

Dietmar Ehrhardt

# Verstärkertechnik

Mit 274 Bildern



# Inhalt

<b>1</b>	<b>Einführung</b>	<b>1</b>
1.1	Was ist ein Verstärker?	1
1.2	Beispiele	3
1.2.1	Röhrenverstärker	3
1.2.2	Transistorverstärker	4
<b>2</b>	<b>Bipolartransistoren</b>	<b>6</b>
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	Emittergrundschaltung	30
2.6.1	Charakteristische Größen	30
2.7	Basisgrundschaltung	32
2.7.1	Charakteristische Größen	33
2.8	Kollektorgleichschaltung	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

---

<b>3 HF-Verhalten des Bipolartransistors</b>	47
3.1 Giacolletto-Ersatzschaltung	47
3.2 Grenzfrequenz des Transistors	47
3.3 Millereffekt	50
<b>4 Rauschen des Bipolartransistors</b>	53
4.0 Allgemeines über Rauschen	53
4.1 Rauscharten	54
4.1.1 Thermisches Rauschen (Widerstandsrauschen)	54
4.1.2 Schrottrauschen (Shotnoise)	55
4.1.3 Funkelrauschen (1/f-Rauschen, Flickernoise)	55
4.1.4 Popcornrauschen (Burstroise)	56
4.1.5 Avalancherauschen (Zenerrauschen)	57
4.2 Ersatzschaltbild des rauschenden Transistors	57
4.2.1 Umrechnung in äquivalente Rauschgeneratoren am Transistoreingang	58
<b>5 Leistungsverstärkung mit Bipolartransistoren</b>	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
<b>6 Differenzverstärker mit Bipolartransistoren</b>	76
<b>7 Lateraler PNP-, Substrat PNP-Transistor</b>	86
7.1 Lateraler PNP-Transistor	86
7.2 Substrat PNP-Transistor	87
<b>8 Feldeffekttransistoren</b>	89
8.1 Sperrsichtfeldeffekttransistoren	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 Grundschaltungen	108

---

8.5.1	Sourcegrundschaltung . . . . .	108
8.5.2	Draingrundschaltung . . . . .	111
8.5.3	Gategrundschaltung . . . . .	113
<b>9</b>	<b>HF-Verhalten von Feldeffekttransistoren . . . . .</b>	<b>115</b>
9.1	Ersatzschaltung . . . . .	115
9.2	Grenzfrequenzen . . . . .	115
9.3	Dual-Gate-FET . . . . .	116
<b>10</b>	<b>Rauschverhalten des FETs . . . . .</b>	<b>119</b>
10.1	Rauscharten und Ersatzschaltung . . . . .	119
10.2	Äquivalente Eingangsrauschquellen des FETs . . . . .	120
<b>11</b>	<b>Feldeffekttransistor als Leistungsverstärker . . . . .</b>	<b>124</b>
11.1	SIPMOS-, TMOS-Transistor . . . . .	127
11.2	Ansteuerung des SIPMOS-, TMOS-Transistors . . . . .	130
<b>12</b>	<b>Differenzverstärker mit FETs . . . . .</b>	<b>135</b>
12.1	Kleinsignalverhalten . . . . .	135
12.2	Großsignalverhalten . . . . .	136
12.3	Klirrfaktor . . . . .	139
12.4	Offsetspannung und Temperaturdrift des MOSFET-Differenzverstärkers . . . . .	141
<b>13</b>	<b>Operationsverstärker . . . . .</b>	<b>143</b>
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
<b>14</b>	<b>Grundschaltungen mit Operationsverstärkern . . . . .</b>	<b>166</b>
<b>15</b>	<b>Komparatoren . . . . .</b>	<b>170</b>
<b>16</b>	<b>Filter mit Operationsverstärkern . . . . .</b>	<b>173</b>
16.1	Tiefpaß . . . . .	173
16.2	Hochpaßfilter . . . . .	176

---

16.3	Bandpaßfilter . . . . .	177
16.4	Sperrfilter . . . . .	178
17	<b>Rechenschaltungen mit OP's . . . . .</b>	180
17.1	Addierer und Subtrahierer . . . . .	180
17.2	Integrierer und Differenzierer . . . . .	182
17.3	Universalfilter . . . . .	184
18	<b>Verstärker als Baustein . . . . .</b>	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	<b>Beispiele für Verstärkerbausteine . . . . .</b>	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	<b>Integrierte Schaltungstechnik . . . . .</b>	207
20.1	Stromquellen . . . . .	207
20.2	Stromquellen als Lastelemente . . . . .	211
20.3	Betriebsspannungsunabhängige Arbeitspunkteinstellung . . . . .	212
20.4	Temperaturunabhängige Arbeitspunkteinstellung . . . . .	214
20.5	Pegelverschiebung . . . . .	217
20.6	Multiplizierer . . . . .	217
21	<b>Analoge Schaltkreissimulation (SPICE) . . . . .</b>	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

---

<b>22</b>	<b>Digitale Signalverarbeitung</b>	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
<b>23</b>	<b>Oszillatoren</b>	259
23.1	Schwingbedingung	259
23.2	Grundschaltungen	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
<b>24</b>	<b>PLL (Phase Locked Loop)</b>	270
24.1	PLL-Arten	271
24.2	Beschreibung der Regelschleife	273
24.3	Dimensionierung der Regelschleife	275
<b>25</b>	<b>Funktionsgeneratoren</b>	279
25.1	Rechteckerzeugung	279
25.2	Dreieckerzeugung	281
25.3	Diodennetzwerk zur Sinusapproximation	282
25.4	Beispiele	283
<b>Literaturverzeichnis</b>		286
<b>Register</b>		290