

Ernst Terhardt

# Akustische Kommunikation

Grundlagen mit Hörbeispielen

Mit 221 Abbildungen, 15 Tabellen  
und einer DDD Audio-CD mit 31 Hörbeispielen



Springer

# Inhaltsverzeichnis

<b>1. Einführung</b> .....	1
1.1 Die drei Welten .....	2
1.2 Aspekte der Physik .....	5
1.2.1 Schallquellen .....	6
1.2.2 Schallübertragung .....	7
1.2.3 Schallempfang .....	10
1.3 Aspekte der Wahrnehmung .....	11
1.3.1 Wahrnehmungen als sensorische Systemgrößen .....	11
1.3.2 Hörversuche .....	14
1.3.3 Die beiden Klassen von Sinnesempfindungen .....	15
1.3.4 Eigenschaften prothetischer Empfindungsgrößen .....	16
1.4 Aspekte der Information .....	21
1.4.1 Hauptmerkmale sensorischer Information .....	21
1.4.2 Information an der Peripherie sensorischer Systeme ..	23
1.4.3 Primärkonturen als binäre Informationseinheiten .....	23
1.4.4 Virtuelle Konturen .....	26
1.4.5 Autonomie sensorischer Informationsverarbeitung .....	27
1.4.6 Das hierarchische Prinzip .....	27
1.4.7 Schema der sensorischen Informationsverarbeitung .....	28
<b>2. Komponenten der Audiokommunikation</b> .....	31
2.1 Schallquellen .....	31
2.1.1 Das Sprechorgan .....	31
2.1.2 Musikalische Blechblasinstrumente .....	33
2.1.3 Musikalische Rohrblattinstrumente .....	35
2.1.4 Pfeifen und Flöten .....	38
2.1.5 Musikalische Saiteninstrumente .....	39
2.2 Elektroakustische Komponenten .....	43
2.2.1 Mikrofone .....	43
2.2.2 Lautsprecher und Kopfhörer .....	46
2.2.3 Elektroakustische Schallspeicher .....	49
2.3 Das Gehör .....	53
2.3.1 Übersicht .....	53
2.3.2 Die äußeren Teile des Hörorgans .....	55

2.3.3	Das Mittelohr . . . . .	55
2.3.4	Das Innenohr und die Cochlea . . . . .	56
<b>3.</b>	<b>Signal- und systemtheoretische Grundlagen . . . . .</b>	<b>61</b>
3.1	Signale und Systeme . . . . .	61
3.1.1	Energietorsysteme . . . . .	61
3.1.2	Potentialgrößen und Flußgrößen . . . . .	63
3.1.3	Effektivwert und Pegeldarstellung . . . . .	65
3.1.4	Nichtlinearität, Klirrfaktor und Klirrdämpfung . . . . .	66
3.2	Operatorenrechnung und kausale Fourier-Transformation . . . . .	67
3.2.1	Operatorenrechnung . . . . .	67
3.2.2	Fourier-Transformation . . . . .	69
3.2.3	Zur Existenz der Fourier-Transformierten . . . . .	70
3.2.4	Kausale Fourier-Transformation CFT . . . . .	71
3.3	Lineare zeitinvariante Zweitorsysteme . . . . .	75
3.3.1	Systemgleichungen und Kettenmatrix . . . . .	75
3.3.2	Kettenverbindung von Zweitorsystemen . . . . .	76
3.3.3	Umkehrung der Übertragungsrichtung . . . . .	76
3.3.4	Typen von Zweitorsystemen . . . . .	77
3.3.5	Eingangs- und Ausgangsimpedanz . . . . .	77
3.3.6	Übertragungsfunktionen . . . . .	78
3.4	Zeitvariante Fourier-Transformation . . . . .	78
3.4.1	Übergang zur zeitvarianten Fourier-Transformation . . . . .	79
3.4.2	Einige Eigenschaften der FTT als Signal-Analysator . . . . .	81
3.4.3	Berechnung der FTT für Kosinusschwingungen . . . . .	82
3.4.4	Digitale FTT . . . . .	84
3.5	Merkmale einiger Schallsignaltypen . . . . .	86
3.5.1	Komplexe Töne . . . . .	86
3.5.2	Sinusförmig amplitudenmodulierte Signale . . . . .	88
3.5.3	Sinusförmig frequenzmodulierte Signale . . . . .	90
3.6	Periodendauer, Fourier-Spektrum, Teiltonanalyse . . . . .	92
3.6.1	Teiltonkonzept und zeitvariante Teiltonsynthese . . . . .	92
3.6.2	Periodenanalyse, Autokorrelation, Fourierspektrum . . . . .	93
3.6.3	Gehörgerechte Teiltonanalyse . . . . .	95
<b>4.</b>	<b>Elektromechanische Systeme . . . . .</b>	<b>99</b>
4.1	Grundlagen der Berechnung . . . . .	99
4.1.1	Das elektromechanische Schema EMS . . . . .	99
4.1.2	Elektromechanische Entsprechungen . . . . .	101
4.1.3	Umwandlung des EMS in das entsprechende PES . . . . .	103
4.2	Elektromechanische Elementarwandler . . . . .	105
4.2.1	Der elektrodynamische Elementarwandler . . . . .	105
4.2.2	Der piezoelektrische Elementarwandler . . . . .	106
4.2.3	Der dielektrische Elementarwandler . . . . .	107
4.2.4	Der elektromagnetische Elementarwandler . . . . .	109

4.3	Der reale elektromechanische Wandler . . . . .	111
4.3.1	Kettenmatrix . . . . .	112
4.3.2	Übertragungsfunktionen des Schwingungsgebers . . . . .	113
4.3.3	Übertragungsfunktionen des Kraftwandlers . . . . .	114
<b>5.</b>	<b>Schallemission und Schallfelder in Luft . . . . .</b>	<b>117</b>
5.1	Die linearen Gesetze des Schallfeldes . . . . .	117
5.2	Grundtypen von Schallfeldern . . . . .	120
5.2.1	Das quasi-statische Schallfeld . . . . .	120
5.2.2	Das ebene Schallfeld . . . . .	121
5.2.3	Das Kugelschallfeld . . . . .	125
5.3	Grundtypen von Schallstrahlern . . . . .	127
5.3.1	Kugelstrahler . . . . .	127
5.3.2	Punktschallquelle . . . . .	129
5.3.3	Doppel-Punktschallquelle . . . . .	129
5.3.4	Dipolschallquelle . . . . .	131
5.3.5	Linienschallquelle . . . . .	132
5.3.6	Kreiskolbenstrahler in sehr großer Wand . . . . .	133
5.4	Schall in halligen Räumen . . . . .	138
5.4.1	Punktquelle vor einer sehr großen Wand . . . . .	139
5.4.2	Punktschallquelle in einem quaderförmigen Raum . . . . .	143
5.4.3	Kenngrößen der Raumakustik . . . . .	148
<b>6.</b>	<b>Lautsprecher, Kopfhörer und Mikrofone . . . . .</b>	<b>151</b>
6.1	Lautsprecher . . . . .	151
6.1.1	Der Schallwandlautsprecher . . . . .	152
6.1.2	Die Lautsprecherbox . . . . .	157
6.2	Kopfhörer . . . . .	164
6.2.1	Die akustische Übertragungsfunktion . . . . .	164
6.2.2	Die elektromechanische Übertragungsfunktion . . . . .	168
6.2.3	Die Gesamtübertragungsfunktion . . . . .	171
6.3	Mikrofone . . . . .	171
6.3.1	Die akustische Übertragungsfunktion . . . . .	172
6.3.2	Die Gesamt-Übertragungsfunktion . . . . .	177
<b>7.</b>	<b>Sprechvorgang und Sprachsignal . . . . .</b>	<b>183</b>
7.1	Die Schallquellen des Sprechorgans . . . . .	185
7.1.1	Die Glottis-Schallquelle . . . . .	185
7.1.2	Turbulenz-Schallquellen . . . . .	187
7.1.3	Impuls-Schallquellen . . . . .	187
7.2	Die Vokale . . . . .	188
7.2.1	Allgemeiner Ansatz . . . . .	188
7.2.2	Der Schwa-Laut . . . . .	189
7.2.3	Vokaltrakt-Kettenmatrix . . . . .	190
7.2.4	Funktionstyp der Übertragungsfunktion . . . . .	192

7.2.5	Eigenfrequenzen und Formanten	193
7.2.6	Informationsgewicht der Formanten	195
7.3	Nasallaute	196
7.4	Frikativlaute	197
7.5	Plosivlaute	198
7.6	Weitere Merkmale des Sprachsignals	198
<b>8.</b>	<b>Schallsignale der Musik</b>	<b>201</b>
8.1	Das Tonsystem	201
8.2	Wirkungsweise konventioneller Tonerzeuger	205
8.2.1	Tonerzeugung auf Rohrblattinstrumenten	205
8.2.2	Tonerzeugung auf Blechblasinstrumenten	209
8.2.3	Tonerzeugung auf Flöten und Pfeifen	210
8.2.4	Tonerzeugung auf Streichinstrumenten	211
8.2.5	Anzupfen und Anschlagen von Saiten	216
8.3	Tonsignaltypen und ihre Charakteristika	217
8.3.1	Harmonische komplexe Töne	217
8.3.2	Angenähert harmonische komplexe Töne	218
8.3.3	Geringharmonische komplexe Töne	219
8.4	Die gespreizte Intonation der Tonkala	220
<b>9.</b>	<b>Grundparameter des Gehörs</b>	<b>223</b>
9.1	Autonome Einflüsse auf die Schallsignale	224
9.1.1	Die Freifeldübertragungsfunktion	225
9.1.2	Die interaurale Übertragungsfunktion	225
9.1.3	Schallquelle in der Medianebene	228
9.2	Die Schallübertragung zum Innenohr	229
9.2.1	Die Übertragungsfunktion des äußeren Gehörganges	229
9.2.2	Die Übertragungsfunktion des Mittelohres	230
9.2.3	Die Übertragungsfunktion des Innenohres	231
9.3	Die Absoluthörschwelle für Sinustöne	242
9.3.1	Dauertöne	242
9.3.2	Tonimpulse	245
9.4	Funktionsschema der peripheren Schallsignalübertragung	246
9.4.1	Gehörgangresonanzen	247
9.4.2	Cochleäre Übertragungsfunktionen	248
9.4.3	Digitale Berechnung des PET-Systems	258
9.5	Gehörbezogene Frequenzskalierung	260
9.5.1	Logarithmische Skalierung	260
9.5.2	SPINC-Skalierung	261
9.5.3	Bark-Skalierung (Tonheit)	264
9.5.4	ERB-Skalierung	267
9.5.5	PET-Skalierung	267

<b>10. Prothetische Aspekte des Hörens</b> .....	271
10.1 Wahrnehmung der Schallstärke .....	271
10.1.1 Intensitätsunterschiedsschwellen .....	271
10.1.2 Die Lautheit .....	278
10.2 Wahrnehmung von Schallfluktuationen .....	283
10.2.1 Absolutschwellen für Schallfluktuationen .....	284
10.2.2 Unterschiedsschwellen für Schallfluktuationen .....	290
10.2.3 Binaurale Schwebung .....	292
10.2.4 Rauigkeit und Schwankungsstärke .....	292
10.3 Prothetische Attribute der Klangfarbe .....	300
10.3.1 Volumen .....	300
10.3.2 Schärfe .....	301
10.3.3 Klanghaftigkeit .....	303
<b>11. Die Tonhöhe</b> .....	307
11.1 Konzeptionelle Grundlagen .....	307
11.1.1 Die Tonhöhenhierarchie .....	310
11.1.2 Der Sinuston als Bezugsschall .....	312
11.1.3 Die Tonhöhe harmonischer komplexer Töne .....	313
11.2 Die Spektraltonhöhe .....	316
11.2.1 Existenzbedingungen .....	316
11.2.2 Kontureffekte .....	327
11.2.3 Tonhöhenabweichungen .....	329
11.2.4 Die interaurale Tonhöhendifferenz .....	336
11.2.5 Oktav- und Quintabweichung .....	340
11.2.6 Zusammenfassung .....	344
11.3 Die virtuelle Tonhöhe .....	345
11.3.1 Klänge aus wenigen Teiltönen .....	347
11.3.2 Dominanz des mittleren Frequenzbereichs .....	349
11.3.3 Unterschiedsschwellen .....	351
11.3.4 Tonhöhenabweichungen und Teiltonspektrum .....	353
11.3.5 Tonhöhenabweichungen bei Schallpegeländerungen .....	354
11.3.6 Tonhöhenabweichungen durch Zusatzschall .....	356
11.3.7 Interaurale Tonhöhendifferenz .....	357
11.3.8 Oktavabweichung .....	358
11.3.9 Virtuelle Tonhöhen von Geräuschen .....	359
11.4 Theorie .....	359
11.4.1 Die Theorie der virtuellen Tonhöhe .....	360
11.4.2 Andere Theorien .....	366
<b>12. Klangzeitgestalt, Sprache und Musik</b> .....	369
12.1 Klanggestalt .....	372
12.1.1 Klangfarbe, Klanggestalt und Tonhöhe .....	372
12.1.2 Erkennung .....	383
12.1.3 Ähnlichkeit .....	392

XII Inhaltsverzeichnis

12.1.4	Musikalische Konsonanz .....	397
12.2	Klangzeitgestalt .....	405
12.2.1	Ereignisintervalle und Ereigniszeitpunkte .....	406
12.2.2	Auditive Dauer von Ereignissen .....	410
12.2.3	Der Kontinuitätseffekt .....	412
12.2.4	Der Akzentuierungseffekt .....	414
12.2.5	Bildung und Zerfall von Ereignisketten .....	416
<b>Anhang</b>	.....	421
A.1	Symbole, Größen und Konstanten .....	421
A.2	Korrespondenzen und Rechenregeln der CFT .....	426
A.3	Inhalt der Compact-Disk .....	428
<b>Literaturverzeichnis</b>	.....	439
<b>Sachverzeichnis</b>	.....	487