
Inhaltsverzeichnis

1	Einführung	1
1.1	Motivation für die analoge Schaltungstechnik	1
1.2	Wichtige Grundbegriffe	3
2	Entwicklungs- und Analysemethodik	9
2.1	Methodik zur Elektroniksystementwicklung	9
2.1.1	Prozessablauf bei der Elektroniksystementwicklung	10
2.1.2	Beispiele für Anwendungen der analogen Schaltungstechnik	15
2.1.3	Technologien zur Realisierung von Schaltungen	18
2.1.4	Strukturierung der Schaltungstechnik	20
2.1.5	Prozessablauf bei der Schaltungsentwicklung	25
2.2	Schaltungsanalyse mit PSpice	28
2.2.1	Prozessablauf bei der Schaltkreissimulation	29
2.2.2	Beschreibung und Analyse einer Testanordnung	34
2.2.3	DC/AC/TR-Analyse dargestellt an einer Beispielschaltung	44
2.3	Abschätzanalyse	56
2.3.1	Zur Systematik bei der Abschätzanalyse	56
2.3.2	Frequenzbereichsanalyse – Bodediagramm	60
2.4	Wärmeflussanalyse	71
2.5	Die Hardwarebeschreibungssprache VHDL-AMS	76
3	Modelle von Halbleiterbauelementen	93
3.1	Modellbeschreibungen von Dioden	93
3.1.1	Modellbeschreibungen einer Diode für die Schaltkreissimulation	93
3.1.2	Vereinfachte Modelle für die Abschätzanalyse	102
3.1.3	Modellbeschreibung einer Diode in VHDL-AMS	104
3.2	Grundlagen des Rauschens	105
3.2.1	Zur Beschreibung von Rauschgrößen	105
3.2.2	Modellierung von Rauschquellen	108

3.3	Modellbeschreibungen für Bipolartransistoren	112
3.3.1	Wichtige Kennlinien eines Bipolartransistors	112
3.3.2	Physikalischer Aufbau und Grundmodell	117
3.3.3	DC-Modellvarianten für die Abschätzanalyse	125
3.3.4	AC-Modellvarianten für die Abschätzanalyse	127
3.3.5	Rauschen eines BJT-Verstärkers	129
3.3.6	Gummel-Poon Modell	132
3.3.7	Verhaltensmodell in VHDL-AMS	137
3.4	Modellbeschreibungen von Feldeffekttransistoren	140
3.4.1	Aufbau, Eigenschaften und Kennlinien von Sperrschicht-FETs	140
3.4.2	AC-Modell und Rauschen von Sperrschicht-FETs	145
3.4.3	Aufbau, Eigenschaften und Kennlinien von Isolierschicht-FETs	147
3.4.4	Grundmodell eines Isolierschicht-FETs	151
3.4.5	AC-Modell und Rauschen von Isolierschicht-FETs	152
3.4.6	MOSFET-Level-i Modelle	153
3.4.7	Verhaltensmodell in VHDL-AMS	155
4	Grundlegende Funktionsprimitive	159
4.1	Passive Funktionsgrundsaltungen	159
4.1.1	Funktionsgrundsaltungen mit Spannungsteilern	159
4.1.2	Übertrager	163
4.1.3	RC-Resonator	165
4.1.4	LC-Resonatoren	166
4.1.5	Angepasster Tiefpass/Hochpass	172
4.2	Funktionsgrundsaltungen mit Dioden	173
4.2.1	Gleichrichterschaltungen und Spannungsvervielfacher	174
4.2.2	Anwendungen der Diode als Spannungsquelle	181
4.2.3	Signaldetektorschaltungen	182
4.2.4	Begrenzer-, Klemm- und Schutzschaltungen	190
4.2.5	Wirkprinzip von Schaltnetzteilen	194
5	Linearverstärker und Operationsverstärker	199
5.1	Eigenschaften von Linearverstärkern – Makromodelle	199
5.1.1	Grundmodell eines Linearverstärkers	199
5.1.2	Schnittstellenverhalten	205
5.1.3	Aussteuergrenzen eines Linearverstärkers	207
5.1.4	Rauschen von Verstärkern	210
5.2	Rückgekoppelte Linearverstärker	216
5.2.1	Rückkopplung allgemein und Schwingbedingung	216
5.2.2	Frequenzgang des rückgekoppelten Systems	221
5.2.3	Seriengengekoppelte LV mit gesteuerter Spannungsquelle	224
5.2.4	Seriengengekoppelte LV mit gesteuerter Stromquelle	226

5.2.5	Parallelgegekoppelte LV mit gesteuerter Spannungsquelle	228
5.2.6	Parallelgegekoppelte LV mit gesteuerter Stromquelle	232
5.3	Stabilität und Frequenzgangkorrektur von LV	234
5.3.1	Analyse der Schleifenverstärkung	234
5.3.2	Frequenzgangkorrektur des Geradeausverstärkers	236
5.3.3	Frequenzgangkorrektur am Rückkopplungsnetzwerk	240
5.4	Operationsverstärker	246
5.4.1	Erweiterung des Makromodells	246
5.4.2	Gleichtaktunterdrückung und Aussteuergrenzen von OPs	253
5.4.3	Einflüsse der DC-Parameter auf die Ausgangsoffsetspannung	257
5.4.4	Rauschen von OP-Verstärkern	260
5.4.5	Slew-Rate Verhalten eines OP-Verstärkers	261
5.5	OP-Verstärkeranwendungen	265
5.5.1	Instrumentenverstärker	265
5.5.2	Sensorverstärker	265
5.5.3	Treppengenerator	267
5.5.4	Kompressor/Expander-Verstärker	268
5.5.5	Aktive Signaldetektoren	269
5.5.6	Tachometerschaltung zur analogen Frequenzbestimmung	271
5.5.7	Analoge Filterschaltungen	272
5.5.8	Virtuelle Induktivität	274
5.5.9	Schmitt-Trigger	276
5.5.10	Astabiler Multivibrator	278
5.5.11	Negative-Impedance-Converter	279
6	Funktionsgrundsaltungen mit BJTs	281
6.1	Vorgehensweise bei der Abschätzanalyse	281
6.1.1	Vorgehensweise bei der DC-Analyse	281
6.1.2	Vorgehensweise bei der AC-Analyse	282
6.1.3	Seriengegekoppelter Transistor	284
6.1.4	Parallelgegekoppelter Transistor	286
6.2	Arbeitspunkteinstellung und Stabilität	288
6.2.1	Schaltungsvarianten zur Arbeitspunkteinstellung	288
6.2.2	Arbeitspunktbestimmung und Arbeitspunktstabilität	294
6.3	Wichtige Funktionsprimitive mit BJTs	302
6.3.1	RC-Verstärker in Emittergrundschaltung	302
6.3.2	RC-Verstärker in Basisgrundschaltung	310
6.3.3	Emitterfolger	315
6.3.4	Der Bipolartransistor als Spannungsquelle	320
6.3.5	Der Bipolartransistor als Stromquelle	322
6.3.6	Darlingtonstufen	324
6.3.7	Kaskode-Schaltung	328
6.3.8	Verstärker mit Stromquelle als Last	330

6.4	Differenzstufen mit BJTs	334
6.4.1	Emittergekoppelte Differenzstufen	334
6.4.2	Basisgekoppelte Differenzstufen	347
6.4.3	Differenzstufen in Kaskodeschaltung	356
6.5	Schalteranwendungen des Bipolartransistors	359
6.5.1	Spannungsgesteuerter Schalter	359
6.5.2	Gegentaktschalter	365
6.6	Weitere Funktionsprimitive mit BJTs	366
6.6.1	Logarithmischer Verstärker	366
6.6.2	Konstantstromquellen	367
6.6.3	Konstantspannungsquellen	374
6.6.4	Schaltungsbeispiele zur Potenzialverschiebung	377
7	Funktionsgrundschaltungen mit FETs	381
7.1	Vorgehensweise bei der Abschätzanalyse	381
7.1.1	Vorgehensweise bei der DC-Analyse	381
7.1.2	Vorgehensweise bei der AC-Analyse	382
7.2	Arbeitspunkteinstellung und Arbeitspunktstabilität	383
7.3	Grundschaltungen mit Feldeffekttransistoren	391
7.3.1	Verstärkerschaltungen mit Feldeffekttransistoren	391
7.3.2	Anwendung des Linearbetriebs von Feldeffekttransistoren	402
7.3.3	Differenzstufen mit Feldeffekttransistoren	406
7.4	Digitale Anwendungsschaltungen mit MOSFETs	410
7.4.1	NMOS-Inverter	410
7.4.2	CMOS-Inverter	417
7.4.3	Schalter-Kondensator-Technik	425
8	Funktionsschaltungen für Systemanwendungen	431
8.1	Treiberstufen	431
8.1.1	Treiberstufen im A-Betrieb	432
8.1.2	Komplementäre Emitterfolger im AB-Betrieb	438
8.1.3	Klasse D Verstärker	443
8.2	Linearverstärker auf Transistorebene	445
8.2.1	OP-Verstärker μ A741– Abschätzanalyse	445
8.2.2	Zweistufiger Linearverstärker mit BJTs	449
8.2.3	Regelverstärker mit BJTs	456
8.3	Beispielschaltungen der Kommunikationselektronik	458
8.3.1	Oszillatorschaltung – AM/FM modulierbar	459
8.3.2	Spannungsgesteuerter Oszillator – VCO	465
8.3.3	Phasenvergleichler	467
8.3.4	Doppelgegentakt-Mischer	470
8.3.5	Schaltungen zur digitalen Modulation	472
8.3.6	Bestandteile eines Funkempfängers	481

8.4	PLL-Schaltkreise	484
8.4.1	Aufbau und Wirkungsprinzip	485
8.4.2	Funktionsbausteine einer PLL	487
8.4.3	Systemverhalten	500
8.4.4	Anwendungen	509
8.5	Beispiele von Sensorschaltungen	512
8.5.1	Optischer Empfänger als Photodetektor	512
8.5.2	Induktiver Abstandssensor	514
8.6	Sekundär getaktetes Schaltnetzteil	517
9	Analog/Digitale Schnittstelle	521
9.1	Zur Charakterisierung einer Logikfunktion	521
9.1.1	Modellbeschreibung einer Logikfunktion	522
9.1.2	Ereignissteuerung	529
9.1.3	Entsprechungen zwischen Schematic- und VHDL-Beschreibung ...	533
9.2	Digital/Analog Wandlung	533
9.3	Abtastung analoger Signale	537
9.3.1	Abtasttheorem	538
9.3.2	Quantisierungsrauschen	539
9.3.3	Abtasthalteschaltungen	540
9.4	Analog/Digital Wandlung	543
9.4.1	Zählverfahren	543
9.4.2	Sukzessive Approximationsverfahren	546
9.4.3	Parallelverfahren	550
9.5	Delta-Sigma Wandler	554
9.5.1	Zum Aufbau von Delta-Sigma Wandlern	554
9.5.2	Rauschverhalten und Rauschformung	561
10	Schaltungsintegration	565
10.1	Mikroelektronische Prozesstechnologie	566
10.1.1	Planartechnik	568
10.1.2	Prinzipieller Herstellungsablauf	570
10.1.3	Strukturierung mit Lithografie	570
10.1.4	CMOS-Prozessfolge	571
10.1.5	Realisierung von Dielektrika, Oxid-Schichten	579
10.1.6	Dotierverfahren, Diffusion, Ionenimplantation	581
10.1.7	Abtragen von Schichten, Ätzen, Polieren	582
10.1.8	Polykristallines Silizium (Poly-Si)	582
10.1.9	Metallisierung	583
10.2	CMOS-Varianten	584
10.2.1	Latchup-Effekt	587
10.2.2	Wirkelemente im CMOS-Querschnitt	589
10.2.3	CMOS-Standardprozess	590

10.3	Layout	591
10.3.1	Layout-Regeln	591
10.4	Integrierte Widerstände	595
10.4.1	Widerstände, Elektrische Eigenschaften	595
10.4.2	Ausführungsvarianten, Widerstandstypen	597
10.4.3	Zusammenfassung	599
10.4.4	Kontaktwiderstände	600
10.5	Entwurfszentrierung, Toleranzverhalten, Matching	600
10.5.1	Entwurfszentrierung	600
10.5.2	Toleranzverhalten, Matching	602
10.5.3	Common-Centroid-Layout	603
10.5.4	Layout-Strukturen	606
10.5.5	Design-Empfehlungen	606
10.6	Kapazitäten	608
10.6.1	POLY-POLY Kondensator	611
10.6.2	Multi Metall Kondensator	613
10.6.3	Zusammenfassung	615
10.7	Integrierte Induktivitäten	615
10.8	Integrierte Leitungen	616
10.8.1	Allgemeines Leitungsmodell	616
10.8.2	Modell der integrierten Leitung	617
10.8.3	Beispiel einer typischen Signalleitung	619
10.8.4	Leitungskopplung	621
10.8.5	Zusammenfassung	622
10.9	Signal-Übertragung, „Elmore-Delay“	622
10.9.1	Konventionelle Definitionen	622
10.9.2	„Elmore-Delay“	623
10.10	Integrierte MOS-Feldeffekttransistoren	629
10.10.1	NMOS-FET Aufbau und Modell (DC)	630
10.10.2	Zusammenfassung: NMOS-Modell Level 1	635
10.10.3	PMOS-FET Aufbau und Modell (DC)	635
10.10.4	Zusammenfassung: PMOS-Modell Level 1	637
10.11	Modellerweiterungen für integrierte MOSFETs	637
10.11.1	Body Effekt (Substratsteuereffekt)	637
10.11.2	Temperaturverhalten	638
10.11.3	Subthreshold (Unterschwellstrom) Verhalten	638
10.11.4	Kurzkanal Effekte	639
10.11.5	SPICE DC-Modell	642
10.11.6	Vergleich Lang-, Kurzkanal-Transistoren und MOS-Modelle ...	643
10.11.7	Kapazitätsmodell	645
10.11.8	Kapazitäts-Parameter im SPICE Modell	648
10.11.9	Dynamisches SPICE-Großsignalmodell	648

10.11.10	Kleinsignal- (AC-) Modell	649
10.11.11	MOS-FET Layout	650
10.12	Digitale Basiszellen	651
10.12.1	Allgemeines Schaltermodell des MOS-FET (switch model)	651
10.12.2	Logik-Schaltermodell des MOS-FET (logic switch model), (Tab. 10.11)	652
10.12.3	Komplentäre Schaltungsstruktur bei CMOS Logikgattern	652
10.12.4	Beispiele von CMOS Logikgattern	654
10.12.5	Dimensionierung von CMOS Logikgattern	657
10.12.6	Dimensionierung beliebiger Logikgatter	661
10.12.7	Ein-, Ausgangs-, Lastkapazitäten	662
10.12.8	Verlustleistung	663
10.12.9	Transmission-Gate (CMOS-Signalschalter)	664
10.12.10	Transfer-Gate (MOS-Signalschalter)	666
10.12.11	Multiplexer	667
10.12.12	D-Flip-Flop	667
10.13	Design einer digitalen Zellbibliothek	670
10.13.1	Konzept, Vorüberlegungen zur Zell-Geometrie	671
10.13.2	Standard-Inverter <i>inv1</i>	672
10.13.3	Ringoszillator <i>ringo5</i>	681
10.13.4	NAND-Standardzelle <i>nand2</i>	683
10.13.5	NOR-Standardzelle <i>nor2</i>	687
10.13.6	D-Flip-Flop Standard-, Makro-Zelle (Kompaktdesign) <i>dff1</i>	690
10.13.7	Zusammenfassung, Datenblätter	696
Literaturverzeichnis		699
Sachverzeichnis		701