

# Inhaltsverzeichnis

<b>1. Einführung</b> .....	<b>1</b>
1.1 Motivation für die analoge Schaltungstechnik .....	1
1.2 Wichtige Grundbegriffe .....	3
<b>2. Entwicklungs- und Analysemethodik</b> .....	<b>9</b>
2.1 Methodik zur Elektroniksystementwicklung .....	9
2.1.1 Prozessablauf bei der Elektroniksystementwicklung .....	9
2.1.2 Beispiele für Anwendungen der analogen Schaltungstechnik .....	15
2.1.3 Technologien zur Realisierung von Schaltungen .....	20
2.1.4 Strukturierung der Schaltungstechnik .....	21
2.1.5 Prozessablauf bei der Schaltungsentwicklung .....	27
2.2 Schaltungsanalyse mit PSpice .....	31
2.2.1 Prozessablauf bei der Schaltkreissimulation .....	31
2.2.2 Beschreibung und Analyse einer Testanordnung .....	37
2.2.3 DC/AC/TR-Analyse dargestellt an einer Beispielschaltung .....	48
2.2.4 Analyse einer nichtlinearen Schaltung im Arbeitspunkt .....	60
2.2.5 Detektorschaltung mit Arbeitspunkteinstellung .....	63
2.3 Abschätzanalyse .....	66
2.3.1 Zur Systematik bei der Abschätzanalyse .....	66
2.3.2 Frequenzbereichsanalyse – Bodediagramm .....	70
2.4 Wärmeflussanalyse .....	83
2.5 Die Hardwarebeschreibungssprache VHDL-AMS .....	89
<b>3. Modelle von Halbleiterbauelementen</b> .....	<b>105</b>
3.1 Modellbeschreibungen von Dioden .....	105
3.1.1 Modellbeschreibungen einer Diode für die Schaltkreissimulation .....	105
3.1.2 Vereinfachte Modelle für die Abschätzanalyse .....	115
3.1.3 Modellbeschreibung einer Diode in VHDL-AMS .....	116
3.2 Grundlagen des Rauschens .....	117
3.2.1 Zur Beschreibung von Rauschgrößen .....	118
3.2.2 Modellierung von Rauschquellen .....	121
3.3 Modellbeschreibungen für Bipolartransistoren .....	127
3.3.1 Wichtige Kennlinien eines Bipolartransistors .....	127

---

3.3.2	Physikalischer Aufbau und Grundmodell . . . . .	132
3.3.3	DC-Modellvarianten für die Abschätzanalyse . . . . .	139
3.3.4	AC-Modellvarianten für die Abschätzanalyse . . . . .	142
3.3.5	Rauschen eines BJT-Verstärkers . . . . .	144
3.3.6	Gummel-Poon Modell . . . . .	147
3.3.7	Verhaltensmodell in VHDL-AMS . . . . .	152
<b>3.4</b>	<b>Modellbeschreibungen von Feldeffekttransistoren . . . . .</b>	<b>155</b>
3.4.1	Aufbau, Eigenschaften und Kennlinien von Sperrschicht-FETs . . . . .	155
3.4.2	AC-Modell und Rauschen von Sperrschicht-FETs . . . . .	162
3.4.3	Aufbau, Eigenschaften und Kennlinien von Isolierschicht-FETs . . . . .	163
3.4.4	Grundmodell eines Isolierschicht-FETs . . . . .	167
3.4.5	AC-Modell und Rauschen von Isolierschicht-FETs . . . . .	169
3.4.6	MOSFET-Level-i Modelle . . . . .	170
3.4.7	Verhaltensmodell in VHDL-AMS . . . . .	172
<b>4</b>	<b>Grundlegende Funktionsprimitive . . . . .</b>	<b>175</b>
<b>4.1</b>	<b>Passive Funktionsgrundschaltungen . . . . .</b>	<b>175</b>
4.1.1	Passiver Integrator und Differenziator . . . . .	175
4.1.2	Kapazitiver Spannungsteiler . . . . .	177
4.1.3	Frequenzkompensierter Spannungsteiler . . . . .	178
4.1.4	Übertrager . . . . .	181
4.1.5	RC-Resonator . . . . .	182
4.1.6	LC-Resonatoren . . . . .	184
4.1.7	Angepasster Tiefpass/Hochpass . . . . .	190
<b>4.2</b>	<b>Funktionsgrundschaltungen mit Dioden . . . . .</b>	<b>192</b>
4.2.1	Gleichrichterschaltungen und Spannungsvervielfacher . . . . .	192
4.2.2	Anwendungen der Diode als Spannungsquelle . . . . .	200
4.2.3	Signaldetektorschaltungen . . . . .	201
4.2.4	Begrenzer-, Klemm- und Schutzschaltungen . . . . .	210
4.2.5	Wirkprinzip von Schaltnetzteilen . . . . .	214
<b>5</b>	<b>Linearverstärker . . . . .</b>	<b>219</b>
<b>5.1</b>	<b>Eigenschaften von Linearverstärkern und Makromodelle . . . . .</b>	<b>219</b>
5.1.1	Grundmodell eines Linearverstärkers . . . . .	219
5.1.2	Schnittstellenverhalten . . . . .	226
5.1.3	Aussteuergrenzen eines Linearverstärkers . . . . .	228
5.1.4	Rauschen von Verstärkern . . . . .	232
<b>5.2</b>	<b>Rückgekoppelte Linearverstärker . . . . .</b>	<b>237</b>
5.2.1	Rückkopplung allgemein und Schwingbedingung . . . . .	238
5.2.2	Frequenzgang des rückgekoppelten Systems . . . . .	244
5.2.3	Seriengegekoppelte LV mit gesteuerter Spannungsquelle . . . . .	247

5.2.4	Seriengegekoppelte LV mit gesteuerter Stromquelle . . . . .	250
5.2.5	Parallelgegekoppelte LV mit gesteuerter Spannungsquelle . . . . .	252
5.2.6	Parallelgegekoppelte LV mit gesteuerter Stromquelle . . . . .	256
<b>5.3</b>	<b>Stabilität und Frequenzgangkorrektur von LV . . . . .</b>	<b>258</b>
5.3.1	Analyse der Schleifenverstärkung . . . . .	259
5.3.2	Frequenzgangkorrektur des Geradeausverstärkers . . . . .	260
5.3.3	Frequenzgangkorrektur am Rückkopplungsnetzwerk . . . . .	266
<b>5.4</b>	<b>Operationsverstärker . . . . .</b>	<b>273</b>
5.4.1	Erweiterung des Makromodells . . . . .	273
5.4.2	Gleichtaktunterdrückung und Aussteuergrenzen von OPs . . . . .	280
5.4.3	Einflüsse der DC-Parameter auf die Ausgangsoffsetspannung . . . . .	284
5.4.4	Rauschen von OP-Verstärkern . . . . .	287
5.4.5	Slew-Rate Verhalten eines OP-Verstärkers . . . . .	289
<b>5.5</b>	<b>OP-Verstärkeranwendungen . . . . .</b>	<b>293</b>
5.5.1	Instrumentenverstärker . . . . .	293
5.5.2	Sensorverstärker . . . . .	294
5.5.3	Treppengenerator . . . . .	295
5.5.4	Kompressor/Expander-Verstärker . . . . .	297
5.5.5	Aktive Signaldetektoren . . . . .	298
5.5.6	Tachometerschaltung zur analogen Frequenzbestimmung . . . . .	299
5.5.7	Analoge Filterschaltungen . . . . .	300
5.5.8	Virtuelle Induktivität . . . . .	305
5.5.9	Schmitt-Trigger . . . . .	306
5.5.10	Astabiler Multivibrator . . . . .	308
5.5.11	Negative-Impedance-Converter . . . . .	309
<b>6.</b>	<b>Funktionsschaltungen mit Bipolartransistoren . . . . .</b>	<b>311</b>
<b>6.1</b>	<b>Vorgehensweise bei der Abschätzanalyse . . . . .</b>	<b>311</b>
6.1.1	Vorgehensweise bei der DC-Analyse . . . . .	311
6.1.2	Vorgehensweise bei der AC-Analyse . . . . .	312
6.1.3	Seriengegekoppelter Transistor . . . . .	313
6.1.4	Parallelgegekoppelter Transistor . . . . .	316
<b>6.2</b>	<b>Arbeitspunkteinstellung und Stabilität . . . . .</b>	<b>318</b>
6.2.1	Schaltungsvarianten zur Arbeitspunkteinstellung . . . . .	319
6.2.2	Arbeitspunktbestimmung und Arbeitspunktstabilität . . . . .	324
<b>6.3</b>	<b>Wichtige Funktionsprimitive mit BJTs . . . . .</b>	<b>333</b>
6.3.1	RC-Verstärker in Emittergrundsaltung . . . . .	333
6.3.2	RC-Verstärker in Basisgrundsaltung . . . . .	342
6.3.3	Emitterfolger . . . . .	348
6.3.4	Der Bipolartransistor als Spannungsquelle . . . . .	352

6.3.5	Der Bipolartransistor als Stromquelle . . . . .	354
6.3.6	Darlingtonstufen . . . . .	357
6.3.7	Kaskode-Schaltung . . . . .	362
6.3.8	Verstärker mit Stromquelle als Last . . . . .	365
<b>6.4</b>	<b>Schalteranwendungen des Bipolartransistors. . . . .</b>	<b>368</b>
6.4.1	Spannungsgesteuerter Schalter . . . . .	368
6.4.2	Gegentaktschalter . . . . .	374
<b>6.5</b>	<b>Beispiele von Funktionsschaltungen . . . . .</b>	<b>378</b>
6.5.1	Logarithmischer Verstärker. . . . .	378
6.5.2	Optischer Empfänger. . . . .	380
6.5.3	AM/FM-modulierbarer Oszillator. . . . .	382
<b>7</b>	<b>Funktionsschaltungen mit FETs . . . . .</b>	<b>391</b>
<b>7.1</b>	<b>Vorgehensweise bei der Abschätzanalyse . . . . .</b>	<b>391</b>
7.1.1	Vorgehensweise bei der DC-Analyse . . . . .	392
7.1.2	Vorgehensweise bei der AC-Analyse . . . . .	392
<b>7.2</b>	<b>Arbeitspunkteinstellung und Arbeitspunktstabilität . . . . .</b>	<b>393</b>
<b>7.3</b>	<b>Anwendungsschaltungen mit Feldeffekttransistoren. . . . .</b>	<b>401</b>
7.3.1	Verstärkerschaltungen mit Feldeffekttransistoren. . . . .	402
7.3.2	Anwendung des Linearbetriebs von Feldeffekttransistoren . . . . .	414
<b>7.4</b>	<b>Digitale Anwendungsschaltungen mit MOSFETs . . . . .</b>	<b>419</b>
7.4.1	NMOS-Inverter . . . . .	419
7.4.2	CMOS-Inverter . . . . .	428
7.4.3	Schalter-Kondensator-Technik . . . . .	438
<b>7.5</b>	<b>Beispiele von Funktionsschaltungen . . . . .</b>	<b>443</b>
7.5.1	Spannungsgesteuerter Oszillator . . . . .	443
7.5.2	Phasenvergleich . . . . .	445
7.5.3	Induktiver Abstandssensor . . . . .	448
7.5.4	Sekundär getaktetes Schaltnetzteil . . . . .	452
<b>8</b>	<b>Gemischte Funktionsprimitive und Funktionsschaltungen 455</b>	
<b>8.1</b>	<b>Differenzstufen. . . . .</b>	<b>455</b>
8.1.1	Emittergekoppelte Differenzstufen . . . . .	455
8.1.2	Basisgekoppelte Differenzstufen. . . . .	469
8.1.3	Differenzstufen in Kaskodeschaltung . . . . .	480
8.1.4	Differenzstufen mit Feldeffekttransistoren . . . . .	484
<b>8.2</b>	<b>Konstantstrom- und Konstantspannungsquellen. . . . .</b>	<b>489</b>
8.2.1	Konstantstromquellen . . . . .	489
8.2.2	Konstantspannungsquellen . . . . .	496
<b>8.3</b>	<b>Schaltungsbeispiele zur Potenzialverschiebung . . . . .</b>	<b>499</b>

---

<b>8.4</b>	<b>Schaltungsbeispiele für Treiberstufen</b> . . . . .	<b>502</b>
8.4.1	Treiberstufen im A-Betrieb . . . . .	503
8.4.2	Komplementäre Emitterfolger im AB-Betrieb . . . . .	515
8.4.3	Klasse D Verstärker. . . . .	520
<b>8.5</b>	<b>Beispiele von Funktionsschaltungen</b> . . . . .	<b>522</b>
8.5.1	OP-Verstärker uA741 – Abschätzanalyse. . . . .	522
8.5.2	Zweistufiger Linearverstärker mit BJTs . . . . .	525
8.5.3	Regelverstärker mit BJTs . . . . .	533
8.5.4	Doppelgegentakt-Mischer . . . . .	535
<b>8.6</b>	<b>PLL-Schaltkreise</b> . . . . .	<b>538</b>
8.6.1	Aufbau und Wirkungsprinzip . . . . .	538
8.6.2	Funktionsbausteine einer PLL. . . . .	541
8.6.3	Systemverhalten . . . . .	554
8.6.4	Anwendungen . . . . .	562
<b>8.7</b>	<b>Funktionsmodule von Funkempfängern</b> . . . . .	<b>564</b>
8.7.1	Modulationsverfahren . . . . .	565
8.7.2	Bestandteile eines Funkempfängers . . . . .	574
<b>9.</b>	<b>Analog/Digitale Schnittstelle</b> . . . . .	<b>581</b>
<b>9.1</b>	<b>Zur Charakterisierung einer Logikfunktion</b> . . . . .	<b>581</b>
9.1.1	Modellbeschreibung einer Logikfunktion. . . . .	582
9.1.2	Ereignissteuerung . . . . .	589
9.1.3	Entsprechungen zwischen Schematic- und VHDL-Beschreibung . . . . .	593
<b>9.2</b>	<b>Digital/Analog Wandlung</b> . . . . .	<b>593</b>
<b>9.3</b>	<b>Abtastung analoger Signale</b> . . . . .	<b>598</b>
9.3.1	Abtasttheorem . . . . .	598
9.3.2	Quantisierungsrauschen. . . . .	599
9.3.3	Abtasthalteschaltungen . . . . .	600
<b>9.4</b>	<b>Analog/Digital Wandlung</b> . . . . .	<b>603</b>
9.4.1	Zählverfahren . . . . .	603
9.4.2	Sukzessive Approximationsverfahren. . . . .	606
9.4.3	Parallelverfahren . . . . .	610
<b>9.5</b>	<b>Delta-Sigma Wandler</b> . . . . .	<b>615</b>
9.5.1	Zum Aufbau von Delta-Sigma Wandlern . . . . .	615
9.5.2	Rauschverhalten und Rauschformung. . . . .	621
	<b>Formelzeichen</b> . . . . .	<b>625</b>
	<b>Empfohlene Literatur</b> . . . . .	<b>630</b>
	<b>Stichwortverzeichnis</b> . . . . .	<b>632</b>