

Paul Skritek

# Handbuch der Audio- Schaltungstechnik

Berechnungsmethoden, Meßverfahren, Schaltungsentwicklung,  
digitale Tonverarbeitung

Mit 303 Abbildungen

---

***Franzis'***

# Inhalt

<b>1</b>	<b>Einleitung</b> .....	17
<b>2</b>	<b>Lineare Systeme</b> .....	19
2.1	Frequenzdarstellung .....	19
2.2	Amplituden- und Phasenfrequenzgang .....	23
2.3	Übertragungsmaß .....	25
2.4	Phasen- und Gruppenlaufzeit .....	25
2.5	Verzerrungsfreiheit .....	28
2.6	Minimal-Phasen-Netzwerke .....	30
2.7	Allpässe .....	31
2.8	Zusammenhang Frequenzbereich und Zeitbereich .....	33
2.8.1	Fourier-Analyse .....	33
2.8.2	Nichtperiodische Signale .....	33
2.8.3	Impulsantwort, Sprungantwort .....	34
2.9	Rückkopplung .....	35
2.10	Stabilität .....	37
2.11	Übertragungsmatrix .....	39
<b>3</b>	<b>Nichtlineare Verzerrungen</b> .....	40
3.1	Stationäre Kennlinie .....	40
3.1.1	Klirrfaktor .....	42
3.1.2	Intermodulationsfaktor .....	42
3.2	Gegenkopplung bei stationärer Kennlinie .....	42
3.2.1	Verringerung der nichtlinearen Verzerrungen .....	42
3.2.2	Messung nichtlinearer Verzerrungen .....	43
3.3	Verzerrungen in Grundsaltungen .....	44
3.3.1	Emitterschaltung .....	44
3.3.2	Emitterfolger .....	45
3.3.3	Weitere Grundsaltungen .....	46
3.4	Dynamische Intermodulationsverzerrungen .....	46
3.4.1	Slew-Rate und Großsignalbandbreite .....	46
3.4.2	Gegengekoppelte Verstärker .....	49
3.5	Verhinderung dynamischer nichtlinearer Verzerrungen .....	51
3.5.1	Bandbegrenzung des Eingangssignals .....	51
3.5.2	Schaltungstechnik .....	52
3.6	Meßverfahren für dynamische nichtlineare Verzerrungen .....	52

3.7	Verzerrungen in passiven Bauelementen .....	53
3.7.1	Widerstände .....	53
3.7.2	Kondensatoren .....	53
<b>4</b>	<b>Rauschen</b> .....	<b>54</b>
4.1	Grundlagen .....	54
4.1.1	RauschkenngroÙe .....	54
4.1.2	Addition mehrerer RauschgroÙen .....	55
4.1.3	Verstärkung von Rauschen .....	56
4.2	Thermisches Rauschen .....	57
4.2.1	Widerstände .....	57
4.2.2	Komplexe Impedanzen .....	58
4.3	Halbleiterdioden .....	58
4.4	Bipolartransistoren .....	59
4.5	Feldeffekttransistoren .....	61
4.6	Operationsverstärker .....	61
4.7	Rauschzahl .....	62
4.7.1	Bipolar-Transistor in Emitterschaltung .....	62
4.7.2	FET in Sourceschaltung .....	63
4.7.3	Operationsverstärker .....	63
4.7.4	Maximaler Signal-Störabstand .....	64
4.8	Mehrstufiger Verstärker .....	64
4.8.1	Zusätzliche Rauschbeiträge .....	65
4.9	Parallelgeschaltete Verstärker .....	66
4.10	Differenzverstärker, Instrumentationsverstärker .....	66
4.11	Transformatoranpassung .....	67
4.12	Invertierender und nichtinvertierender Verstärker .....	68
4.13	Induktive und kapazitive Signalquellen .....	69
4.14	Weitere Rauschquellen .....	70
<b>5</b>	<b>Bipolartransistor</b> .....	<b>72</b>
5.1	GroÙsignalverhalten .....	72
5.2	Arbeitspunkteinstellung .....	74
5.3	Kleinsignalverhalten bei niedrigen Frequenzen .....	74
5.4	Vierpolbeschreibung .....	75
5.5	Grundsaltungen .....	76
5.5.1	Emitterschaltung .....	76
5.5.2	Kollektorschaltung .....	77
5.5.3	Basisschaltung .....	78
5.6	Verhalten bei höheren Frequenzen .....	78
5.7	Spezielle Schaltungsrealisierungen .....	79
5.7.1	Emitterschaltung mit spannungsgesteuerter Stromgegenkopplung .....	80
5.7.2	Emitterschaltung mit stromgesteuerter Spannungsgegenkopplung .....	80
5.7.3	Kaskodeschaltung .....	81
5.7.4	Darlingtonschaltung .....	81
5.7.5	Komplementär-Darlingtonschaltung (Verbundschaltung) .....	82

5.8	Differenzverstärker .....	82
5.8.1	Differenzverstärker-Grundschialtung .....	82
5.8.2	Differenzverstärker mit stromgesteuerter Spannungsgegenkopplung .....	84
5.8.3	Symmetrische Signalauskopplung .....	84
5.8.4	Kaskodeschaltung .....	85
5.8.5	Gegentakt-Differenzverstärker .....	85
5.9	Konstantstromquelle .....	86
5.9.1	Konstantstromquelle in Emitterschaltung .....	86
5.9.2	Stromspiegel .....	87
5.9.3	Wilson-Stromspiegel .....	87
<b>6</b>	<b>Feldeffekttransistor .....</b>	<b>88</b>
6.1	Großsignalverhalten .....	89
6.2	Arbeitspunkteinstellung .....	90
6.3	Kleinsignalverhalten .....	91
6.4	Grundschialtungen .....	92
6.4.1	Sourceschaltung .....	92
6.4.2	Drainschaltung (Sourcefolger) .....	93
6.5	Verhalten bei höheren Frequenzen .....	94
6.6	Spezielle Schaltungsrealisierungen .....	94
6.6.1	Differenzverstärker .....	94
6.6.2	Kaskodeschaltung .....	95
6.6.3	Darlingtonschaltung .....	96
6.6.4	Verbundschaltung .....	96
<b>7</b>	<b>Operationsverstärker .....</b>	<b>97</b>
7.1	Kleinsignalverhalten .....	97
7.1.1	Idealer Operationsverstärker .....	98
7.1.2	Realer Operationsverstärker .....	99
7.1.3	Grundschialtungen .....	99
7.1.4	Reale Leerlaufverstärkung .....	100
7.1.5	Grundschialtungen mit ohmscher Gegenkopplung .....	102
7.1.6	Eingangs- und Ausgangsimpedanz .....	104
7.2	Großsignalverhalten .....	104
7.2.1	Ausgangsstufe .....	104
7.2.2	Eingangsstufe, Gleichtaktsignale .....	105
7.2.3	Eingangsstufe, Differenzsignale .....	105
7.3	Arbeitspunkteinstellung .....	106
7.3.1	Offsetgrößen .....	107
7.4	Gleichtaktverstärkung .....	107
7.5	OV-Typen .....	108
<b>8</b>	<b>Operations-Transkonduktanzverstärker .....</b>	<b>109</b>
8.1	Idealer OTA .....	109
8.2	Linearisierungsdioden .....	110
8.3	OTA-Typen .....	111

8.4	Grundsaltungen	111
8.4.1	Spannungsverstärkung	112
8.4.2	Klangsteller	112
8.4.3	Applikationsschaltungen	114
<b>9</b>	<b>Vorverstärker</b>	<b>115</b>
9.1	Einstufige Verstärker	115
9.1.1	BJT-Emitterschaltung	115
9.1.2	BJT-Kollektorschaltung	118
9.1.3	Arbeitspunkteinstellung bei FET-Schaltungen	118
9.1.4	FET-Sourceschaltung	119
9.1.5	FET-Source-Folger	120
9.2	Zweistufige Verstärker	120
9.2.1	Grundsaltung mit komplementären Transistoren	121
9.2.2	Grundsaltung mit gleichartigen Transistoren	124
9.2.3	Schaltungsvarianten	125
9.2.4	Schaltungsbeispiel	127
9.3	Inverterverstärker	128
9.4	Vor-Vorverstärker für MC-Tonabnehmer	130
9.4.1	Schaltung mit Einzeltransistoren	130
9.4.2	Parallelgeschaltete Transistoren	131
9.5	Schaltungen mit Operationsverstärkern	132
9.6	Vorverstärker für dynamische Mikrofone	134
9.6.1	Erd-unsymmetrische Grundsaltung	134
9.6.2	Mikrofonverstärker mit Eingangsübertrager	135
9.6.3	Erdsymmetrischer Vorverstärker mit Elektrometersubtrahierer	135
<b>10</b>	<b>Entzerrer-Verstärker</b>	<b>137</b>
10.1	Frequenzgangdimensionierung und Netzwerkentwurf	138
10.1.1	Bode-Diagramm	138
10.1.2	Realisierbarkeit von RC-Netzwerken	140
10.1.3	Struktur des Gegenkopplungsnetzwerks	140
10.1.4	Bauteildimensionierung	141
10.2	Elektrometer-Entzerrerschaltungen	142
10.2.1	Tiefpaß mit begrenzter Höhenabsenkung	143
10.2.2	Entzerrer mit 3 Eckfrequenzen	144
10.3	Inverter-Entzerrerschaltungen	145
10.3.1	Tiefpaß mit begrenzter Höhenabsenkung	146
10.3.2	Entzerrer mit 3 Eckfrequenzen	146
10.4	Magnetaufzeichnungsgeräte	147
10.4.1	Wiedergabe-Entzerrung	150
10.4.2	Aufnahme-Entzerrung	151
10.5	Schallplatten-Wiedergabeentzerrer	154
10.5.1	Schneidefrequenzgang	154
10.5.2	Entzerrerfrequenzgang	154
10.5.3	Magnetdynamische Wandler	156
10.5.4	Unterdrückung tieffrequenter Störsignale	157
10.5.5	Entzerrer für magnetodynamische Tonabnehmer	157
10.5.6	RIAA-Elektrometerentzerrer	159

<b>11</b>	<b>Klangeinsteller</b>	165
11.1	Gehörrichtige Lautstärkeinsteller	165
11.2	Fächer-Einsteller	166
11.2.1	Passive Fächer-Einsteller	167
11.2.2	Aktive Fächer-Einsteller	170
11.3	Equalizer	172
11.3.1	Equalizer mit konstanter Bandbreite	173
11.3.2	Equalizer mit einstellbarer Bandbreite	176
11.3.3	Equalizer mit R-L-C-Bandsperre	178
11.4	Rumpel-, Rauschfilter	180
11.5	Veränderung des Räumlichkeitseindrucks	182
11.5.1	Stereo-Basisverbreiterung	182
11.5.2	Pseudo-Stereophonie	184
<b>12</b>	<b>Elektronisch steuerbare Schalter und Einsteller</b>	185
12.1	Bipolartransistor-Schalter	185
12.1.1	Kontinuierlicher Abschwächer	186
12.2	FET-Schalter	186
12.3	Passive Spannungsteiler	187
12.4	Verstärkungseinstellung	190
12.5	Gleichspannungsgesteuerte Verstärker (VCA)	191
12.5.1	Zwei/Vier-Quadranten-Multiplizierer	191
12.5.2	Emittergesteuerte Differenzverstärker	191
12.5.3	Kreuzgekoppelte Differenzverstärker	193
12.6	OTAs	198
12.7	Logarithmierverstärker	198
12.8	Digital ansteuerbare Einsteller	200
12.8.1	Lautstärkeinsteller	200
12.8.2	Klangeinsteller	201
12.9	Multiplizierende D/A-Wandler	202
12.9.1	D/A-Wandler für Audioabschwächer	204
12.10	Pulsbreiten-Modulation	205
<b>13</b>	<b>Leistungsverstärker</b>	207
13.1	Verstärker-Grundschtaltung	207
13.1.1	Eingangsstufe	208
13.1.2	Ansteuerstufe	208
13.1.3	Ausgangsstufe	208
13.1.4	Maximale Ausgangsleistung	208
13.2	Arbeitspunkt und Ausgangskennlinienfeld	210
13.2.1	Verlustleistung am Transistor	213
13.3	Komplexe Lastimpedanzen	214
13.3.1	Sinusförmige Signale	214
13.3.2	Sprungsignale	215
13.3.3	Lautsprecher als Lastimpedanz	216
13.3.4	Erforderlicher Ausgangsstrom	217

## Inhalt

13.4	Komplementärer Emitter- und Sourcefolger	218
13.4.1	B-Betrieb	219
13.4.2	AB-Betrieb	221
13.4.3	A-Betrieb	221
13.4.4	Quasikomplementärer Emitterfolger	224
13.4.5	Komplementärer Sourcefolger	224
13.4.6	Vergleich BJT-FET-Schaltungen	226
13.5	Negativer Eingangswiderstand	227
13.6	Übernahmeverzerrungen	227
13.6.1	Übernahmeverzerrungen 1. Art	227
13.6.2	Übernahmeverzerrungen 2. Art	228
13.6.3	Gesteuerte Vorspannungsquellen	229
13.7	Elektronische Schutzschaltungen	230
13.7.1	Begrenzung des Ausgangsstroms	230
13.7.2	SOAR-Schutzschaltung	231
13.7.3	Verluste bei hohen Frequenzen	232
13.7.4	Gleichspannungsschutz bei Brückenschaltungen	232
13.8	Ausgangsstufen-Schaltungen für höhere Ströme	232
13.9	Brückenschaltung	235
13.10	Stromentlastungsschaltungen	237
13.10.1	Grundschialtung	238
13.10.2	Schaltungsvariante	239
13.10.3	Vereinfachte Schaltungslösungen	239
13.11	Verstärker mit gesteuerter Versorgungsspannung	242
13.11.1	A <sup>+</sup> -Betrieb	242
13.11.2	Mitgekoppelte Spannungsversorgung	243
13.11.3	G-Betrieb	244
13.11.4	Kontinuierlich gesteuerte Versorgungsspannung	245
13.11.5	DLD-Schaltung	246
13.12	Verringerung von Störeinflüssen	247
13.12.1	Störungen des Bezugspotentials	247
13.12.2	Kreuzsymmetrische Brückenschaltung	248
13.13	Pulsdauer-Modulation (D-Betrieb)	250
13.13.1	Verfahrenseinteilung	251
13.13.2	Realisierungskriterien	252
13.13.3	Gegenkopplung	254
13.13.4	Schaltungsbeispiel	255
13.14	Verlustleistung, Kühlung	256
13.15	Schaltungsauswahl	258
13.15.1	Erforderliche Betriebswerte	258
13.15.2	Schaltungskonzepte	259
13.15.3	Dimensionierungsbeispiel	265
<b>14</b>	<b>Verfahren zur Störungsverminderung</b>	<b>270</b>
14.1	Grundlagen	271
14.2	Einteilung der Verfahren	271
14.2.1	Allgemeine Kompanderbeschreibung	272
14.2.2	Einteilungsparameter	273

14.3	Übertragungseigenschaften	275
14.3.1	Ruhe-Geräuschspannungsabstand	275
14.3.2	Störungsminderung bei Nutzsignalen	275
14.3.3	Pegelfehler	276
14.3.4	Dynamisches Verhalten	277
14.4	Nichtkomplementäre Verfahren	280
14.4.1	Dynamic Noise Limiter DNL	281
14.4.2	Dynamic Noise Reduction DNR	281
14.5	Komplementäre Gleitbandkompander	281
14.5.1	Dolby-B	281
14.5.2	Dolby-C	283
14.5.3	Dolby-A	284
14.5.4	Dolby-SR	285
14.6	Komplementäre Breitbandkompander	285
14.6.1	dbx	285
14.6.2	CX-Schallplatten-Kompander	287
14.7	Kombinierte Breitband/Gleitband-Kompander	287
14.7.1	Kaskadierte gesteuerte Verstärker	287
14.7.2	Highcom	288
14.8	Variable Dynamik	291
14.9	Weitere Anwendungen	293
14.9.1	Kompandierte Tonsysteme	293
14.9.2	Individuelle Kompanderschaltungen	293
<b>15</b>	<b>Digitale Steuerungs- und Signal-Bus-Systeme</b>	<b>294</b>
15.1	Spezifikationskriterien	294
15.2	I <sup>2</sup> C-Bus-System	295
15.2.1	C-Bus	295
15.2.2	I <sup>2</sup> C-Bus	295
15.2.3	D <sup>2</sup> -Bus	299
15.2.4	IC-Typen	301
15.3	Übertragung digitalisierter Audiosignale	302
15.3.1	Digitale Tonschnittstelle für Heimgeräte	302
15.3.2	AES-Studiobus	303
15.3.3	I <sup>2</sup> S-Bus	303
<b>16</b>	<b>Digitale Tonübertragung</b>	<b>308</b>
16.1	Einleitung	308
16.2	Frequenzbandbegrenzung	308
16.2.1	Abtast-Theorem	308
16.2.2	Signaldispersion, Überschwingen	309
16.2.3	Erforderliche Filterparameter	310
16.3	Abtastung	311
16.3.1	Abtast-Halte-Schaltung	311
16.4	Analog/Digitalwandlung	312
16.4.1	Auflösung, Datenrate und Speicherkapazität	312
16.4.2	Quantisierung	313



## Inhalt

16.4.3	Signal-Störabstand bei PCM	314
16.4.4	Erhöhung des Signal-Störabstandes	315
16.4.5	Analog/Digital-Wandler	316
16.4.6	A/D-Wandler-Konversionscodes	317
16.5	Fehlerschutzcodierung	317
16.5.1	Übertragungsfehler	317
16.5.2	Fehlerprüfcodes	318
16.5.3	Fehlerprüfcodes in Audio-Aufzeichnungsgeräten	319
16.6	Kanalcodierung	320
16.7	Übertragungskanal, Speicher	320
16.8	Wiedergabe-Decoder	321
16.9	Demodulation von Digitalsignalen	321
16.9.1	Reale D/A-Wandler	322
16.9.2	Schaltungsrealisierungen	323
16.10	Digitale Signalverarbeitung	324
16.10.1	Signalдарstellung und Grundelemente	324
16.10.2	Filterstrukturen	326
16.10.3	Schaltungsrealisierungen	328
<b>17</b>	<b>Compact-Disc-Technik</b>	<b>329</b>
17.1	Übersicht	329
17.2	Signalformat	329
17.2.1	Rahmenaufbau	329
17.2.2	CIRC-Fehlerschutz-Code	333
17.2.3	Steuerungs-/Anzeige-Bits (Subcoding)	334
17.2.4	Programm-Kennzeichnung	336
17.2.5	EFM-Aufzeichnungscode	337
17.3	CD-Wiedergabegeräte	338
17.3.1	Optisches System	338
17.3.2	Fokussierung, Spurnachführung und Signalgewinnung	340
17.3.3	Signalverarbeitung	342
17.3.4	Gleichlaufkorrektur	342
17.3.5	Fehlerkorrektur	342
17.3.6	Überabtastung	345
17.3.7	Error-Spektrum-Shaping	346
17.3.8	D/A-Wandler	350
17.3.9	Analoge Nachfilter	354
17.4	Schaltungsbeispiele	356
17.5	Vergleich verschiedener Fehlerkorrekturverfahren	360
17.6	Vergleich verschiedener D/A-Verfahren	362
17.6.1	Erforderlicher Analogfilteraufwand	362
17.6.2	Erreichbarer Signal-Störabstand	363
17.7	Grundlegende Systemanforderungen bei der D/A-Wandlung	365
17.7.1	D/A-Wandler im Multiplexbetrieb	365
17.7.2	Takt-Jitter	365
17.7.3	Slew-Rate-Verzerrungen	367
17.8	CD-ROM	367
17.9	CD-Interaktiv	369
17.10	CD-Video	372

<b>18</b>	<b>PCM-Aufzeichnungs- und Übertragungssysteme</b>	374
18.1	PCM-Adapter für Videorekorder	374
18.2	PCM-Kassettenrekorder	376
18.2.1	Longitudinal-Aufzeichnung S-DAT	376
18.2.2	Schrägspur-Aufzeichnung R-DAT	376
18.2.3	8-mm-Video	380
18.3	Digitaler Satelliten-Rundfunk	382
18.4	Digitale Vorverstärker	386
18.4.1	Vorverstärker mit Standard-Signalprozessoren	386
18.4.2	Digitaler Signalprozessor für TV-Tonkanal	386
18.4.3	Volldigitaler HiFi-Steuerverstärker	386
<b>Anhang A</b>		394
Anhang A1:	Bezeichnungen und Symbole	394
Anhang A2:	Dimensionierungsformeln	397
Anhang A3:	Rechenregeln für komplexe Zahlen (Vektoren)	398
Anhang A4:	Internationales Einheitensystem (SI-Einheiten)	400
Anhang A5:	Schaltzeichensammlung	401
Anhang A6:	Eigenschaften typischer Signalquellen und Verstärkeranschlüsse	402
Anhang A7:	Steckverbindungen	403
Anhang A8:	Mindestanforderungen an HiFi-Geräte nach DIN 45 500	405
Anhang A9:	Zusammenfassung von Gegenkopplungsschaltungen	406
Anhang A10:	Näherungen der nichtlinearen Kennlinien von Grundsaltungen bei geringer Aussteuerung	410
Anhang A11:	Übersicht über Operationsverstärker für Audioanwendungen	411
Anhang A12:	Grenzfrequenzen (Zeitkonstanten) des genormten magnetischen Bandflusses	412
Anhang A13:	Integrierte elektronisch steuerbare Schalter und Einsteller	413
Anhang A14:	Monolithisch integrierte Leistungsverstärker	414
Anhang A15:	I <sup>2</sup> C-Bus-fähige Schaltungen für Audioanwendungen	415
<b>Anhang B: Computerprogramme</b>		416
Anhang B1:	Programm NETZ	416
Anhang B2:	Programm RAUSCH	422
Anhang B3:	Programm KLIRR	429
Anhang B4:	Programm TRAFO	431
<b>Literaturverzeichnis</b>		436
<b>Sachverzeichnis</b>		449