondensatoren	342
8.4.4 Glimmerkondensatoren	346
8.4.5 Elektrolytkondensatoren	346
8.4.6 Doppelschichtkondensatoren, Ultracaps	355
8.5 Literaturverzeichnis	356

<b>9. Spulen und Übertrager</b>	357
9.1 Physikalische Grundlagen	357
9.2 Induktionskoeffizienten ausgewählter Leiterformen	362
9.3 Definition von Induktivitäten in SPICE	365
9.4 Spulen	366
9.4.1 Ersatzschaltung und elektrisches Verhalten	366
9.4.2 Drahtwiderstand, Kupferverluste	368
9.4.3 Kernverlustwiderstand	368
9.4.4 Effektive Permeabilität, Luftspalte	369
9.4.5 Wicklungskapazität	372
9.4.6 Spulengüte, Verlustfaktor	373
9.4.7 Temperaturkoeffizient	374
9.4.8 Kernformen	376
9.5 Dämpfungspferlen	380
9.6 Vormagnetisierung, Drosselspulen	382
9.7 Eigenschaften und Modellierung ferro- und ferrimagnetischer Kernmaterialien	387
9.7.1 Ferromagnetismus und Ferrimagnetismus	387
9.7.2 Magnetisierung	388
9.7.3 Beschreibung von Spulen mit Kern in PSPICE	391
9.7.4 Kernverluste	394
9.8 Transformatoren und Übertrager	398
9.8.1 Der verlustlose Übertrager	399
9.8.2 Unvollständige Kopplung	401
9.8.3 Übertragungsfaktor	403
9.8.4 Leistungsübertrager, Transformatoren	406
9.8.5 Beschreibung gekoppelter Spulen in SPICE	407
9.9 Literaturverzeichnis	408
<b>10. Leitungen</b>	409
10.1 Grundlagen	409
10.1.1 Leitungsgleichungen, Telegraphengleichung	410
10.1.2 Leitungswellen	411
10.1.3 Pulse auf Leitungen	413
10.1.4 Kurze Leitungen	414
10.1.5 Verlustlose Leitung	415
10.1.6 Leitung mit geringen Verlusten	415
10.2 Leitung mit Beschaltung	417
10.2.1 Reflexionsfaktor	417
10.2.2 Schaltvorgänge auf verlustlosen Leitungen	418
10.2.3 Eingangsimpedanz, Widerstandstransformation	421
10.2.4 Spannungsübertragungsfaktor	421
10.2.5 RC-Leitung	422
10.3 Modellierung der Leitung in SPICE	426
10.4 Leitungsformen	429

10.4.1 Zweidrahtleitung .....	429
10.4.2 Koaxialkabel .....	431
10.4.3 Streifenleiter .....	433
10.4.4 Geschirmte Leitungen, Triaxialkabel .....	435
10.5 Verkoppelte Leitungen .....	436
10.5.1 Ersatzschaltung .....	436
10.5.2 Simulation verkoppelter Leitungen .....	437
10.5.3 Wellen in zwei gekoppelten Leitungen .....	440
10.6 Literaturverzeichnis .....	445
<b>11. Resonatoren und Filter .....</b>	<b>447</b>
11.1 Resonatoren und Filter mit RLC-Kombinationen .....	447
11.2 Leitungsresonatoren .....	448
11.3 Schwingquarze und Quarzfilter .....	451
11.3.1 Der piezoelektrische Effekt .....	451
11.3.2 Schwingquarze .....	452
11.3.3 Quarzfilter .....	461
11.4 Oberflächenwellenbauelemente .....	464
11.5 Dielektrische Resonatoren und Filter .....	467
11.6 Literaturverzeichnis .....	470
<b>12. Halbleiter .....</b>	<b>471</b>
12.1 Halbleitermaterialien, Leitungsmechanismen .....	471
12.2 Grundelemente des Bändermodells .....	475
12.2.1 Energiebänder, Bandschema .....	475
12.2.2 Zur Bandstruktur .....	479
12.2.3 Bloch-Wellen .....	482
12.3 Halbleiter im thermischen Gleichgewicht .....	487
12.3.1 Massenwirkungsgesetz .....	487
12.3.2 Zustandsdichte und Besetzungswahrscheinlichkeit .....	489
12.3.3 Dotierung .....	492
12.3.4 Ladungsträgerdichten im dotierten Halbleiter .....	494
12.3.5 Lage der Fermi-Energie .....	496
12.3.6 Stark dotierte Halbleiter .....	497
12.4 Halbleiter im Nichtgleichgewicht .....	500
12.4.1 Driftstrom .....	500
12.4.2 Diffusionsstrom .....	509
12.4.3 Generation und Rekombination .....	511
12.4.4 Grundgleichungen der Drift-Diffusions-Theorie .....	520
12.4.5 Abschirmung .....	528
12.4.6 Quasi-Fermipotential .....	530
12.4.7 Thermoelektrische Effekte .....	532
12.4.8 Galvanomagnetische Effekte .....	533
12.4.9 Piezoresistiver Effekt .....	536
12.5 Eigenschaften ausgewählter Halbleiter .....	538

12.5.1 Germanium .....	538
12.5.2 Silizium-Germanium .....	538
12.5.3 Siliziumkarbid (SiC) .....	541
12.5.4 III-V-Verbindungshalbleiter .....	543
12.6 Literaturverzeichnis .....	545
<b>13. Herstellung von Halbleiterbauelementen .....</b>	<b>549</b>
13.1 Herstellung von Silizium-Einkristallen, Wafer .....	549
13.2 Thermische Oxidation von Silizium .....	552
13.3 Schichtabscheidung .....	555
13.3.1 Abscheidung isolierender Schichten .....	555
13.3.2 Abscheiden von Siliziumschichten .....	556
13.4 Dotierung .....	558
13.4.1 Störstellendiffusion .....	558
13.4.2 Ionenimplantation .....	560
13.5 Strukturübertragung .....	563
13.5.1 Belichtung .....	564
13.5.2 Ätztechnik .....	567
13.6 Metallisierung .....	568
13.7 Layout, Design Rules .....	574
13.8 Integration passiver Bauelemente .....	576
13.8.1 Widerstände .....	576
13.8.2 Kondensatoren .....	579
13.8.3 Integrierte Induktivitäten .....	580
13.9 Kontaktierung und Packaging .....	582
13.9.1 Kontaktierung .....	582
13.9.2 Gehäuse .....	584
13.10 Literaturverzeichnis .....	585
<b>14. Kontakte .....</b>	<b>587</b>
14.1 PN-Übergang: Gleichbetrieb .....	587
14.1.1 Thermisches Gleichgewicht .....	587
14.1.2 Flußpolung .....	593
14.1.3 Diodenkennlinie, Parameterbestimmung .....	602
14.1.4 Arbeitspunkt bei Spannungssteuerung .....	605
14.1.5 Temperaturabhängigkeit .....	607
14.1.6 Sperrpolung, Durchbruch .....	611
14.1.7 Low-High Übergänge, Epitaxialdioden .....	617
14.2 PN-Übergänge: Speicherladungen, Schaltverhalten .....	620
14.2.1 Sperrschichtkapazität .....	620
14.2.2 Minoritätsspeicherladung, Diffusionskapazität .....	625
14.2.3 Schaltverhalten, Ladungssteuerungstheorie .....	627
14.3 PN-Übergänge: Kleinsignalmodell und Rauschverhalten .....	632
14.3.1 Quasistatische Beschreibung .....	632
14.3.2 HF-Diodenleitwert .....	636



14.3.3 Rauschen der pn-Diode .....	639
14.4 Großsignalmodell der pn-Diode .....	640
14.4.1 Ersatzschaltung und Modellanweisung .....	640
14.4.2 Modellgleichungen .....	642
14.4.3 Modellgenauigkeit und Bauteiltoleranzen .....	646
14.5 Heteroübergänge .....	648
14.5.1 Thermisches Gleichgewicht .....	649
14.5.2 Flußpolung .....	651
14.5.3 Sperrschichtkapazität .....	653
14.6 Metall-Halbleiter-Kontakte .....	654
14.6.1 Schottky-Kontakte im thermischen Gleichgewicht .....	654
14.6.2 Fluß- und Sperrpolung .....	657
14.6.3 Niederohmige Kontakte .....	660
14.6.4 Peltier-Effekt .....	662
14.7 MOS-Kondensatoren .....	663
14.7.1 Thermisches Gleichgewicht .....	664
14.7.2 Akkumulation .....	666
14.7.3 Inversion .....	667
14.7.4 Tiefe Verarmung (Deep Depletion) .....	673
14.7.5 Die Kapazität des MOS-Kondensators .....	674
14.7.6 Stromfluß durch das Gateoxid .....	675
14.8 Literaturverzeichnis .....	677
<b>15. Halbleiterdioden .....</b>	<b>679</b>
15.1 Gleichrichterdioden .....	679
15.1.1 Aufbau und elektrische Eigenschaften .....	679
15.1.2 Kenndaten, Grenzwerte .....	681
15.1.3 Parallel- und Reihenschaltung von Gleichrichterdioden .....	683
15.1.4 Einweggleichrichter .....	685
15.1.5 Zweipulsige Brückenschaltung .....	688
15.1.6 Spannungsvervielfacher .....	689
15.1.7 Spannungsbegrenzung, Freilaufdioden .....	690
15.1.8 Schalten induktiver Lasten .....	691
15.2 PIN-Dioden .....	692
15.2.1 Lange PIN-Dioden, Leistungsgleichrichter .....	693
15.2.2 Kurze PIN-Dioden .....	699
15.3 Schottky-Dioden .....	705
15.3.1 Ersatzschaltung .....	705
15.3.2 Schottky-Dioden für kleine Leistungen .....	707
15.3.3 Schottky-Dioden für große Leistungen .....	708
15.4 Z-Dioden .....	710
15.4.1 Kenngrößen, Modellierung .....	710
15.4.2 Spannungsstabilisierung, Spannungsreferenz .....	715
15.4.3 Überspannungsschutz .....	717
15.5 Varaktoren .....	719

15.5.1	Kapazitätsdioden, Eigenschaften .....	719
15.5.2	Anwendungen .....	724
15.5.3	Speichervariakoren, Step-recovery-Dioden .....	726
15.6	Tunneldioden .....	728
15.6.1	Kennlinie der Esaki-Diode .....	728
15.6.2	Kleinsignalbetrachtung .....	730
15.6.3	Oszillatoren mit Tunneldioden .....	731
15.6.4	Resonante Tunneldioden .....	733
15.7	Laufzeitdioden .....	735
15.7.1	IMPATT-Dioden .....	735
15.7.2	BARITT-Dioden .....	739
15.8	Gunn-Elemente .....	741
15.9	Literaturverzeichnis .....	745
<b>16.</b>	<b>Bipolartransistoren .....</b>	<b>747</b>
16.1	Einführung .....	747
16.2	Großsignalbeschreibung .....	754
16.2.1	Transferstrom, Basistransitzeit .....	755
16.2.2	Stromverstärkung .....	758
16.2.3	Elementares Großsignalmodell .....	759
16.2.4	Die Gummel'sche Transferstrom-Beziehung .....	764
16.2.5	SPICE-Modellanweisung .....	767
16.2.6	Kennlinien .....	767
16.2.7	Das Ebers-Moll-Modell .....	774
16.2.8	Temperaturabhängigkeit .....	775
16.2.9	Hochinjektion .....	778
16.3	Kleinsignalbeschreibung .....	785
16.3.1	Das elementare Kleinsignalmodell .....	785
16.3.2	NF-Hybridparameter .....	789
16.3.3	T-Ersatzschaltung .....	792
16.3.4	Transistorkapazitäten und Grenzfrequenzen .....	794
16.4	Rauschverhalten .....	806
16.4.1	Effektive Rauschquellen .....	807
16.4.2	Rauschzahl, Rauschanpassung .....	811
16.5	Sperrverhalten, Grenzdaten .....	812
16.5.1	Restströme .....	812
16.5.2	Grenzspannungen, Durchbrüche .....	813
16.5.3	Der sichere Arbeitsbereich .....	817
16.6	Heterostruktur-Bipolartransistoren (HBTs) .....	819
16.7	Einzeltransistoren .....	826
16.8	Integrierte Bipolartransistoren .....	831
16.8.1	Isolation der Kollektorbahngebiete .....	832
16.8.2	Herstellung von Emitter- und Basisbahngebiet .....	834
16.9	Literaturverzeichnis .....	842

<b>17. Grundsaltungen mit Bipolartransistoren</b>	845
17.1 Emitterschaltung	845
17.1.1 Arbeitspunkt, Verlustleistung, Gegenkopplung	845
17.1.2 Verlustleistung und Wirkungsgrad	850
17.1.3 Frequenzgang	851
17.1.4 Schaltbetrieb	855
17.1.5 Verzerrungen	863
17.1.6 Rauschen	865
17.1.7 Darlington-Schaltung	868
17.2 Kollektorschaltung (Emitterfolger)	870
17.2.1 Übertragungsfaktor, Ein- und Ausgangswiderstand	871
17.2.2 Frequenzgang	872
17.2.3 Komplementäre Endstufe	876
17.3 Basisschaltung	878
17.3.1 Kaskode	879
17.4 Diodenschaltung	880
17.5 Stromquellen	882
17.5.1 Einfache Stromspiegel	883
17.5.2 Wilson-Stromspiegel	885
17.5.3 Aktive Last	886
17.6 Differenzverstärker	888
17.6.1 Übertragungskennlinie	888
17.6.2 Differenz- und Gleichtaktverstärkung	891
17.6.3 Analog-Multiplizierer	893
17.6.4 Schmitt-Trigger	895
17.7 Bandabstandsreferenzen	897
17.8 Digitalschaltungen	899
17.8.1 TTL-Schaltungen	899
17.8.2 Emitter-Coupled Logic (ECL)	901
17.9 Literaturverzeichnis	908
<b>18. CAD-Modelle für Bipolartransistoren</b>	909
18.1 Gummel-Poon Modell	909
18.1.1 Ersatzschaltung und Modellanweisung	909
18.1.2 Transferstrom, Gummel-Poon-Ansatz	914
18.1.3 Stromverstärkung	916
18.1.4 Temperaturabhängigkeit	918
18.1.5 Bahnwiderstände	919
18.1.6 Parameterbestimmung	924
18.2 Komplexere Modelle für integrierte Bipolartransistoren	928
18.3 Literaturverzeichnis	932

<b>19. Thyristoren</b>	933
19.1 Rückwärtssperrende Thyristoren	934
19.1.1 Aufbau und Wirkungsweise	935
19.1.2 Herstellung von Thyristoren	938
19.1.3 Spannungs- und Stromgrenzwerte	940
19.1.4 Sperrvermögen	941
19.1.5 Zünden des Thyristors, Durchlaßzustand	944
19.1.6 Löschen des Thyristors	950
19.1.7 Parallel- und Reihenschaltung von Thyristoren	954
19.1.8 Phasenanschnittsteuerung mit Thyristoren	955
19.2 Sonderformen des Thyristors	956
19.2.1 Asymmetrisch sperrende Thyristoren, RCTs	956
19.2.2 Gate Turn-Off Thyristoren (GTO)	957
19.2.3 Überspannungsschutz mit Thyristoren	959
19.3 Modellierung von Thyristoren in PSPICE	960
19.4 DIACs und TRIACs	965
19.4.1 DIACs	965
19.4.2 TRIACs	966
19.5 Unijunctiontransistoren	969
19.6 Literaturverzeichnis	972
<b>20. MOS-Feldeffekttransistoren</b>	973
20.1 Einführung	973
20.1.1 MOSFET-Typen	974
20.1.2 Gegenüberstellung von Bipolartransistor und MOSFET	976
20.2 Der MOSFET in einfachster Näherung	978
20.2.1 Drainstrom	979
20.2.2 Geschwindigkeitssättigung	984
20.2.3 Substratsteuereffekt	987
20.2.4 Kennlinien im LEVEL1-Modell	989
20.2.5 NF-Kleinsignalbeschreibung	992
20.2.6 Transistorkapazitäten, Transitfrequenz	993
20.2.7 Der n-Kanal-MOSFET als Schalter	995
20.2.8 P-Kanal-MOSFETs	999
20.2.9 Temperaturverhalten	1002
20.3 Kanalimplantation, Buried-channel-MOSFETs	1004
20.3.1 Einstellen der Einsatzspannung	1004
20.3.2 Buried-channel-MOSFETs	1005
20.4 Mehr zur Physik des MOSFET	1009
20.4.1 Die Charge-sheet Näherung	1009
20.4.2 Langkanal-MOSFETs, Gradual-channel Näherung	1011
20.5 Elektrisches Verhalten von Kurzkanal-MOSFETs	1020
20.5.1 Einsatzspannung, Kurzkanaleffekte	1020
20.5.2 Kanallängenmodulation, Ausgangsleitwert	1022
20.5.3 Bahnwiderstände	1022

20.5.4	Gate Leakage, TDDb	1023
20.5.5	Source-Drain-Durchbruch	1025
20.5.6	Gate-Induced Drain Leakage (GIDL)	1028
20.5.7	Unterschwellströme, Drainreststrom	1029
20.6	Kleinsignalbeschreibung des MOSFET	1032
20.6.1	Kleinsignalersatzschaltung	1032
20.6.2	Rauschen	1037
20.7	MOSFETs in integrierten Schaltungen	1040
20.7.1	Herstellung integrierter CMOS-Bausteine	1040
20.7.2	Latchup	1044
20.7.3	Die Idee der Skalierung	1046
20.7.4	Degradation	1049
20.7.5	LDD-MOSFETs	1051
20.7.6	Gatedielektrikum	1053
20.7.7	Dotierstoffverteilung, Kurzkanaleffekte, Piezowiderstandseffekt	1054
20.7.8	SOI-MOSFETs, FinFETs	1056
20.8	Literaturverzeichnis	1060
<b>21.</b>	<b>Grundsaltungen mit MOSFETs</b>	<b>1063</b>
21.1	Grundsaltungen mit n-Kanal MOSFETs	1063
21.1.1	Sourceschaltung und nMOS-Inverter	1063
21.1.2	Drainschaltung (Sourcefolger) mit n-Kanal-MOSFET	1068
21.2	Statische CMOS-Logik	1071
21.2.1	Der CMOS-Inverter	1071
21.2.2	Logische Verknüpfungen in CMOS	1080
21.2.3	Transferrate	1083
21.2.4	Pseudo-nMOS-Logik	1087
21.2.5	Tristate-Treiber	1089
21.2.6	Treiben großer kapazitiver Lasten	1090
21.2.7	Flipflops	1091
21.2.8	Schmitt-Trigger	1094
21.3	Current-Mode Logik (MCML)	1096
21.4	Dynamische CMOS-Logik	1098
21.5	Stub-Series-Terminated Logic (SSTL)	1100
21.6	ESD-Schutzschaltungen	1101
21.7	Analogschaltungen	1102
21.7.1	Konstantstromquelle	1102
21.7.2	Stromspiegel, Konstantstromquellen	1103
21.7.3	Steuerbarer Widerstand	1105
21.7.4	Differenzverstärker mit Stromspiegellast	1106
21.8	BiCMOS	1111
21.9	Literaturverzeichnis	1113

<b>22. Speicherbausteine</b>	1115
22.1 SRAMs	1118
22.1.1 Single-port-SRAMs	1118
22.1.2 Schreib-Lese-Schaltung	1121
22.1.3 Dual-port-SRAMs	1122
22.1.4 CAM, Assoziativspeicher	1122
22.2 DRAMs	1124
22.2.1 Wortleitungstreiber (Boost-Schaltung)	1125
22.2.2 Dynamischer Leseverstärker	1128
22.2.3 Alpha-Teilchen, Störsicherheit	1130
22.2.4 Zur Technologie von DRAM-Bausteinen	1131
22.2.5 Refresh	1135
22.2.6 Adressierung, Zugriffszeiten	1136
22.2.7 Maßnahmen zur Verbesserung der Zugriffszeit	1137
22.3 ROM, PROM	1138
22.4 EPROMs, EEPROMs, Flash-Memory	1140
22.4.1 MOSFETs mit Floating Gate	1143
22.4.2 EPROMs, EEPROMs	1145
22.4.3 Flash-EPROMs	1147
22.4.4 Zur Schaltungstechnik	1148
22.5 Alternative Speicherkonzepte	1151
22.5.1 FRAM	1152
22.5.2 MRAM	1155
22.5.3 PRAM	1156
22.6 Literaturverzeichnis	1158
<b>23. MOS-Leistungsbaulemente</b>	1161
23.1 Vertikale Leistungs-MOSFETs	1162
23.1.1 Bauformen Vertikaler Leistungs-MOSFETs	1162
23.1.2 Einschaltwiderstand	1165
23.1.3 Kompensationsbauelemente, CoolMOS	1167
23.1.4 Eigenschaften, Kenndaten, Anwendungshinweise	1170
23.1.5 Schaltbetrieb	1171
23.2 Laterale DMOSFETs	1178
23.3 IGBTs	1180
23.4 MOS-gesteuerte Thyristoren (MCTs)	1186
23.5 Integration, Smart-Power ICs	1187
23.5.1 Hochvolt-CMOS-Prozeß	1187
23.5.2 BCDMOS-Prozeß	1188
23.5.3 SOI-Technologien	1189
23.6 Literaturverzeichnis	1189

<b>24. CAD-Modelle für MOSFETs</b>	1191
24.1 Einführung	1191
24.2 LEVEL 1-Modell	1193
24.3 LEVEL 3-Modell	1197
24.3.1 Einsatzspannung	1198
24.3.2 Effektive Beweglichkeit, Sättigungsgeschwindigkeit	1201
24.3.3 Sättigungsspannung	1203
24.3.4 Kanallängenmodulation	1203
24.3.5 Subthresholdstrom	1204
24.3.6 Transistorkapazitäten	1205
24.4 Weiterentwickelte MOS-Modelle	1209
24.4.1 Die BSIM-Modelle	1209
24.4.2 Charge-sheet Modelle	1210
24.5 Literaturverzeichnis	1214
<b>25. Sperrschichtfeldeffekttransistoren</b>	1215
25.1 Sperrschichtfeldeffekttransistoren (JFETs)	1215
25.1.1 Kennlinien des JFET	1216
25.1.2 Großsignalmodell, Beschreibung in SPICE	1221
25.1.3 Kleinsignalbeschreibung des JFET	1224
25.1.4 Verstärkerstufe mit n-Kanal-JFET in Sourceschaltung	1226
25.2 GaAs-MESFETs	1229
25.2.1 Anwendungen	1231
25.2.2 Dual-Gate-MESFETs	1233
25.2.3 SPICE-Modelle für MESFETs	1233
25.3 MODFETs	1236
25.4 Literaturverzeichnis	1240
<b>26. Grundlagen Optoelektronik</b>	1241
26.1 Licht	1241
26.1.1 Photonen	1242
26.1.2 Gruppengeschwindigkeit, Materialdispersion	1244
26.2 Strahlungsgrößen	1246
26.2.1 Radiometrische Strahlungsgrößen	1247
26.2.2 Fotometrische Strahlungsgrößen	1249
26.2.3 Das fotometrische Grundgesetz	1253
26.2.4 Brechung und Reflexion	1254
26.3 Farbsehen und Farbmimetrik	1256
26.4 Absorption und Dämpfung	1259
26.5 Lichtwellenleiter	1261
26.5.1 Dämpfung in Glasfasern	1262
26.5.2 Bandbreite-Länge-Produkt von Lichtwellenleitern	1263
26.5.3 Multimodefaser	1265
26.5.4 Gradientenfaser	1267
26.5.5 Monomodefaser	1268
26.6 Wärmestrahlung	1270
26.7 Literaturverzeichnis	1272

<b>27. Detektoren für optische Strahlung</b> .....	1273
27.1 Kenngrößen für Fotodetektoren .....	1273
27.2 Fotowiderstände (LDR) .....	1275
27.2.1 Mechanismen der Fotoleitung .....	1275
27.2.2 Leitwert und Empfindlichkeit .....	1276
27.2.3 Ansprechgeschwindigkeit und Rauschen .....	1278
27.2.4 Beispiele .....	1279
27.3 pin-Fotodioden .....	1283
27.3.1 Strom-Spannungs-Kennlinie und Empfindlichkeit .....	1283
27.3.2 Fotometrische Strahlungsmessung mit pin-Diode .....	1286
27.3.3 Beiträge zum Fotostrom, Quantenwirkungsgrad .....	1288
27.3.4 Ersatzschaltung der pin-Diode .....	1289
27.3.5 Ansprechgeschwindigkeit, Grenzfrequenz .....	1290
27.3.6 Realisierung von pin-Fotodioden .....	1292
27.3.7 Rauschen von pin-Fotodioden .....	1293
27.3.8 Unitravelling-carrier Fotodioden .....	1298
27.4 Avalanche-Fotodioden (APDs) .....	1299
27.5 Schottky-Fotodioden, MSM-Fotodioden .....	1303
27.6 Fotodioden mit lateraler Ortsauflösung .....	1304
27.7 Fototransistoren .....	1306
27.7.1 Frequenzverhalten .....	1308
27.7.2 Rauschen .....	1311
27.7.3 Heterostruktur-Fototransistoren .....	1312
27.8 Pyroelektrische IR-Detektoren .....	1312
27.9 Photomultiplier .....	1318
27.10 Farbsensoren .....	1319
27.11 Literaturverzeichnis .....	1319
<b>28. Solarzellen</b> .....	1321
28.1 Sonneneinstrahlung .....	1322
28.1.1 Direkte, Diffuse und Globale Sonneneinstrahlung .....	1323
28.2 Spektrale Empfindlichkeit .....	1328
28.3 Kenngrößen und Ersatzschaltung .....	1333
28.4 Einkristalline Solarzellen .....	1337
28.5 Polykristalline Siliziumsolarzellen .....	1347
28.6 Dünnschichtsolarzellen .....	1347
28.6.1 Amorphe Siliziumsolarzellen .....	1348
28.6.2 Heterostruktur-Dünnschicht-Solarzellen .....	1350
28.7 Solarzellenarrays .....	1353
28.8 Literaturverzeichnis .....	1355



<b>29. Lichtemittierende Dioden</b> .....	1357
<b>29.1 Leuchtdioden (LEDs)</b> .....	1357
29.1.1 Wirkungsweise und Kenndaten .....	1357
29.1.2 Modulation des ausgestrahlten Lichts .....	1362
29.1.3 Bauformen .....	1363
<b>29.2 Laserdioden</b> .....	1371
29.2.1 Prinzip des Lasers und Schwellenbedingung .....	1371
29.2.2 Abgestrahlte Leistung, Optischer Gewinn .....	1374
29.2.3 Temperaturabhängigkeit und Abstrahlcharakteristik .....	1376
29.2.4 Alterung .....	1378
29.2.5 Bilanzgleichungen, Großsignalmodell .....	1379
29.2.6 Kleinsignalbetrieb, Modulationsgrenzfrequenz .....	1384
29.2.7 Bauformen kantenemittierender Laserdioden .....	1387
29.2.8 VCSELs, Oberflächenemittierende Laserdioden .....	1389
<b>29.3 Optokoppler</b> .....	1391
29.3.1 Kenngrößen .....	1391
29.3.2 Frequenzverhalten, Ansprechgeschwindigkeit .....	1393
29.3.3 Galvanische Trennung .....	1396
29.3.4 Lichtschranken .....	1399
29.3.5 Modellierung in PSPICE .....	1400
<b>29.4 Literaturverzeichnis</b> .....	1402
 <b>30. Displays</b> .....	 1403
<b>30.1 Flüssigkristall-Anzeigen (LCDs)</b> .....	1403
30.1.1 Flüssigkristalle .....	1403
30.1.2 TN-Zelle .....	1405
30.1.3 STN-Zelle .....	1408
30.1.4 Reflektive Zellen .....	1409
30.1.5 Ansteuerung in Matrix-Displays .....	1410
30.1.6 Hintergrundbeleuchtung .....	1412
<b>30.2 Plasma-Displays</b> .....	1412
<b>30.3 Vakuum-Fluoreszenz- und Field-Emission Displays</b> .....	1415
<b>30.4 OLED-Displays</b> .....	1417
<b>30.5 Literaturverzeichnis</b> .....	1418
 <b>31. Bildwandler</b> .....	 1419
<b>31.1 Charge Coupled Devices</b> .....	1419
31.1.1 Surface Channel CCDs (SCCDs) .....	1419
31.1.2 Buried-channel CCDs (BCCDs) .....	1424
31.1.3 Ladungsbewertung .....	1427
31.1.4 CCD-Sensoren, Eigenschaften und Kenngrößen .....	1428
31.1.5 Bauformen und Beispiele .....	1433
<b>31.2 CMOS-Bildwandler</b> .....	1437
<b>31.3 Bildwandler für Farbbilder</b> .....	1440
<b>31.4 Literaturverzeichnis</b> .....	1441

<b>32. Sensorbauelemente</b> .....	1443
32.1 Temperatursensoren .....	1443
32.1.1 Widerstands-Temperatursensoren .....	1443
32.1.2 Temperaturmessung mit Heißeitern .....	1448
32.1.3 Halbleiter-Temperatursensoren .....	1449
32.1.4 Thermoelemente .....	1450
32.1.5 Thermopiles .....	1452
32.2 Magnetfeldsensoren .....	1453
32.2.1 Hall-Sensoren .....	1453
32.2.2 Magnetowiderstandssensoren .....	1455
32.3 Dehnungsmeßstreifen .....	1459
32.3.1 Metallfolien-DMS, Dünnschicht-DMS .....	1460
32.3.2 Halbleiter-DMS .....	1461
32.3.3 Brückenschaltung .....	1461
32.4 Drucksensoren .....	1462
32.4.1 DMS-Drucksensoren .....	1462
32.4.2 Piezoresistive, Silizium-Drucksensoren .....	1463
32.4.3 Kapazitive Drucksensoren .....	1463
32.5 Kapazitive Feuchtesensoren .....	1464
32.6 Detektoren für Ionisierende Strahlung .....	1465
32.6.1 Ionisationskammern, Zählrohre .....	1466
32.6.2 Halbleiterdetektoren .....	1467
32.7 Literaturverzeichnis .....	1468
<b>33. Batterien und Akkumulatoren</b> .....	1469
33.1 Elektrochemische Zellen .....	1469
33.1.1 Grundprinzipien .....	1469
33.1.2 Elektrodenprozesse .....	1472
33.1.3 Kenngrößen, Spezifische Energie, Leistungsabgabe .....	1476
33.1.4 Reihen- und Parallelschaltung .....	1480
33.1.5 Betrieb mit Solarzellen .....	1482
33.2 Ultracaps .....	1482
33.3 Brennstoffzellen .....	1485
33.4 Literaturverzeichnis .....	1487