

# Inhaltsverzeichnis

<b>1. Grundlagen</b>	1
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>	51
2.1 Transistoren als Verstärker und Schalter	51
2.2 Kleinsignalanalyse, Vierpolkenngrößen	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 Bauteilkenngrößen .....	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 Halbleiter .....	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 Dämpfungserlen .....	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.</b>	<b>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.</b>	<b>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-Fermipotentiale .....	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.</b>	<b>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	Kenngößen, 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	Speichervariaktoren, 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	Transfergate	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 Kompensationsbaulemente, 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 Farbmetrik .....	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
29.1 Leuchtdioden (LEDs) .....	1357
29.1.1 Wirkungsweise und Kenndaten .....	1357
29.1.2 Modulation des ausgestrahlten Lichts .....	1362
29.1.3 Bauformen .....	1363
29.2 Laserdioden .....	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
29.3 Optokoppler .....	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
29.4 Literaturverzeichnis .....	1402
<b>30. Displays</b> .....	1403
30.1 Flüssigkristall-Anzeigen (LCDs) .....	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
30.2 Plasma-Displays .....	1412
30.3 Vakuum-Fluoreszenz- und Field-Emission Displays .....	1415
30.4 OLED-Displays .....	1417
30.5 Literaturverzeichnis .....	1418
<b>31. Bildwandler</b> .....	1419
31.1 Charge Coupled Devices .....	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
31.2 CMOS-Bildwandler .....	1437
31.3 Bildwandler für Farbbilder .....	1440
31.4 Literaturverzeichnis .....	1441



<b>32. Sensorbauelemente</b> .....	1443
32.1 Temperatursensoren .....	1443
32.1.1 Widerstands-Temperatursensoren .....	1443
32.1.2 Temperaturmessung mit Heißeleitern .....	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