

Dietmar Ehrhardt

Verstärkertechnik

Mit 274 Bildern



Inhalt

1	Einführung	1
1.1	Was ist ein Verstärker?	1
1.2	Beispiele	3
1.2.1	Röhrenverstärker	3
1.2.2	Transistorverstärker	4
2	Bipolartransistoren	6
2.1	Aufbau und Wirkungsweise	6
2.1.1	Mechanischer Aufbau	6
2.1.2	Dotierung	7
2.1.3	Ladungsträgerverteilung einer Diode	10
2.1.4	Übergang zum Transistor	11
2.1.5	Stromgleichung des Transistors	12
2.1.6	Earlyspannung	14
2.1.7	Der Transistor im gesättigten Betrieb	16
2.1.8	Der Transistor im inversen Betrieb	16
2.2	Ersatzschaltung des Transistors	18
2.2.1	Ersatzschaltung nach Gummel-Poon	18
2.2.2	Kleinsignalersatzschaltung	21
2.3	Kennlinien des Transistors	22
2.3.1	Eingangskennlinie	22
2.3.2	Ausgangskennlinie des Transistors	23
2.3.3	Abhängigkeit der Stromverstärkung von I_C	23
2.4	Arbeitspunkt und Betriebsarten	25
2.5	Gegenkopplung, Stabilisierung	26
2.5.1	Temperaturabhängigkeit des Transistors	26
2.5.2	Stabilisierung des Arbeitspunktes	26
2.6	Emittergrundsaltung	30
2.6.1	Charakteristische Größen	30
2.7	Basisgrundsaltung	32
2.7.1	Charakteristische Größen	33
2.8	Kollektorgrundsaltung	34
2.8.1	Charakteristische Größen	34
2.9	Vierpolparameter	36
2.9.1	Definition der h-Parameter	36
2.9.2	Das Transistor h-Modell der Emitterschaltung	37
2.9.3	Das Transistor h-Modell in Basisschaltung	41
2.9.4	Das Transistor h-Modell in Kollektorschaltung	43
2.9.5	Vergleich der verschiedenen Schaltungsarten	43

3	HF-Verhalten des Bipolartransistors	47
3.1	Giacolletto-Ersatzschaltung	47
3.2	Grenzfrequenz des Transistors	47
3.3	Millereffekt	50
4	Rauschen des Bipolartransistors	53
4.0	Allgemeines über Rauschen	53
4.1	Rauscharten	54
4.1.1	Thermisches Rauschen (Widerstandsrauschen)	54
4.1.2	Schottrauschen (Shotnoise)	55
4.1.3	Funkelrauschen (1/f-Rauschen, Flickernoise)	55
4.1.4	Popcornrauschen (Burstnoise)	56
4.1.5	Avalancherauschen (Zenerrauschen)	57
4.2	Ersatzschaltbild des rauschenden Transistors	57
4.2.1	Umrechnung in äquivalente Rauschgeneratoren am Transistoreingang	58
5	Leistungsverstärkung mit Bipolartransistoren	63
5.1	Ausgangskennlinienfeld	63
5.2	Breakdownproblematik	64
5.2.1	Avalanche-Breakdown	64
5.2.2	Punch-through	66
5.2.3	Second Breakdown	67
5.3	Kühlprobleme	68
5.4	Emitterfolger und Darlington	69
5.5	Komplementärendstufen	71
6	Differenzverstärker mit Bipolartransistoren	76
7	Lateraler PNP-, Substrat PNP-Transistor	86
7.1	Lateraler PNP-Transistor	86
7.2	Substrat PNP-Transistor	87
8	Feldeffekttransistoren	89
8.1	Sperrschichtfeldeffekttransistoren	89
8.1.1	Wirkungsweise	89
8.1.2	Großsignalverhalten	94
8.1.3	Kleinsignalverhalten	95
8.2	Metalloxidfeldeffekttransistoren	97
8.2.1	Aufbau und Wirkungsweise	97
8.2.2	Ableitung der Transistorgleichungen und Großsignalverhalten	101
8.2.3	Kleinsignalverhalten	104
8.3	Kennlinien	106
8.4	Temperaturabhängigkeit der Steuerkennlinie	107
8.5	Grundsaltungen	108

8.5.1	Sourcegrundsaltung	108
8.5.2	Draingrundsaltung	111
8.5.3	Gategrundsaltung	113
9	HF-Verhalten von Feldeffekttransistoren	115
9.1	Ersatzschaltung	115
9.2	Grenzfrequenzen	115
9.3	Dual-Gate-FET	116
10	Rauschverhalten des FETs	119
10.1	Rauscharten und Ersatzschaltung	119
10.2	Äquivalente Eingangsrauschquellen des FETs	120
11	Feldeffekttransistor als Leistungsverstärker	124
11.1	SIPMOS-, TMOS-Transistor	127
11.2	Ansteuerung des SIPMOS-, TMOS-Transistors	130
12	Differenzverstärker mit FETs	135
12.1	Kleinsignalverhalten	135
12.2	Großsignalverhalten	136
12.3	Klirrfaktor	139
12.4	Offsetspannung und Temperaturdrift des MOSFET-Differenzverstärkers	141
13	Operationsverstärker	143
13.1	Aufbau von Operationsverstärkern	144
13.2	Ersatzschaltbild	145
13.3	Stabilität von Operationsverstärkern	146
13.4	Frequenzgangkompensation des Operationsverstärkers	152
13.4.1	Dominant-Pol-Kompensation	152
13.4.2	Pol-Nullstellenkompensation (Lag lead compensation)	154
13.4.3	Kompensation durch das Rückkoppelnetzwerk (Lead compensation)	155
13.5	Offsetkompensation	156
13.6	Rauschen von Operationsverstärkern	159
13.6.1	Rauschen des Differenzverstärkers	159
13.6.2	Das Rauschen des Operationsverstärkers	161
13.7	Slew rate	162
14	Grundsaltungen mit Operationsverstärkern	166
15	Komparatoren	170
16	Filter mit Operationsverstärkern	173
16.1	Tiefpaß	173
16.2	Hochpaßfilter	176

16.3	Bandpaßfilter	177
16.4	Sperrfilter	178
17	Rechenschaltungen mit OP's	180
17.1	Addierer und Subtrahierer	180
17.2	Integrierer und Differenzierer	182
17.3	Universalfilter	184
18	Verstärker als Baustein	186
18.1	Dynamikbereich und nichtlineare Verzerrungen	186
18.2	Der '1 dB Compression Point'	189
18.3	Der '3rd Order Intercept Point'	189
18.4	THD, SINAD	191
18.5	S-Parameter	192
19	Beispiele für Verstärkerbausteine	194
19.1	NF-Verstärker	194
19.1.1	Zweistufiger Verstärker	194
19.1.2	Entzerrervorverstärker	194
19.1.3	Bootstrapping	195
19.1.4	Kaskode-Schaltung	197
19.2	HF-Verstärker	197
19.2.1	Arbeitspunkteinstellung	198
19.2.2	Anpassung	199
19.3	Breitbandverstärker	202
19.4	Schmalbandige Verstärker	204
19.5	Mischer	205
19.5.1	Bipolarmischer	205
19.5.2	FET-Mischer	206
20	Integrierte Schaltungstechnik	207
20.1	Stromquellen	207
20.2	Stromquellen als Lastelemente	211
20.3	Betriebsspannungsunabhängige Arbeitspunkteinstellung	212
20.4	Temperaturunabhängige Arbeitspunkteinstellung	214
20.5	Pegelsverschiebung	217
20.6	Multiplizierer	217
21	Analoge Schaltkreissimulation (SPICE)	221
21.1	Aufbau und Beschreibung eines SPICE-Programms	221
21.2	Graphischer Postprozessor PROBE (PSPICE)	224
21.3	Mustersimulation eines Operationsverstärkers TAA761	224
21.4	Gewinnung der SPICE-Parameter	237

22	Digitale Signalverarbeitung	240
22.1	Abgetastete Systeme und Quantisierung	240
22.2	Z-Transformation	243
22.3	Digitale Filter	245
22.3.1	Einfache digitale Filter	245
22.3.2	Allgemeine Form digitaler Filter	248
22.4	Sampling rate converter (Umsetzung der Abtastrate)	250
22.4.1	Oversampling	251
22.4.2	Downsampling	251
22.4.3	Umsetzung variabler Frequenzen	252
22.5	Bilineare Transformation	253
22.6	Struktur eines DSP-Prozessors (UDPC 1000)	255
22.7	DFT bzw. FFT und Fensterfunktionen	257
23	Oszillatoren	259
23.1	Schwingbedingung	259
23.2	Grundsaltungen	260
23.2.1	Phasenschieberoszillator	260
23.2.2	Meißneroszillator	261
23.2.3	Colpitts- und Hartleyoszillator	262
23.2.4	Pierce-Oszillator	264
23.2.5	Wien-Robinson-Oszillator	265
24	PLL (Phase Locked Loop)	270
24.1	PLL-Arten	271
24.2	Beschreibung der Regelschleife	273
24.3	Dimensionierung der Regelschleife	275
25	Funktionsgeneratoren	279
25.1	Rechteckerzeugung	279
25.2	Dreieckerzeugung	281
25.3	Diodenetzwerk zur Sinusapproximation	282
25.4	Beispiele	283
	Literaturverzeichnis	286
	Register	290