

Johann Siegl • Edgar Zocher

Schaltungstechnik – Analog und gemischt analog/digital

Entwicklungsmethodik,
Funktionsschaltungen,
Funktionsprimitive von Schaltkreisen

s

5., neu bearbeitete und erweiterte Auflage

**Mit Download-Möglichkeit von ca. 300 PSpice- und
VHDL-AMS-Beispielen**

Springer Vieweg

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	IIC-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 – Makromodeile	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	Parallelgeengekoppelte LV mit gesteuerter Spannungsquelle.....	228
5.2.6	Parallelgeengekoppelte 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	Apaloge 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	Funktionsgrundschaltungen 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	Seriengeengekoppelter Transistor	284
6.1.4	Parallelgeengekoppelter 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 Emitttergrundschaltung	L. 302
6.3.2	RC-Verstärker in Basisgrundschaltung	t.. 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	S.. 324
6.3.7	Kaskode-Schaltung	!.. 328
6.3.8	Verstärker mit Stromquelle als Last	!.. 330

6.4	Differenzstufen mit BJTs	I	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 xA741-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	i	459
8.3.2	Spannungsgesteuerter Oszillator – VCO		465
8.3.3	Phasenvergleich	;	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	j...	533
9.2	Digital/Analog Wandlung	•	533
9.3	Abtastung analoger Signale	j...	537
9.3.1	Abtasttheorem	••	538
9.3.2	Quantisierungsrauschen	539
9.3.3	Abtasthalteschaltungen	j...	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	CMÖS-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	i	591
10.3.1	Layout-Regeln		591
10.4	Integrierte Widerstände	i	595
10.4.1	Widerstände, Elektrische Eigenschaften	:	595
10.4.2	Ausführungsvarianten, Widerstandstypen.....	i	597
10.4.3	Zusammenfassung		599
10.4.4	Kontaktwiderstände	:	600
10.5	Entwurfszentrierung, Toleranzverhalten, Matching		600
10.5.1	Entwurfszentrierung	i	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	i	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	Kürzkanal Effekte		639
10.11.5	SPICE DC-Modell	!	642
10.11.6	Vergleich Lang-, Kurzkanal-Transistoren und MOS-Modelle ...		643
10.11.7	Kapazitätsmodell	j	645
10.11.8	Kapazitäts-Parameter im SPICE Modell	!	648
10.11.9	Dynamisches SPICE-Großsignalmodell	J	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	Komplētäre 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>invl</i>	672
10.13.3	^ Ringoszillator <i>ringo5</i> ! ..	681
10.13.4	NAND-Standardzelle <i>nandl</i>	683
10.13.5	NOR-Standardzelle <i>norl</i>	687
10.13.6	D-Flip-Flop Standard-, Makro-Zelle (Kompaktdesign) <i>dffl</i>	690
10.13.7	Zusammenfassung, Datenblätter !	696
Literaturverzeichnis		699
Sachverzeichnis		701