

# Inhaltsverzeichnis

<b>Schreibweise und Formelzeichen der wichtigsten Größen</b> .....	15
<b>1. Einführung und allgemeine Hilfsmittel</b> .....	19
1.1. Aufgaben, Anwendungen und Funktionsprinzipien analoger Schaltungen .....	19
1.2. Transistormodelle .....	21
1.2.1. Bipolartansistoren .....	22
1.2.1.1. Statisches Verhalten .....	22
1.2.1.2. Lineares Kleinsignalverhalten .....	24
1.2.2. Feldeffekttransistoren .....	29
1.2.2.1. Statisches Verhalten .....	29
1.2.2.2. Lineares Kleinsignalverhalten .....	29
1.2.2.3. Der Feldeffekttransistor als steuerbarer Widerstand .....	31
1.3. Vereinfachte Berechnung linearer Netzwerke .....	31
1.4. Dynamische Widerstandsveränderung (Miller- und Bootstrap-Effekt) .....	35
1.5. Analyse nichtlinearer Systeme .....	38
1.5.1. Taylorreihenentwicklung .....	38
1.5.2. Fourierreihenentwicklung .....	39
1.5.3. Klirrfaktor .....	39
<b>2. Arbeitspunktprobleme bei einfachen Transistorstufen</b> .....	40
2.1. Bipolartransistor .....	40
2.1.1. Arbeitspunkteinstellung und -stabilisierung .....	40
2.1.2. Drift .....	43
2.1.3. Lineare Schaltungen zur Arbeitspunktstabilisierung .....	45
2.1.4. Nichtlineare Kompensationsschaltungen .....	48
2.1.5. Arbeitspunktstabilisierung bei analogen integrierten Schaltungen .....	49
2.1.6. Thermische Probleme .....	50
2.2. Feldeffekttransistoren .....	55
2.2.1. Arbeitspunkt .....	55
2.2.2. Arbeitspunkteinstellung und -stabilisierung .....	55
<b>3. Einfache Transistorstufen (Grundsaltungen)</b> .....	59
3.1. Analyseverfahren .....	59
3.1.1. Grafische Analyse (statische und dynamische Arbeitsgerade) .....	60
3.1.2. Lineare Kleinsignalanalyse .....	60
3.1.2.1. Vierpolanalyse .....	61
3.1.2.2. Analyse mit $\pi$ -Ersatzschaltbild (physikalisches Ersatzschaltbild) .....	64
3.2. Überblick über die drei Bipolar- und FET-Grundsaltungen. Gesteuerte Quellen in den drei Grundsaltungen .....	65
3.2.1. Aktive Bauelemente und gesteuerte Quellen .....	65

3.2.2.	Ideale gesteuerte Quellen in den drei Grundschaltungen mit Stromgegenkopplung .....	65
3.2.3.	Vergleich zwischen den Grundschaltungen .....	66
3.3.	Emitterschaltung .....	68
3.3.1.	Statisches Verhalten .....	68
3.3.2.	Signalverstärkung bei niedrigen Frequenzen .....	71
3.3.2.1.	Konstantes Emitterpotential .....	71
3.3.2.2.	Stromgegenkopplung .....	73
3.3.2.3.	Spannungsgegenkopplung .....	76
3.3.3.	Signalverstärkung bei hohen Frequenzen .....	77
3.4.	Sourceschaltung .....	80
3.4.1.	Statisches Verhalten .....	81
3.4.2.	Signalverstärkung bei niedrigen Frequenzen .....	81
3.4.3.	Signalverstärkung bei hohen Frequenzen .....	83
3.5.	Emitterfolger (Kollektorschaltung) .....	85
3.5.1.	Statisches Verhalten. Aussteuerbereich .....	86
3.5.2.	Signalverstärkung bei niedrigen Frequenzen .....	88
3.5.3.	Signalverstärkung bei hohen Frequenzen .....	91
3.6.	Sourcefolger (Drainschaltung) .....	93
3.6.1.	Statisches Verhalten. Bootstrap-Prinzip .....	93
3.6.2.	Signalverstärkung bei niedrigen und hohen Frequenzen .....	94
3.7.	Basisschaltung .....	96
3.7.1.	Statisches Verhalten. Aussteuerbereich .....	97
3.7.2.	Kleinsignalverhalten bei niedrigen und hohen Frequenzen .....	97
3.8.	Darlington-Schaltung .....	98
3.9.	Spezielle Schaltungen .....	101
3.9.1.	Kaskodeschaltung .....	101
3.9.2.	Kombination FET – Bipolartransistor .....	103
4.	Differenzverstärker .....	107
4.1.	Unterschied zwischen Gleich- und Wechselspannungsverstärkern .....	107
4.2.	Signalverarbeitung in Differenzverstärkern .....	108
4.3.	Gleichtaktaussteuerbereich und Arbeitspunkteinstellung .....	115
4.4.	Drift .....	117
4.5.	Schaltungsvarianten .....	119
5.	Kopplung zwischen den Stufen .....	123
5.1.	Direkte Kopplung .....	123
5.2.	Widerstandskopplung .....	123
5.3.	Z-Dioden-Kopplung .....	125
5.4.	RC-Kopplung .....	125
5.5.	Transformatorkopplung .....	125
5.6.	Komplementärtransistorkopplung .....	125
5.7.	Optoelektronische Kopplung .....	126

<b>6. Bauelemente und Grundschaltungen in integrierten Analogschaltungen</b> .....	127
6.1. Vergleich zwischen Bipolar- und MOS-Technik .....	127
6.2. Bipolartechnik .....	129
6.2.1. Aktive Bauelemente .....	129
6.2.2. Grundschaltungen .....	133
6.2.2.1. Widerstands- und Kapazitätstransformation .....	134
6.2.2.2. Konstantstromquellen, Stromspiegel .....	134
6.2.2.2.1. Konstantstromquellen und Stromspiegelschaltungen mit Bipolartransistoren .....	134
6.2.2.2.2. Konstantstromquellen und Stromspiegelschaltungen mit Feldeffekttransistoren .....	137
6.2.2.3. Referenzspannungsquellen, Bandgap-Referenz .....	139
6.2.2.4. Differenzverstärker .....	143
6.2.2.5. Koppelschaltungen .....	144
6.3. CMOS-Technik .....	146
6.3.1. Aktive Bauelemente .....	146
6.3.2. Grundschaltungen .....	146
6.3.2.1. Zeitkontinuierliche Schaltungen .....	147
6.3.2.2. SC-Schaltungen .....	148
<b>7. Endstufen (Leistungsstufen)</b> .....	150
7.1. Quasilineare Leistungsstufen .....	151
7.1.1. Betriebsarten, Arbeitspunkteinstellung, Schaltungsstruktur .....	151
7.1.2. Eintaktstufen (A-Verstärker) .....	153
7.1.2.1. Emitterschaltung mit ohmscher Last .....	153
7.1.2.2. Emitterfolger mit ohmschem Lastwiderstand .....	155
7.1.3. Gegentakt-B- und AB-Verstärker .....	157
7.1.3.1. Transformatorkopplung .....	158
7.1.3.2. Serienspeisung der Endtransistoren (Komplementärendstufen) .....	160
7.1.4. AB-Verstärker .....	167
7.1.5. Arbeitspunkteinstellung bei integrierten Schaltungen .....	168
7.1.6. Ausgangsstrombegrenzung .....	169
7.1.7. Höhere Spannungen, Ströme und Frequenzen .....	169
7.1.8. Dimensionierungsbeispiel .....	171
7.1.9. Monolithisch integrierte Leistungsverstärker .....	176
7.2. Unstetige Leistungsverstärker für analoge Signale, D-Verstärker .....	180
7.2.1. Grundlagen .....	180
7.2.2. D-Verstärker .....	182
7.3. Leistungs-MOSFET .....	184
7.3.1. Eigenschaften .....	185
7.3.2. Schalteranwendungen .....	187
7.3.3. Lineare Anwendungen .....	188
7.3.4. „Smart Power“-Elemente .....	189
7.4. Praktische Hinweise .....	190
7.5. Trendbetrachtung .....	190
<b>8. Allgemeines zu mehrstufigen Verstärkern</b> .....	191
8.1. Einteilung der Verstärker, Forderungen .....	191
8.2. Grenzen .....	191

14.5. SC-Filter .....	363
14.6. Digitale Filter .....	368
14.7. Signalprozessor 2920 .....	372
<b>15. Stetig nichtlineare Verstärker- und Rechenschaltungen .....</b>	<b>376</b>
15.1. Erzeugung von nichtlinearen Funktionen und Umkehrfunktionen .....	377
15.2. Logarithmierschaltungen .....	377
15.3. Delogarithmierschaltung .....	380
15.4. Multiplizierer und Quadrierschaltungen .....	381
15.4.1. Multiplizierer mit variabler Steilheit .....	382
15.4.2. Logarithmier- und Delogarithmiermultiplizierer .....	386
15.4.3. Pulsmodulationsmultiplizierer .....	387
15.4.4. Weitere Varianten von Multiplizierern .....	388
15.5. Dividierer und Radizierer .....	388
15.5.1. Inverser Multiplizierer .....	389
15.5.2. Dividierer mit variabler Steilheit .....	389
15.5.3. Logarithmier- und Delogarithmierdividierer .....	389
15.5.4. Radizierer .....	390
<b>16. Unstetig nichtlineare und rheoliner Schaltungen .....</b>	<b>391</b>
16.1. „Ideale Diode“ .....	391
16.2. Begrenzer .....	393
16.2.1. Serien- und Parallelbegrenzer. Totzone .....	393
16.2.2. Präzisionsbegrenzer .....	394
16.3. Gleichrichterschaltungen .....	396
16.3.1. Klassifizierung .....	396
16.3.2. Gleichrichterschaltungen für kleine Signale .....	397
16.4. Abtast- und Halteschaltung (Sample and hold) .....	402
16.5. Diodenfunktionsgeneratoren .....	405
16.6. Analogkomparatoren (Spannungskomparatoren) .....	406
16.6.1. Statisches Verhalten .....	407
16.6.2. Dynamisches Verhalten .....	408
16.6.3. Komparatoranwendungen ohne Kippverhalten .....	409
16.6.4. Komparatoranwendungen mit Kippverhalten .....	411
<b>17. Analogschalter. Analogmultiplexer .....</b>	<b>415</b>
17.1. Analogschalter .....	415
17.1.1. Wirkungsprinzip .....	415
17.1.2. FET als Analogschalter .....	416
17.1.3. Schaltungsbeispiele .....	416
17.1.4. Nichtideales Verhalten .....	418
17.2. Analogmultiplexer .....	420
<b>18. Signalgeneratoren .....</b>	<b>423</b>
18.1. Prinzip des rückgekoppelten Oszillators .....	424
18.2. Rechteckgenerator .....	425
18.3. Dreieckgenerator .....	426

18.4. Univibrator .....	429
18.5. Sinusgeneratoren .....	430
18.5.1. RC-Oszillatoren .....	432
18.5.1.1. Phasenschieberoszillator .....	433
18.5.1.2. Wienbrückenoszillator .....	434
18.5.2. LC-Oszillatoren .....	438
18.5.2.1. Induktive Kopplung.....	438
18.5.2.2. Allgemeine Form einer rückgekoppelten Oszillatorschaltung .....	439
18.5.2.3. Dreipunktschaltungen .....	440
18.5.3. Quarzoszillatoren .....	442
18.5.4. Synthetische Schwingungserzeugung .....	446
18.6. Gesteuerte Oszillatoren .....	446
<b>19. Frequenzumsetzung .....</b>	<b>448</b>
19.1. Modulatoren und Demodulatoren .....	448
19.1.1. Amplitudenmodulatoren und -demodulatoren .....	448
19.1.2. Frequenzmodulatoren und -demodulatoren .....	453
19.1.3. Pulsdauermodulator .....	455
19.2. Mischstufen .....	455
19.2.1. Additive Mischung .....	456
19.2.2. Multiplikative Mischung .....	457
19.3. Frequenzverdopplung .....	458
19.4. Phasenregelkreis (PLL) .....	459
19.4.1. Wirkungsweise .....	459
19.4.2. Elemente des Phasenregelkreises .....	463
19.4.3. Anwendungen .....	464
<b>20. Analoge Schaltungen mit Optokopplern .....</b>	<b>467</b>
20.1. Optokoppler .....	467
20.2. Grundsaltungen mit Optokopplern .....	471
20.3. Servo-Optokoppler-Schaltung .....	472
20.4. Differenz-Optokoppler-Schaltung .....	473
20.5. Modulationsverstärker mit Optokopplern .....	474
<b>21. Analog-Digital- und Digital-Analog-Umsetzer .....</b>	<b>476</b>
21.1. Digital-Analog-Umsetzer .....	476
21.1.1. Einführung .....	476
21.1.2. Parallele DA-Umsetzer .....	480
21.1.3. Indirekte DA-Umsetzer (serielle DAU) .....	485
21.1.4. Mikroprozessorkompatibilität .....	486
21.1.5. Anwendungen von DA-Umsetzern .....	489
21.1.6. Auswahl industrieller DA-Umsetzer .....	490
21.2. Analog-Digital-Umsetzer .....	493
21.2.1. Einführung .....	493
21.2.2. Klassifizierung.....	496
21.2.3. Parallelverfahren.....	499
21.2.4. Wägeverfahren (Sukzessive Approximation) .....	500
21.2.5. Zählverfahren (Serielle ADU) .....	505
21.2.5.1. Nachlauf- und Stufenrampen-AD-Umsetzer .....	506

21.2.5.2. Einflanken-AD-Umsetzer (Single-Slope) . . . . .	508
21.2.5.3. Zweiflanken-AD-Umsetzer (Dual-Slope) . . . . .	509
21.2.5.4. AD-Umsetzer mit Ladungsmengenkompensation (Ladungsausgleichsverfahren) . . . . .	515
21.2.5.5. Delta-Sigma-AD-Umsetzer. Oversampling . . . . .	520
21.2.6. AD-Umsetzer mit direkter Mitwirkung eines Mikrorechners . . . . .	524
21.2.7. Mikroprozessorkompatibilität . . . . .	525
21.2.8. Anwendungsgesichtspunkte . . . . .	526
21.2.9. Auswahl industrieller AD-Umsetzer . . . . .	529
<b>22. Stromversorgung . . . . .</b>	<b>536</b>
22.1. Netztransformator und Gleichrichter . . . . .	537
22.1.1. Einweggleichrichter (Halbwelligleichrichter) . . . . .	539
22.1.2. Zweiweggleichrichter (Vollweggleichrichter) . . . . .	541
22.1.3. Glättung der gleichgerichteten Spannung . . . . .	543
22.1.4. Spannungsverdoppler- und Spannungsvervielfacherschaltungen . . . . .	544
22.1.5. Siebglieder . . . . .	545
22.2. Stabilisierungsschaltungen (stetig wirkend) . . . . .	546
22.2.1. Schaltungen ohne Regelung . . . . .	546
22.2.2. Schaltungen mit stetiger Regelung . . . . .	547
22.2.2.1. Allgemeines . . . . .	547
22.2.2.2. Praktisches Beispiel: Elektronisch stabilisierte Spannungsquelle für zwei Ausgangsspannungen unterschiedlicher Polarität . . . . .	549
22.2.2.3. Überlastungsschutz . . . . .	549
22.2.2.4. Umwandlung einer unipolaren in eine bipolare Spannung . . . . .	552
22.2.2.5. Integrierte Spannungsstabilisatoren . . . . .	552
22.3. Schaltregler als Gleichspannungswandler (dc/dc-Konverter) . . . . .	554
22.3.1. Abwärtsregler (Buck-converter) . . . . .	555
22.3.2. Aufwärtsregler (Boost-converter) . . . . .	560
22.3.3. Spannungsinverter (Flyback-converter) . . . . .	561
22.3.4. „Eisenloser“ Spannungswandler . . . . .	561
22.4. Schaltnetzteile . . . . .	563
22.4.1. Wirkprinzip, Eigenschaften . . . . .	563
22.4.2. Gleichspannungswandler . . . . .	565
22.4.2.1. Sperrwandler . . . . .	567
22.4.2.1.1. Wirkungsweise . . . . .	567
22.4.2.1.2. Schalttransistor . . . . .	568
22.4.2.1.3. Transformator . . . . .	570
22.4.2.1.4. Dimensionierung . . . . .	573
22.4.2.1.5. Varianten beim Sperrwandler . . . . .	573
22.4.2.2. Durchfußwandler . . . . .	574
22.4.2.3. Gegentaktwandler . . . . .	575
22.4.3. Regelschaltung, Schaltnetzteil-Ansteuerschaltkreis B 260 . . . . .	575
22.4.4. Beispiel eines Schaltnetzteils . . . . .	578
22.4.5. Weiterer Trend . . . . .	580
22.5. Pufferbetrieb, Funkentstörung . . . . .	580
22.6. Zukünftige Entwicklung . . . . .	581
<b>Literaturverzeichnis . . . . .</b>	<b>582</b>
<b>Register . . . . .</b>	<b>589</b>