

Master Thesis im Studiengang Elektronische Medien

Tontechnik für Veranstaltungstechniker

Ein Handbuch für die Ausbildung von Fachkräften für
Veranstaltungstechnik

Vorgelegt von Volker Smyrek
an der Hochschule der Medien

Erstprüfer: Prof. Oliver Curdt
Zweitprüfer: Prof. Axel Hartz

Stuttgart, Januar 2009

2

Volker Smyrek

Dipl.-Ing. (FH) Audiovisuelle Medien

Adlerstrasse 13

70199 Stuttgart

Kurzfassung

Grundlage für die Themenauswahl in diesem Handbuch ist der Rahmenplan des Ausbildungsberufes Fachkraft für Veranstaltungstechnik. Behandelt werden u.a. Grundlagen der Schallausbreitung und Raumakustik, Mikrofone, analoge und digitale Audiosignale, Mischpulte, Verstärker und Lautsprecher, drahtlose Tonübertragung, Kommunikationsanlagen und Beschallungstechnik.

Schlagwörter: Tontechnik, Beschallung, Veranstaltungstechnik.

Abstract

The topics of this handbook are based on the outline plan of the teaching profession for Event Technology Specialists (Rahmenplan des Ausbildungsberufes zur Fachkraft für Veranstaltungstechnik). The Sections are basics of acoustics, microphones, analogue & digital audio signals, sound desks, amps & speakers, wireless technology, intercoms and live sound reinforcement.

Keywords: Sound Engineering, Sound Reinforcement, Event Technology Specialist.

Erklärung

Hiermit erkläre ich, dass ich die vorliegende Thesis selbständig angefertigt habe. Es wurden nur die in der Arbeit ausdrücklich benannten Quellen und Hilfsmittel benutzt. Wörtlich oder sinngemäß übernommenes Gedankengut habe ich als solches kenntlich gemacht.

Ort, Datum

Unterschrift

Vorwort

Warum dieses Handbuch und für wen ist es gedacht?

Dieses Handbuch entstand ursprünglich zur Vorbereitung auf die eigene Tätigkeit als Ausbilder und wurde dann weiterentwickelt zu einem Lehrbuch mit Übungsaufgaben.

Welche Inhalte werden vermittelt?

Die Inhalte orientieren sich am Rahmenlehrplan für den Ausbildungsberuf Fachkraft für Veranstaltungstechnik.¹ Das Handbuch umfasst die Theorie der Audiotechnik für alle drei Lehrjahre.

Wie tiefgehend ist die Informationsvermittlung?

Eine gewerbliche Ausbildung und damit auch der Ausbildungsberuf zur Fachkraft für Veranstaltungstechnik ist prinzipiell für Schulabgänger sämtlicher Schularten zugänglich. Die Unternehmen legen bei der Einstellung allerdings einen klaren Fokus auf Bewerber, die wenigstens einen Realschulabschluss haben, und an deren Vorbildung orientiert sich die Vermittlung von Wissen in diesem Buch. Für Auszubildende mit höherem Bildungsabschluss sind manche Inhalte eventuell zu einfach gehalten. Ein Selbststudium weiterführender Fachliteratur ist in diesem Fall zu empfehlen. Daher stehen am Ende der Kapitel entsprechende Literaturhinweise.

Wie ist dieses Handbuch strukturiert?

Zuerst werden die Grundlagen behandelt um anschließend auf einzelne Teilbereiche tiefer einzugehen. Die Reihenfolge der Kapitel und zum Teil auch die Inhalte innerhalb der Kapitel bauen aufeinander auf und folgen damit größtenteils der Gliederung des Rahmenlehrplans.

Übungsaufgaben...

... finden sich am Ende jedes Kapitels. Die Lösungen sind im Anhang aufgeführt.

¹ Verordnung über die Berufsausbildung, 2002

Inhaltsverzeichnis

Kurzfassung	3
Abstract	3
Erklärung	3
Vorwort	4
Inhaltsverzeichnis	5
1. Schallausbreitung	19
1.1. Der Schall	19
1.1.1. Was ist Schall?	19
1.1.2. Wie entsteht eine Schallwelle?	19
1.1.3. Schall in der Luft...	20
1.1.4. Nahfeld und Fernfeld	20
1.1.5. Die Schallgeschwindigkeit c...	21
1.1.6. Laufzeit des Schalls	22
1.1.7. Wettereinflüsse	23
1.2. Die Schwingung	24
1.2.1. Allgemeine Definition der Schwingung	24
1.2.2. Die Sinusschwingung	24
1.2.3. Überlagerung von Schwingungen	25
1.3. Tonhöhe und Intervalle	27
1.3.1. Wahrnehmung der Tonhöhe	27
1.3.2. Intervalle	27
1.4. Graphische Darstellung von Audiosignalen	30
1.5. Ton, Klang, Geräusch und Lärm	31
1.6. Obertöne und Klangfarbe	33
1.7. Formanten	34
1.8. Übungsaufgaben	35
2. Schallkenngrößen	37
2.1. Schalldruck p	37
2.1.1. Absoluter Schalldruckpegel L_p	37
2.1.2. Bewertete Schalldruckpegel $[dB_A]$ bis $[dB_D]$	39
2.2. Schallschnelle v	40
2.2.1. Berechnung der Auslenkung ξ der Luftmoleküle	40

2.2.2.	Berechnung der Schallschnelle v	41
2.3.	Schallimpedanz Z	43
2.4.	Schallintensität I	44
2.4.1.	Berechnung der Schallintensität I	44
2.4.2.	Schallintensitätspegel L_I	44
2.5.	Schallleistung und Schallenergie.	45
2.5.1.	Schallleistung P	45
2.5.2.	Schallleistungspegel L_W	45
2.5.3.	Schallenergie W	46
2.6.	Übungsaufgaben	47
3.	Grundlagen der Akustik	49
3.1.	Akustische Erscheinungen	49
3.1.1.	Reflexion	49
3.1.2.	Diffuse Streuung	50
3.1.3.	Abschattung und Beugung	50
3.1.4.	Stehende Wellen	52
3.1.5.	Kammfiltereffekt	52
3.1.6.	Dopplereffekt	53
3.1.7.	Absorption von Schall	55
3.2.	Nachhall	58
3.2.1.	Raumimpulsantwort	58
3.2.2.	Anregung bei Dauerschall	58
3.2.3.	Nachhallzeit RT_{60}	60
3.2.4.	Frequenzabhängigkeit der Nachhallzeit	60
3.2.5.	Nachhallzeit und Nachhalldauer	62
3.2.6.	Deutlichkeitsmaß C_{50}	63
3.2.7.	Klarheitsmaß C_{80}	64
3.3.	Direktschall und Reflexionen	65
3.3.1.	Freifeld	65
3.3.2.	Diffusfeld	66
3.3.3.	Hallradius	66
3.4.	Übungsaufgaben	69
4.	Das menschliche Gehör	71
4.1.	Anatomie des Gehörs	71
4.1.1.	Außenohr	71

		7
4.1.2.	Mittelohr	72
4.1.3.	Innenohr	72
4.2.	Wahrnehmung durch das Gehör	74
4.2.1.	Lautstärkewahrnehmung	74
4.2.2.	Räumliches Hören	75
4.2.3.	Verdeckungseffekte	76
4.2.4.	Schallwahrnehmung bei elektroakustischer Wiedergabe	78
4.3.	Hörschaden	80
4.4.	Übungsaufgaben	83
5.	Lärmschutz	85
5.1.	Schutz der Mitarbeiter vor Lärm	85
5.1.1.	Lärm- und Vibrations-Arbeitsschutzverordnung	85
5.1.2.	Ermittlung von Beurteilungspegeln aus Messungen	86
5.1.3.	Gehörschutzmittel	88
5.1.4.	Arbeitsmedizinische Vorsorgeuntersuchung G20 Lärm	90
5.1.5.	Lärminderungsprogramm	90
5.1	DIN 15 905-5: Schutz des Publikums	91
5.2.1	Richtwerte	91
5.2.2	Maßnahmen	92
5.2.3	Zeitbewertung bei Messungen	94
5.3	TA-Lärm: Schutz der Anwohner	95
5.4	Übungsaufgaben	96
6.	Grundlagen der Elektronik	97
6.1.	Gleichstrom und Wechselstrom	97
6.1.1.	Gleichstrom	97
6.1.2.	Wechselstrom	98
6.2.	Widerstand, Induktivität und Kapazität (R, L und C)	101
6.2.1.	Eigenschaften von R, L und C	101
6.2.2.	Passive Filter	105
6.3.	Diode und Transistor	110
6.3.1.	Leitfähigkeit von verschiedenen Materialien	110
6.3.2.	Diode	110
6.3.3.	Gleichrichterschaltungen	111
6.3.4.	Transistor	113
6.3.5.	Einfacher Audioverstärker in Emitterschaltung	115

6.3.6.	Anforderungen an Spannungsverstärker	117
6.3.7.	Gegenkopplung	118
6.4.	Operationsverstärker	119
6.4.1.	Nichtinvertierender Spannungsverstärker	120
6.4.2.	Invertierender Spannungsverstärker	121
6.4.3.	Aktive Filter	121
6.5.	Übungsaufgaben	123
7.	Netzteile, Batterien und Akkus	125
7.1.	Netzteile	125
7.1.1.	Unregelte Netzteile	125
7.1.2.	Stabilisierte Netzteile (Analoge Spannungsstabilisierung)	126
7.1.3.	Getaktete Netzteile (Schaltnetzteile)	126
7.2.	Batterien und Akkus	127
7.2.1.	Funktionsprinzip von Batterien und Akkus	127
7.2.2.	Vor- und Nachteile von Batterien und Akkus	127
7.2.3.	Technische Parameter von Batterien und Akkus	128
7.2.4.	Eigenschaften von verschiedenen Batterietypen	130
7.2.5.	Eigenschaften von verschiedenen Akkutypen	131
7.2.6.	Kenndaten von Akkus	132
7.2.7.	Laden von Akkus	133
7.3.	Übungsaufgaben	134
8.	Der Pegel	135
8.1.	Was ist ein Logarithmus?	135
8.2.	Relative Pegel	136
8.2.1.	Relativer Leistungspegel L	137
8.2.2.	Relativer Spannungspegel L_U	137
8.3.	Absolute Pegel	138
8.3.1.	Absoluter Spannungspegel p_U	138
8.3.2.	Normpegel	140
8.4.	Aussteuerung	141
8.4.1.	Peak Program Meter (PPM)	141
8.4.2.	Pegel bei Tonbandaufnahmen	141
8.4.3.	Aussteuerung bei digitalen Aufnahmen	142
8.5.	Rechnen mit Pegeln	142
8.5.1.	Pegel-Umkehrsatz	142

8.5.2.	Pegeladdition	143
8.6.	Übungsaufgaben	145
9.	Mikrofone	147
9.1.	Empfängerprinzipien und Richtcharakteristiken	147
9.1.1.	Druckempfänger	147
9.1.2.	Druckgradientenempfänger	149
9.1.3.	Interferenzempfänger	152
9.2.	Wandlerprinzipien	153
9.2.1.	Kohlemikrofon	154
9.2.2.	Dynamische Mikrofone	155
9.2.3.	Piezoelektrischer Wandler	158
9.2.4.	Kondensatormikrofon	159
9.3.	Bauarten	163
9.3.1.	Kleinmembranmikrofone	163
9.3.2.	Großmembranmikrofone	163
9.3.3.	Miniaturmikrofone	163
9.3.4.	Grenzflächenmikrofon	164
9.3.5.	Digitale Mikrofone	166
9.3.6.	Messmikrofone	166
9.4.	Technische Daten von Mikrofonen	167
9.5.	Übungsaufgaben	171
10.	Verfahren zur Mikrofonierung	173
10.1.	Einzelmikrofonierung	173
10.1.1.	Schlagzeugmikrofonierung	173
10.1.2.	Percussion	176
10.1.3.	Mikrofonierung einer Gitarre	177
10.1.4.	Bass	178
10.1.5.	Keyboards	179
10.1.6.	Flügel und Klavier	179
10.1.7.	Mikrofonierung von Bläsern	180
10.1.8.	Streicher	181
10.1.9.	Gesang und Sprache	182
10.2.	Stereo-Aufnahmeverfahren	184
10.2.1.	Intensitätsstereofonie	184
10.2.2.	Laufzeitstereofonie	187

10.2.3.	Gemischte Aufnahmeverfahren	188
10.2.4.	Mikrofonierung mit Trennkörper	189
10.3.	Surround-Aufnahmeverfahren	192
10.3.1.	Doppelt-MS (Schoeps)	192
10.3.2.	Soundfield (Ambisonics)	193
10.3.3.	INA-5 (Sound Performance Lab)	194
10.3.4.	OCT mit Surroundweiterung	194
10.3.5.	Kugelflächenmikrofon mit Erweiterung (Schoeps)	196
10.3.6.	Holophone (Rising Sun Productions)	197
10.4.	Stützmikrofone	198
10.5.	Übungsaufgaben	199
11.	Anpassung und Audioleitungen	201
11.1.	Anpassung	201
11.1.1.	Was ist Anpassung?	201
11.1.2.	Leistungsanpassung	201
11.1.3.	Spannungsanpassung	202
11.1.4.	Stromanpassung	202
11.2.	Audioleitungen	203
11.2.1.	Leitungsbeläge	203
11.2.2.	Pegelverluste bei Lautsprecherkabel	205
11.2.3.	Unsymmetrische Signalführung	206
11.2.4.	Symmetrische Signalführung	206
11.2.5.	DI-Box	208
11.2.6.	Brummschleifen	209
11.2.7.	Steckverbinder und Pinbelegungen	210
11.3.	Digitale Signalübertragung	214
11.3.1.	Besondere Anforderungen an digitale Leitungen	214
11.3.2.	Digitale Kabel und Stecker	216
11.4.	Übungsaufgaben	218
12.	Digitale Audiosignale	219
12.1.	Zahlensysteme	219
12.1.1.	Dezimalsystem	219
12.1.2.	Dualsystem	219
12.1.3.	Bitfolgen	219
12.2.	Pulse Code Modulation (PCM)	221

12.2.1.	Vorverstärker	221
12.2.2.	Tiefpassfilter im Eingang	222
12.2.3.	Signalabtastung (Sample)	222
12.2.4.	Haltestufe (Hold)	224
12.2.5.	A/D-Wandler	224
12.2.6.	D/A-Wandler	226
12.2.7.	De-Glitcher , Tiefpass und Ausgangsverstärker	227
12.2.8.	Taktgenerator	227
12.3.	Pulse Width Modulation (PWM)	228
12.4.	Kanal-Codes	229
12.4.1.	Was muss ein Kanal-Code leisten?	229
12.4.2.	Beispiele für Kanal-Codes	229
12.5.	Maßnahmen zur Verhinderung von Datenverlust	231
12.5.1.	Fehlererkennung	231
12.5.2.	Fehlerverschleierung	231
12.5.3.	Fehlerkorrektur	231
12.6.	Digitale Audioprotokolle	232
12.6.1.	AES/EBU nach der AES3-Norm	232
12.6.2.	S/P-DIF	233
12.6.3.	MADI	234
12.6.4.	ADAT-Lightpipe	235
12.7.	Synchronisation	236
12.7.1.	Wordclock	236
12.7.2.	Timecode	238
12.8.	Übungsaufgaben	241
13.	MIDI	243
13.1.	Physikalische MIDI-Schnittstelle	243
13.2.	MIDI-Daten	245
13.2.1.	Channel Voice Messages	245
13.2.2.	Channel Mode Messages	246
13.2.3.	System Common Messages	247
13.2.4.	System Realtime Messages	247
13.2.5.	System Exclusive Messages	248
13.3.	MIDI-Signalverteilung	249
13.3.1.	MIDI-Thru- & Merge-Boxen	249

13.3.2.	MIDI Router	249
13.3.3.	MIDI Line Driver	249
13.3.4.	MIDI-Anwendungsbeispiel	250
13.4.	mLAN (Yamaha)	251
13.5.	Übungsaufgaben	252
14.	Mischpulte	253
14.1.	Prinzipieller Aufbau und Funktionsweise	253
14.1.1.	Was macht ein Mischpult?	253
14.1.2.	Welche Mischpulte gibt es?	253
14.2.	Signalfluss eines analogen Beschallungspultes	255
14.2.1.	Mono-Eingangskanal	255
14.2.2.	Gruppen- und Matrixmodul	260
14.2.3.	Aux-Master	261
14.2.4.	PFL- / OSC-Modul	262
14.2.5.	Central Control Modul (CCM)	262
14.3.	Digitale Mischpulte	263
14.3.1.	Prinzip der digitalen Signalverarbeitung	263
14.3.2.	Besonderheiten bei digitalen Pulten	264
14.3.3.	Bedienkonzepte digitaler Pulte	264
14.3.4.	Kaskadierung digitaler Pulte	265
14.4.	Automation von Mischpulten	265
14.4.1.	Statische Automation	265
14.4.2.	Dynamische Automation	266
14.5.	Übungsaufgaben	267
15.	Klangbearbeitung	269
15.1.	Dynamikbeeinflussung	269
15.1.1.	Definition der Dynamik	269
15.1.2.	Regelverstärker	271
15.1.3.	Spezielle Regelverstärker	275
15.2.	Filter und Equalizer	277
15.2.1.	Allgemeines zu Filter und EQ	277
15.2.2.	Analoge Filter	278
15.2.3.	Digitale Filter	281
15.3.	Effektgeräte	283
15.3.1.	Echo	283

15.3.2.	Hall	285
15.3.3.	Weitere Effekte	287
15.4.	Übungsaufgaben	294
16.	Frequenzweichen, Controller und Leistungsverstärker	295
16.1.	Frequenzweichen	295
16.1.1.	Passive Frequenzweichen	295
16.1.2.	Aktive Frequenzweichen	296
16.2.	Controller	297
16.2.1.	Funktionen eines Controllers	297
16.2.2.	Einbindung eines Controllers in den Signalweg	298
16.3.	Leistungsverstärker	299
16.3.1.	Technische Daten von Verstärkern	299
16.3.2.	Clipping bei Endstufen	303
16.3.3.	Stereo, Parallel Mono und Bridged Mono	304
16.4.	Übungsaufgaben	305
17.	Lautsprecher	307
17.1.	Wandlerprinzipien bei Lautsprechern	307
17.1.1.	Elektrodynamische Lautsprecher	307
17.1.2.	Elektrostatische Lautsprecher	311
17.1.3.	Piezoelektrische Lautsprecher	312
17.2.	Lautsprecherboxen	313
17.2.1.	Frei schwebender Lautsprecher	313
17.2.2.	Unendliche Schallwand	313
17.2.3.	Geschlossenes Gehäuse	314
17.2.4.	Bassreflex-Box	314
17.2.5.	Bandpass-Gehäuse	315
17.2.6.	Transmissions-Gehäuse	315
17.2.7.	Exponential-Hörner	316
17.2.8.	Kriterien zur Beurteilung von Lautsprecherboxen	318
17.3.	Anordnung und Kombination von Lautsprecherboxen	325
17.3.1.	Aufstellung im Raum	325
17.3.2.	Lautsprecherboxen nebeneinander oder aufeinander	327
17.3.3.	Linienstrahler (Line Arrays)	328
17.4.	Übungsaufgaben	334
18.	Drahtlose Tonübertragung	337

18.1.	Mikroport-Technik	337
18.1.1.	Sendefrequenzen	337
18.1.2.	Signalweg einer Mikroportanlage	339
18.1.3.	HF-Modulation	339
18.1.4.	Intermodulation und Frequenzplanung	341
18.1.5.	Sender	342
18.1.6.	Antennen	344
18.1.7.	Antennenkabel	346
18.1.8.	Antennen-Booster	347
18.1.9.	Antennensplitter	348
18.1.10.	Empfänger	350
18.1.11.	Diversity-Verfahren	351
18.1.12.	Squelch	352
18.2.	Infrarot-Technik	352
18.2.1.	Signalweg einer IR-Anlage	352
18.2.2.	IR-Modulation	353
18.2.3.	Probleme bei IR-Übertragung	354
18.2.4.	Anlagenteile der IR-Technik	354
18.3.	Übungsaufgaben	357
19.	Kommunikationsanlagen	359
19.1.	Kabelgebundene Systeme	359
19.1.1.	Partylines	359
19.1.2.	Clearcom Matrix	362
19.1.3.	Digitale Systeme	363
19.2.	Drahtlose Systeme	363
19.2.1.	Simplex-Funk	363
19.2.2.	Duplex-Funk	364
19.2.3.	Digital-Duplex-Funk	365
19.3.	Übungsaufgaben	366
20.	Beschallungsanlagen	367
20.1.	Konzepte für Beschallungsanlagen	367
20.1.1.	Zentrale Beschallung	367
20.1.2.	Zentrale gestützte Beschallung	368
20.1.3.	Dezentrale Beschallung	368
20.2.	Konzertbeschallung	369

20.2.1.	Prinzipieller Signalfluss einer P.A.	369
20.2.2.	Anordnung der FOH-Lautsprecher	370
20.2.3.	Monitoring	371
20.3.	Theaterbeschallung	374
20.3.1.	Theatermischpulte	375
20.3.2.	Lautsprecher für die Saalbeschallung	375
20.3.3.	Lautsprecher für die Bühnenbeschallung	377
20.3.4.	Monitoring für Orchestermusiker	377
20.4.	Einmessen von Beschallungsanlagen	378
20.4.1.	Elektrisches Einmessen	378
20.4.2.	Akustisches Einmessen	378
20.4.3.	Subjektive Kontrolle	381
20.5.	Installations- und Beschallungspläne	382
20.5.1.	Bühnenanweisungen	382
20.5.2.	Beschallungspläne	385
20.5.3.	Signalflusspläne nach dem Sound Graphics Standard	392
20.6.	Übungsaufgaben	396
21.	Medieneinsatz	397
21.1.	Prinzipieller Aufbau eines Computers	397
21.2.	Anschluss an Netze	398
21.2.1.	Netz-Topologien	398
21.2.2.	OSI-Schichtenmodell	401
21.2.3.	Ethernet	403
21.2.4.	Audionetze	404
21.3.	Audioaufnahme und -speicherung	410
21.3.1.	Soundkarten	410
21.3.2.	Speichermedien für Audiodateien	411
21.4.	Audiodateien	413
21.4.1.	Unkomprimierte Audiodateien	413
21.4.2.	Komprimierte Audiodateien	414
21.5.	Software zur Audibearbeitung	416
21.5.1.	Sample-Bearbeitung	416
21.5.2.	Digitale Audio Workstations	418
21.5.3.	Cue-Player	420
21.6.	Übungsaufgaben	422

22.	Video im Theater & bei Veranstaltungen	423
22.1.	Videosignale	423
22.1.1.	BAS-Signal	423
22.1.2.	Farbsignale	426
22.1.3.	Digitale Videosignale	431
22.2.	Videosignalverteilung	435
22.3.	Die Videokamera	438
22.3.1.	Optisches System einer Videokamera	438
22.3.2.	Bildwandler	440
22.3.3.	Kameraelektronik	449
22.3.4.	Kamerazug	454
22.4.	Aufzeichnung und Wiedergabe von Videosignalen	456
22.4.1.	Magnetbandaufzeichnung (MAZ)	456
22.4.2.	Video-Harddisc-Systeme	459
22.5.	Bildmischer	459
22.6.	Splitscreen und Multiscreen	461
22.7.	Videoprojektion	462
22.7.1.	DLP-Projektoren	462
22.7.2.	LCD-Projektoren	465
22.7.3.	LCoS-Projektoren	467
22.7.4.	Brennweite bei Videoprojektoren	468
22.7.5.	ANSI-Lumen	469
22.7.6.	Laserprojektoren	470
22.7.7.	Lens Shift	471
22.7.8.	Pixel Shift	471
22.8.	Übungsaufgaben	472
Anhang		473
	Ausbildungsinhalte im Bereich der Tontechnik laut dem Rahmenlehrplan	473
	1. Lehrjahr	473
	2. Lehrjahr	474
	3. Lehrjahr	475
	Berechnung des Hallradius r_H	476
	Einige Aussagen zum Nahbesprechungseffekt	477
	Englische Fachbegriffe	481
	Abkürzungen	484

	17
Formelsammlung	491
Lösungen zu den Übungsaufgaben	498
Kapitel 1	498
Kapitel 2	499
Kapitel 3	500
Kapitel 4	501
Kapitel 5	502
Kapitel 6	503
Kapitel 7	504
Kapitel 8	505
Kapitel 9	506
Kapitel 10	507
Kapitel 11	508
Kapitel 12	509
Kapitel 13	510
Kapitel 14	511
Kapitel 15	512
Kapitel 16	513
Kapitel 17	515
Kapitel 18	517
Kapitel 19	518
Kapitel 20	519
Kapitel 21	521
Kapitel 22	521
Quellen	523
Abbildungsverzeichnis	533
Tabellenverzeichnis	549
Sachwortverzeichnis	553

1. Schallausbreitung



In diesem Kapitel geht es um die Schallausbreitung in der Luft und die Grundlagen zur periodischen Schwingung. Diese Themen sollten am Anfang des ersten Lehrjahres unterrichtet werden.

1.1. Der Schall

1.1.1. Was ist Schall?

Schall ist Physiologisch eine Reizung des Gehörs und damit eine Hörempfindung. Physikalisch ist damit die Ausbreitung von lokalen Druckschwankungen in elastischen Medien und die kollektive Schwingung von Teilchen gemeint.¹ Ohne Medium gibt es keinen Schall. Demnach wird im luftleeren Raum, dem Vakuum, also kein Schall übertragen.

1.1.2. Wie entsteht eine Schallwelle?

Schallwellen können durch verschiedene Schallquellen in Form von schwingenden Saiten, Stäben, Zungen, Membranen, Platten oder Luftsäulen angeregt werden.²

Beispiel: Eine Akustikgitarre als Schallquelle³

Die Saiten der Gitarre bewegen sich nach dem Anzupfen hin und her, sie schwingen. Die Schwingungen der Saiten werden über den Steg an einen Resonanzkörper, den Gitarrenkorpus, weitergeleitet. Die Holzdecke des Korpus kann als eine Art Platte oder Membran gesehen werden, welche die Schallschwingungen durch die relativ große Fläche verstärkt und an die Luft überträgt (Abb. 1.1). Die periodischen Auslenkungen der angeregten Luftmoleküle breiten sich dann als Schallwelle aus.

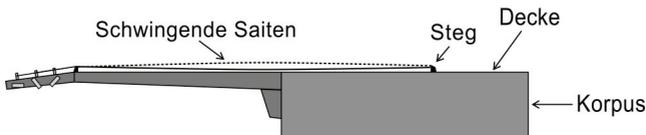


Abb. 1.1: Gitarre als Schallerzeuger

¹ vgl. Stöcker, 2000, Seite 228

² vgl. Veit, 2005, Seite 40

³ vgl. Eska, 1997, Seite 15 und Veit, 2005, Seite 40

1.1.3. Schall in der Luft...

... breitet sich als Longitudinalwelle aus, d.h. die Schwingungsrichtung der Moleküle entspricht der Ausbreitungsrichtung der Welle (Abb. 1.2).

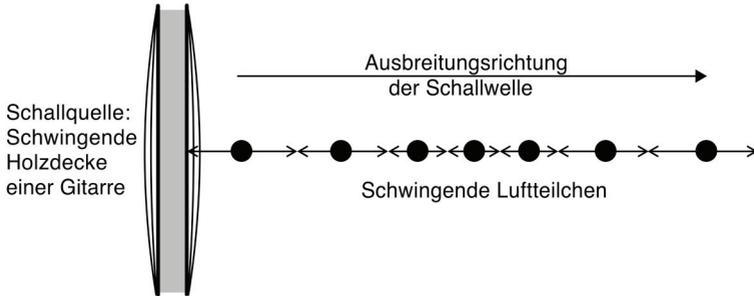


Abb. 1.2: Longitudinalwelle

Bei Transversalwellen ist die Schwingungsrichtung dagegen senkrecht zur Ausbreitungsrichtung, zum Beispiel bei elektromagnetischen Wellen. Weiterhin gibt es Dehn- und Biegewellen in Festkörpern.

Die Ausbreitung von Schall erfolgt in einem elastischen Medium wie der Luft als Verdünnungs- und Verdichtungsfronten (Abb. 1.3).

- Verdünnungsfront = minimaler Druck
- Verdichtungsfront = maximaler Druck

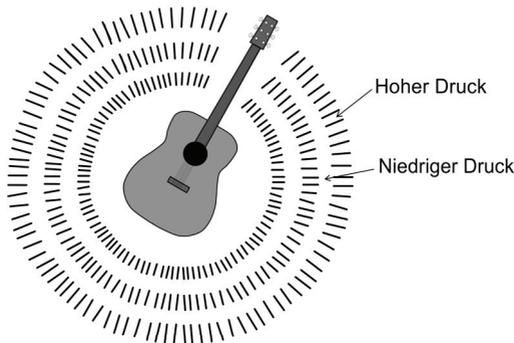


Abb. 1.3: Verdünnungs- und Verdichtungsfronten

1.1.4. Nahfeld und Fernfeld

Im Nahfeld um eine Schallquelle breitet sich der Schall in Form einer Kugelwelle aus. Dies ist allerdings abhängig von den Abmessungen der Schallquelle. Nur Schall mit einer Wellenlänge, die größer ist als der Schallerzeuger, wird als Kugelwelle abgestrahlt. Die Definition der Wellenlänge folgt im nächsten Kapitel 1.2. „Die Schwingung“.

Im Fernfeld, d.h. in größerer Entfernung zur Schallquelle nähern sich die Schallwellen immer mehr einer ebenen Welle (Abb. 1.4). Im Nahfeld und Fernfeld gelten jeweils andere Gesetzmäßigkeiten für den Schalldruck und die Schallschnelle. Mehr dazu in Kapitel 2. „Schallkenngrößen“.

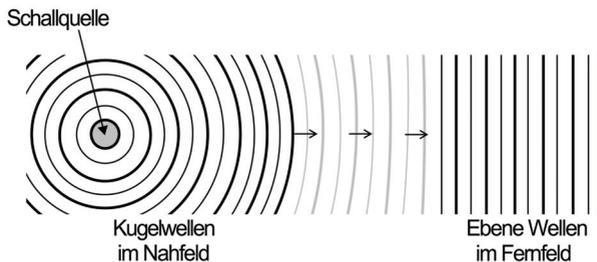


Abb. 1.4: Kugelwellen und ebene Wellen

1.1.5. Die Schallgeschwindigkeit c ...

... ist die Geschwindigkeit, mit der sich die Anregung der Moleküle ausbreitet.

Berechnung von c in Luft in Abhängigkeit von der Temperatur:⁴

$$c = c_0 + 0,6 * T \quad (\text{Formel 1.1})$$

Einheit [m/s]

c_0 : Referenzwert = 331,5 m/s (Schallgeschwindigkeit bei 0° C)

0,6 : Temperaturabhängigkeit der Schallgeschwindigkeit ($\pm 1^\circ \approx \pm 0,6$ m/s)

T : Temperatur in °Celsius

Bei 20° C beträgt die Schallgeschwindigkeit demnach 343,5 m/s. Dies gilt für trockene Luft. Die Schallgeschwindigkeit ändert sich aber auch mit der relativen Luftfeuchtigkeit.

Schallgeschwindigkeit c in Abhängigkeit von der Luftfeuchtigkeit:⁵

bei 20% Luftfeuchtigkeit: $c = 343,8$ m/s

bei 50% Luftfeuchtigkeit: $c = 344,3$ m/s

bei 80% Luftfeuchtigkeit: $c = 344,5$ m/s

Unter Berücksichtigung der Temperaturabhängigkeit wie auch der Luftfeuchtigkeit wird für weitere Berechnungen in diesem Handbuch ein mittlerer Wert von $c = 344$ m/s verwendet.

⁴ Quelle für die Formel: Stöcker, 2000, Seite 289

⁵ vgl. Eska, 1997, Seite 32

Die Schallgeschwindigkeit ist letztlich abhängig von den Materialkennwerten des Mediums, durch das sich die Wellen bewegen, wie zum Beispiel der Dichte und dem Elastizitätskoeffizienten.⁶ In unterschiedlichen Materialien hat die Schallgeschwindigkeit demnach andere Werte. Tabelle 1.1 zeigt einige Beispiele für Schallgeschwindigkeiten in verschiedenen Medien.

Tabelle 1.1: Schallgeschwindigkeit in verschiedenen Medien⁷

Material	Schallgeschwindigkeit c
Kautschuk	70 m/s
Luft	344 m/s
Blei	1200 m/s
Wasser, 20° C	1484 m/s
Eis, -10° C	3200 m/s
Holz, weich	3340 m/s
Holz, hart	4700 m/s
Glas	5300 m/s
Diamant	18000 m/s

1.1.6. Laufzeit des Schalls

Die Laufzeit des Schalls lässt sich wie folgt berechnen:

$$\text{Laufzeit } t = \frac{\text{Abstand zur Schallquelle } s}{\text{Schallgeschwindigkeit } c}$$

$$t = \frac{s}{c} \quad (\text{Formel 1.2})$$

Einheit [s]

Rechenbeispiel: Der Abstand zu einer Schallquelle beträgt 30 m. Wie lange braucht der Schall für diese Distanz?

Lösung:

$$t = \frac{30 \text{ m}}{344 \text{ m/s}} = 0,087 \text{ s bzw. } 87 \text{ ms}$$

⁶ Genauer: Der Dichte ρ , dem Elastizitätskoeffizient E und der Querdehnungszahl μ ; vgl. Wikipedia.org, 2008, Schallgeschwindigkeit

⁷ vgl. Görne, 2006, Seite 27 und Henle, 1993, Seite 22

1.1.7. Wettereinflüsse

Nimmt die Lufttemperatur wie bei einer Inversionswetterlage mit der Höhe zu, dann werden die Schallwellen zur Erde zurück gebeugt. Dabei kann der Schall sehr weite Distanzen zurücklegen, so dass unter Umständen Ereignisse hörbar werden, die nicht im Sichtfeld liegen. Dies wird als Phänomen der verlängerten Schallausbreitung bezeichnet (Abb. 1.5).⁸

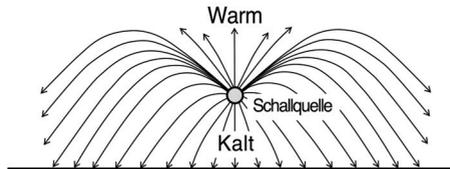


Abb. 1.5: Schallausbreitung bei einer Inversionswetterlage

Der gegenteilige Effekt tritt ein, wenn mit der Höhe die Lufttemperatur abnimmt. Hier werden die Schallwellen von der Erde weg gebeugt. Auch nahe Schallquellen sind dann im Schallschatten unhörbar (Abb. 1.6).

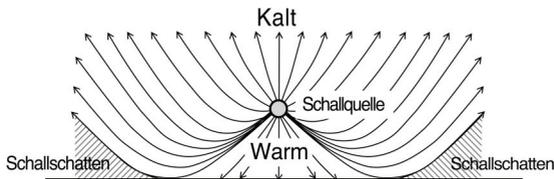


Abb. 1.6: Schallausbreitung bei mit der Höhe abnehmender Temperatur

In Windrichtung wird der Schall zur Erde hin gekrümmt. Gegen den Wind entsteht eine Schattenzone, in welcher der Schall vom Boden weg gekrümmt wird (Abb. 1.7).

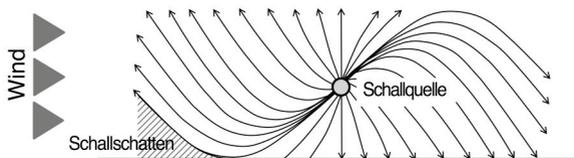


Abb. 1.7: Schallausbreitung bei Wind

Bildquellen Abb. 1.5 bis 1.7: Fasold und Veres, 2003, Seite 40

⁸ vgl. Walker, 2008, Seite 161

1.2. Die Schwingung

1.2.1. Allgemeine Definition der Schwingung

Allgemein wird ein Vorgang, der in regelmäßigen Zeitabschnitten immer wieder den gleichen Zustand erreicht, als periodische Schwingung bezeichnet. Ein anschauliches Beispiel dafür lieferte Hermann von Helmholtz⁹ im Jahr 1862: An einer Stimmgabel befestigte er einen Stift, die Stimmgabel wurde angeschlagen und ein Blatt Papier darunter durchgezogen. Die aufgezeichnete Wellenlinie war das direkte Abbild der periodischen Schwingung der Stimmgabel (Abb. 1.8).

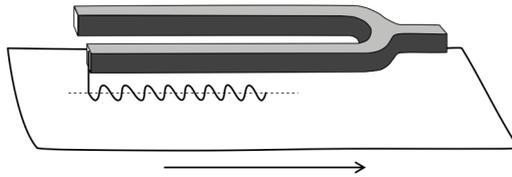


Abb. 1.8: Stimmgabel als Beispiel für eine periodische Schwingung
Bildquelle: von Helmholtz, 1968, Seite 33

1.2.2. Die Sinusschwingung

Eine periodische Schwingung lässt sich mathematisch aus einer Kreisbewegung ableiten. Ein Umlauf auf der Kreisbahn entspricht dabei einer Periode einer Sinusschwingung (Abb. 1.9).

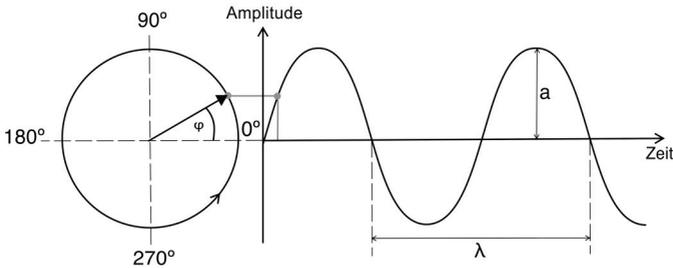


Abb. 1.9: Konstruktion der Sinusschwingung aus einer Kreisbahn

Die Schwingungen pro Sekunde werden als *Frequenz* f bezeichnet und erhalten die Einheit [Hz].¹⁰

$$f = \frac{1}{s} \quad (\text{Formel 1.3})$$

Einheit [Hz]

⁹ Hermann von Helmholtz (1821 – 1894)

¹⁰ Zu Ehren von Heinz Rudolf Hertz (1857 – 1894)

Frequenz und Tonhöhe

Eine hohe Frequenz entspricht einem hohen Ton, eine niedrige Frequenz einem tiefen Ton. Für uns Menschen relevant ist der hörbare Schall zwischen dem tiefsten Ton mit einer Frequenz von ca. 20 Hz und dem höchsten Ton mit ca. 20 kHz. Für Menschen unhörbar ist Infraschall unterhalb von 20 Hz (diesen hören z.B. Elefanten) und Ultraschall oberhalb von 20 kHz (z.B. das Echolot der Fledermäuse).

Amplitude a = Die stärkste Auslenkung der Schwingung. Wird auch Scheitelwert genannt.

Phase φ = Bestimmter, wiederkehrender „Punkt“ im Ablauf einer Schwingung. Wird als Phasenwinkel in [°] angegeben.

Wellenlänge λ = Bei Schwingungen in der Luft ist die Wellenlänge der Abstand zweier mit gleicher Phase schwingenden Teilchen. Berechnung von λ :

$$\lambda = \frac{c}{f} \quad (\text{Formel 1.4})$$

Einheit [m]

1.2.3. Überlagerung von Schwingungen

Einzelne Schwingungen können sich überlagern und es kommt zur Bildung von Kombinationsschwingungen, die auch Interferenzen genannt werden.

In Abb. 1.10 ist eine konstruktive Interferenz von zwei kohärenten Sinusschwingungen mit gleicher Phase (0°) dargestellt. Die Amplituden addieren sich und das resultierende Ausgangssignal hat damit einen größeren Pegel.¹¹ Kohärenz bedeutet, dass bei den Signalen eine linearere Abhängigkeit von Frequenz und Phase gegeben ist. Das Gegenteil hiervon sind inkohärente Signale, d.h. hier ändern sich Frequenz und Phase ständig und unregelmäßig.

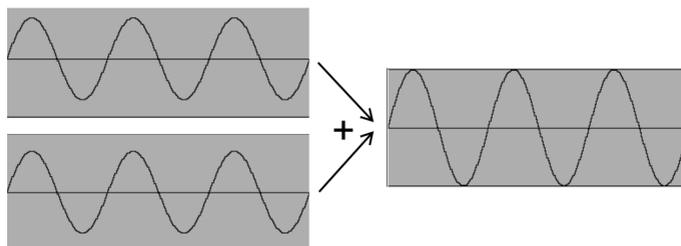


Abb. 1.10: Überlagerung von zwei Sinusschwingungen mit gleicher Phase

¹¹ Resultierender Pegel: +6 dB; Mehr dazu im Kap. 8. „Der Pegel“

Abb. 1.11 zeigt dagegen die Summierung zweier kohärenter Sinusschwingungen mit gleichem Pegel aber entgegengesetzter Phase (180°). Es kommt hier zu einer destruktiven Interferenz, d.h. die Signale löschen sich gegenseitig aus.

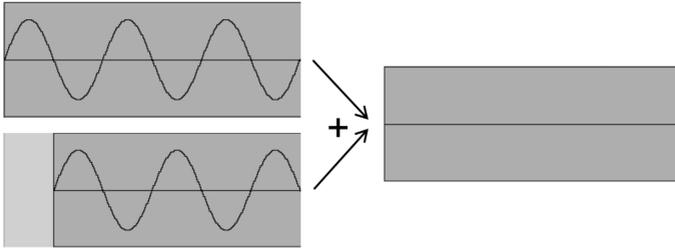


Abb. 1.11: Überlagerung mit entgegengesetzter Phase

Bei zwei Signalen mit unterschiedlichen Frequenzen entsteht bei der Überlagerung ein komplexes Schwingungsmuster und damit ein neuer Klang (Abb. 1.12).

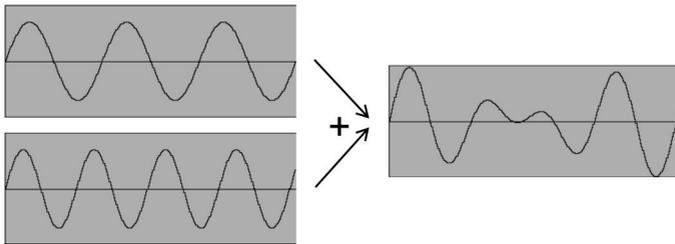


Abb. 1.12: Klang 440 Hz und 600 Hz

Weichen die Frequenzen der beiden Signale nur geringfügig, d.h. wenige Hertz voneinander ab, so kommt es zu einer Schwebung. Beispiel: Zwei Sinusschwingungen mit 440 und 441 Hz werden gleichzeitig wiedergegeben. In Abb. 1.13 wurde ein Zeitfenster von 2 Sekunden gewählt, damit die sich ergebende Schwebung von 1 Hz bei der Überlagerung besser sichtbar wird.

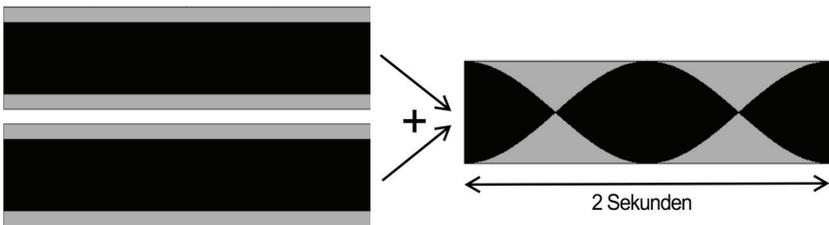


Abb. 1.13: Schwebung 440 Hz und 441 Hz

1.3. Tonhöhe und Intervalle

1.3.1. Wahrnehmung der Tonhöhe

Bei einem Hörtest werden nacheinander zwei Sinustöne mit unterschiedlicher Frequenz bzw. Tonhöhe wiedergegeben. Die Probanden sollen den Tonhöhenabstand abschätzen.

- Erste Hörprobe: Sinuston mit 100 Hz, anschließend ein Sinuston mit 200 Hz
→ $\Delta f = 100$ Hz
- Zweite Hörprobe: Sinuston mit 1000 Hz, danach mit 1100 Hz
→ $\Delta f = 100$ Hz

Der Tonhöhenabstand im ersten Versuch erscheint den Probanden größer als bei der zweiten Hörprobe, obwohl in beiden Fällen Δf mit 100 Hz gleich ist. Erklärung dafür: Der Mensch empfindet die Tonhöhe in Verhältnissen. Nur gleiche Tonhöhenverhältnisse werden auch gleich bewertet.

Eine Frequenzverdoppelung mit dem Verhältnis von 2:1, wie bei der ersten Hörprobe, trägt als musikalisches Intervall die Bezeichnung „Oktave“.

1.3.2. Intervalle

1.3.2.1. Musikalische Intervalle

Ein Intervall ist der Tonhöhenabstand zwischen zwei Tönen. Intervalle haben eine musikalische Bezeichnung, können aber auch als Zahlenverhältnis der Schwingungen angegeben werden. Das kleinste notierbare Intervall ist der Halbtonschritt, der auch kleine Sekunde genannt wird. Eine Oktave wird in 12 Halbtonschritten unterteilt.

In der westlichen Musik gibt es verschiedene Skalen, die unterschiedliche Verhältnisse für die Töne innerhalb einer Oktave definieren: Die natürliche, die pythagoräische und die wohltemperierte Skala. In Tabelle 1.2 sind die natürliche und pythagoräische Skala gegenübergestellt.

Tabelle 1.2: Musikalische Intervalle¹²

Intervall	Halbtonschritte	Verhältnisse natürliche Skala	Verhältnisse pythagoräische Skala
Prime	0	1 : 1	1 : 1
Kleine Sekunde	1	16 : 15	256 : 243 *
Große Sekunde	2 (=Ganzton)	9 : 8	9 : 8
Kleine Terz	3	6 : 5	*
Große Terz	4	5 : 4	81 : 64
Quarte	5	4 : 3	4 : 3
Übermäßige Quarte	6	7 : 5	*
Quinte	7	3 : 2	3 : 2
Kleine Sexte	8	8 : 5	*
Große Sexte	9	5 : 3	27 : 16
Kleine Septime	10	7 : 4	*
Große Septime	11	15 : 8	243 : 128
Oktave	12	2 : 1	2 : 1

* = Später eingefügte, zusätzliche Töne (Die schwarzen Tasten beim Klavier, wenn von der C-Dur-Tonleiter ausgegangen wird).

Die natürliche und pythagoräische Skala haben jeweils bei unterschiedlichen Intervallen gewisse Konsonanzen und Dissonanzen im Klang. Mit der wohltemperierten Stimmung wird als Kompromisslösung auf die musikalische Reinheit der Intervalle verzichtet und die Oktave in 12 gleiche Halbtonschritte unterteilt. Das Zahlenverhältnis eines Halbtonschrittes lässt sich dann wie folgt berechnen:

$$s_{\text{Halbton}} = 2^{\frac{1}{12}} : 1 \approx 1,0595 \quad (\text{Formel 1.5})$$

Das Ergebnis weicht von den in der Tabelle aufgeführten Verhältnisse von 16:15≈1,0667 und 256:243≈1,0535 etwas ab. Diese geringfügige Abweichung nehmen die meisten Zuhörer aber nicht wahr. Der Vorteil der wohltemperierten Stimmung liegt darin, dass ein Tonartwechsel sehr einfach möglich ist.¹³

Kammerton a'

Als Referenz für die Stimmung von Musikinstrumenten wurde der Kammerton a' mit 440 Hz festgelegt. Stimmgabeln schwingen in dieser Frequenz. Innerhalb eines Ensembles kann aber auch eine andere Grundschwingung für den Referenzton gewählt werden, z.B. 444 Hz für moderne Musik mit E-Gitarren oder 438 Hz für klassische Musik.

¹² vgl. von Helmholtz, 1968, Seite 25 bis 28, Roederer, 1995, Seite 209 bis 212 und Veit, 2005, Seite 37 und 38

1.3.2.2. Intervalle in der Ton- und Messtechnik

Halbtonschritt und Cent

Der Halbtonschritt ist die Basis für die wohltemperierte Stimmung der Musikinstrumente. Ein Halbtonschritt kann noch feiner in Cent aufgelöst werden, er entspricht 100 Cent. Das Cent findet sich als Parameter in elektronischen Geräten zur Klangbeeinflussung z.B. dem Pitch Shifter¹⁴ oder auch als Maßeinheit auf der Skala von Stimmgeräten (Abb. 1.12).



Abb. 1.14: Elektronisches Stimmgerät

Große Terz

Der Hörbereich des Menschen umfasst ungefähr 31 große Terzen. Eine große Terz kann als 1/3 einer Oktave gesehen werden. Das mathematisch-physikalische Zahlenverhältnis beträgt demnach also:¹⁵

$$s_{\text{gro\ss e Terz}} = 2^{\frac{1}{3}} : 1 \approx 1,2599 \quad (\text{Formel 1.6})$$

In einer Norm sind die Mittenfrequenzen für Terzbandfilter wie folgt festgelegt (DIN EN 61260: Bandfilter für Oktaven und Bruchteile von Oktaven):

20 Hz / 25 Hz / 31,5 Hz / 40 Hz / 50 Hz / 63 Hz / 80 Hz / 100 Hz / 125 Hz / 160 Hz / 200 Hz / 250 Hz / 315 Hz / 400 Hz / 500 Hz / 630 Hz / 800 Hz / 1 kHz / 1,25 kHz / 1,6 kHz / 2 kHz / 2,5 kHz / 3,15 kHz / 4 kHz / 5 kHz / 6,3 kHz / 8 kHz / 10 kHz / 12,5 kHz / 16 kHz / 20 kHz.

Oktave

Der Hörbereich des Menschen umfasst ungefähr 10 Oktaven. Die genormten Mittenfrequenzen für Oktavbandfilter sind:

31,5 Hz / 63 Hz / 125 Hz / 250 Hz / 500 Hz / 1 kHz / 2 kHz / 4 kHz / 8 kHz /

¹³ vgl. Roederer, 1995, Seite 212 und Veit, 2005, Seite 38

¹⁴ s. Kap. 15.3.3.6. „Pitch Shift“

¹⁵ vgl. Görne, 2007, Seite 154

16 kHz.

1.4. Graphische Darstellung von Audiosignalen

Audiosignale können auf verschiedene Weisen graphisch dargestellt werden:

- In einem Amplituden-Zeit-Diagramm wie in Abb. 1.15 wird die Wellenform eines Audiosignals sichtbar.

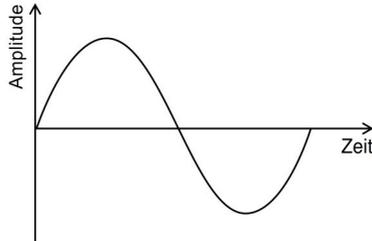


Abb. 1.15: Amplituden-Zeit-Diagramm
(Wellenform einer Sinusschwingung)

- Durch ein mathematisches Verfahren, das sich Fourier-Transformation¹⁶ nennt, kann ein Abschnitt im Zeitbereich in den Frequenzbereich umgerechnet werden. Das Ergebnis ist ein diskretes Kurzzeitspektrum wie es in Abb. 1.16 zu sehen ist.¹⁷

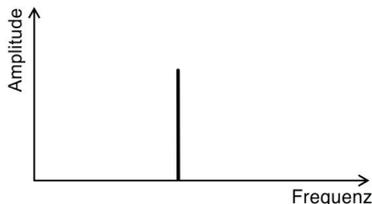


Abb. 1.16: Amplituden-Frequenz-Diagramm
(Frequenzspektrum einer Sinusschwingung)

- Ein Wasserfalldiagramm wie in Abb. 1.17 ist schließlich die dreidimensionale Darstellung eines Frequenzspektrums über die Zeit, d.h. es werden mehrere diskrete Kurzzeitspektren hintereinander aufgezeichnet.

¹⁶ Jean Baptiste Joseph Fourier (1768 – 1830); vgl. Veit, 2005, Seite 19

¹⁷ vgl. Görne, 2007, Seite 155

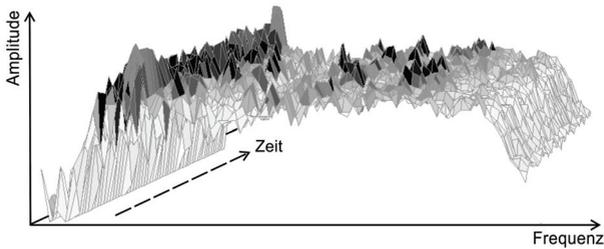


Abb. 1.17: Wasserfalldiagramm
(Rauschen über eine Beschallungsanlage)

1.5. Ton, Klang, Geräusch und Lärm

Ein *reiner Ton* hat nur eine bestimmte Frequenz und wird auch Sinuston genannt. Reine Töne werden zum Beispiel bei Hörtests benötigt oder zum Einmessen elektroakustischer Anlagen. Abb. 1.18 zeigt links die Wellenform und rechts das zugehörige Spektrum eines reinen Tones.

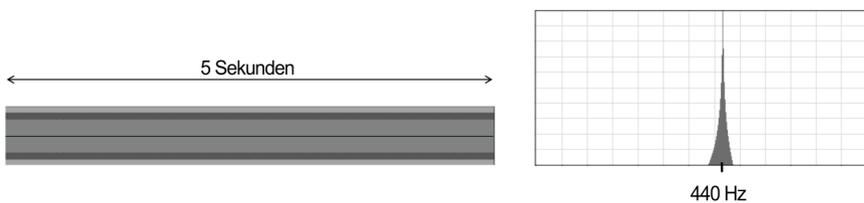


Abb. 1.18: Reiner Ton (Sinusschwingung mit 440 Hz)

Schallerzeuger wie z.B. Musikinstrumente haben die Eigenschaft, dass sie nicht in einer einzigen Frequenz schwingen. Neben der tiefsten Frequenz, dem Grundton, treten auch Schwingungen mit höheren Frequenzen auf. Diese zusätzlichen Schwingungen nennt man Obertöne. Ein *gewöhnlicher Ton* ist demnach ein Gemisch aus dem Grundton und dazugehörigen Obertönen (Abb. 1.19).

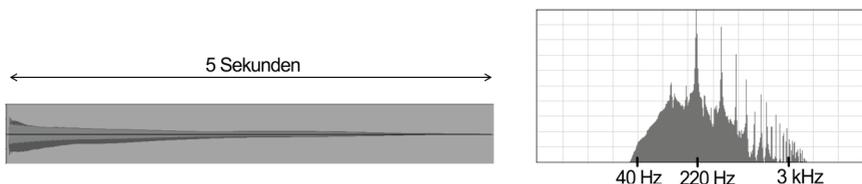


Abb. 1.19: Gewöhnlicher Ton (Note a = 220 Hz; Auf einem E-Bass)

Beim *Klang* sind mehrere unterscheidbare Töne überlagert. Beispiel: Auf einem Instrument werden gleichzeitig zwei oder mehr Töne gespielt, es ertönt ein Akkord. Auch beim *Geräusch* werden mehrere Töne überlagert, nur lassen sich hier keine einzelnen Töne unterscheiden. Beispiele: Papierrascheln, Wasserrauschen oder das rosa Rauschen als ein synthetisch erzeugtes Geräusch bzw. Messsignal (Abb. 1.20).

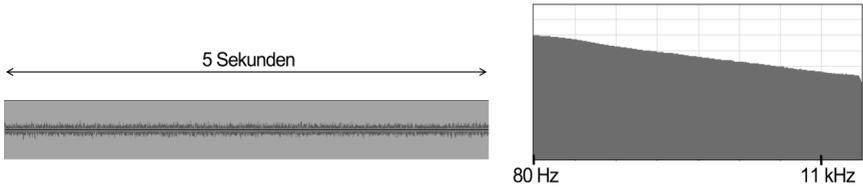


Abb. 1.20: Geräusch (Rosa Rauschen)¹⁸

Bei *Sprache und Musik* ändert sich zeitlich strukturiert die Zusammensetzung der Frequenzen von Tönen, Klängen und Geräuschen (Abb. 1.21).

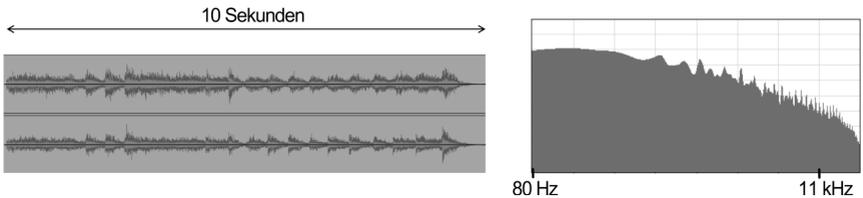


Abb. 1.21: Musik (Ausschnitt aus dem Musical „42nd Street“)

Lärm ist ein subjektives Empfinden für unangenehm wirkende Schallquellen. Sämtliche Schallereignisse werden zum Lärm, wenn die Lautstärke die Schmerzgrenze oder zumindest die Lästigkeitsgrenze überschreitet. Durch Verordnungen und Gesetze werden daher Lärmbelastungsgrenzen definiert, bei denen die Gesundheit nicht gefährdet wird (Abb. 1.22).¹⁹

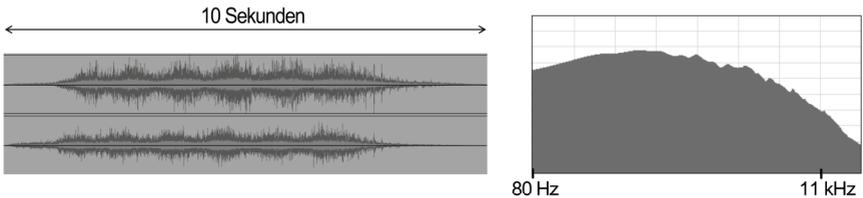


Abb. 1.22: Lärm (Vorbeifahrender Zug in 5m Entfernung)

¹⁸ Die Amplitude nimmt um 3 dB/Oktave ab, wie in dem Frequenzspektrum gut zu sehen ist. Alle Frequenzbereiche werden beim rosa Rauschen in etwa gleich laut empfunden.

¹⁹ s. Kap. 5. „Lärmschutz“

1.6. Obertöne und Klangfarbe

Obertöne sind spezifisch für jedes Musikinstrument. Die Häufigkeit und der Pegel der Obertöne sind entscheidend für die Empfindung der Klangfarbe.²⁰ In einem Obertonspektrum werden graphisch die Frequenz, die Anzahl und der Pegel der Obertöne aufgezeichnet. Der Grundton wird hier als erste Harmonische definiert.

Beispiel: Auf einem Instrument wird der Ton a angespielt mit der Grundtonschwingung von 220 Hz (Tabelle 1.3 und Abb. 1.23).

Tabelle 1.3: Grundton und Obertöne²¹

Grundton $f_0 = 220$ Hz	= 1. Harmonische
$\Delta f = 220$ Hz, Verhältnis 2 : 1 (Oktave)	
1. Oberton $f_1 = 2 * f_0 = 440$ Hz	= 2. Harmonische
$\Delta f = 220$ Hz, Verhältnis 3 : 2 (Quinte)	
2. Oberton $f_2 = 3 * f_0 = 660$ Hz	= 3. Harmonische
$\Delta f = 220$ Hz, Verhältnis 4 : 3 (Quarte)	
3. Oberton $f_3 = 4 * f_0 = 880$ Hz	= 4. Harmonische
$\Delta f = 220$ Hz, Verhältnis 5 : 4 (große Terz)	
4. Oberton $f_4 = 5 * f_0 = 1100$ Hz	= 5. Harmonische
etc.	

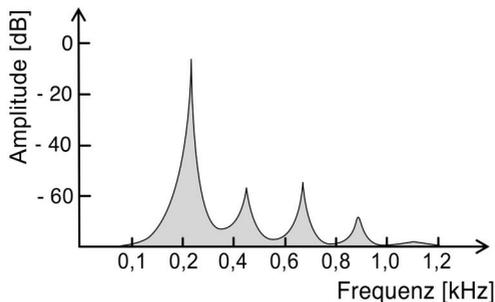


Abb. 1.23: Obertonspektrum

²⁰ vgl. von Helmholtz, 1968, Seite 37

²¹ vgl. Veit, 2005, Seite 41

1.7. Formanten

Nicht nur die Obertöne tragen zur Klangfarbe bei, wesentlich sind auch die Formanten. Dies sind Resonanzfrequenzen, welche aus dem Gesamtspektrum als Überhöhung hervorstechen und den typischen Klangcharakter eines Instrumentes oder auch der menschlichen Stimme prägen. So können zum Beispiel den Vokalen beim Sprechen und Singen bestimmte Frequenzbereiche zugeordnet werden (Tabelle 1.4 und Abb. 1.24).

Tabelle 1.4: Formanten der Vokale²²

Vokal	Frequenzbereich der Formanten
a	800 bis 1200 Hz
e	400 bis 600 Hz und 1,2 bis 2,6 kHz
i	200 bis 400 Hz und 3,0 bis 3,5 kHz
o	400 bis 600 Hz
u	200 bis 400 Hz

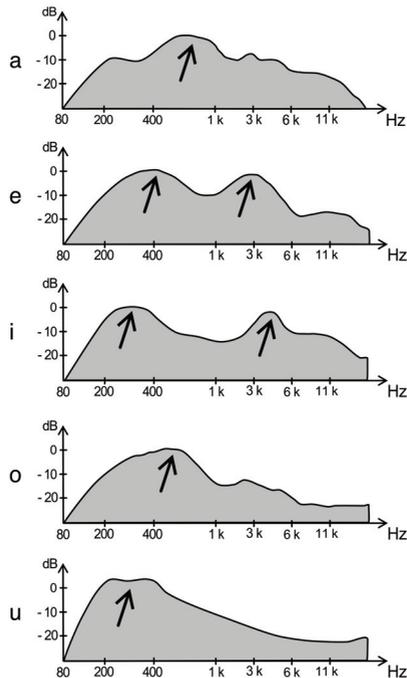


Abb. 1.24: Frequenzspektren von Vokalen

²² vgl. Dickreiter, 1987, Seite 62 und 74 und Veit, 2005, Seite 48

1.8. Übungsaufgaben

Aufgabe 1:

In welcher Richtung schwingen die Luftteilchen einer Schallwelle in der Luft? Welchen Fachbegriff benutzt man für diese Art der Wellenausbreitung?

Aufgabe 2:

Skizziere anhand einer Sinusschwingung die Begriffe „Amplitude“ und „Wellenlänge“.

Aufgabe 3:

Wie schnell breitet sich Schall in der Luft aus? (Durchschnittlicher Wert bei 20°C und mittlerer Luftfeuchte)

Aufgabe 4:

Gebe für folgende Frequenzen die Wellenlänge an bei einer Schallausbreitung in der Luft:

34,4 Hz =

1 kHz =

10 kHz =

20 kHz =

Aufgabe 5:

- Wie lange braucht Schall in der Luft, um 1 m zurückzulegen?
- Wie lange braucht Schall im Wasser, um 4 m zurückzulegen?

Aufgabe 6:

Auf einem Klavier wird der Ton c' mit 261,626 Hz gespielt. Welche Frequenzen haben die ersten drei Obertöne?

Aufgabe 7:

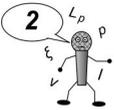
Was bezeichnet man als Infra- und was als Ultraschall?



Literaturtipp:

Dickreiter, Michael: Handbuch der Tonstudioteknik.
München: Saur Verlag.

2. Schallkenngrößen



Im zweiten Kapitel geht es um physikalische Kenngrößen des Schalls wie dem Druck, der Schnelle und der Intensität. Inhaltlich folgt dieses Thema dem ersten Kapitel und gehört damit in den Unterricht für das erste Lehrjahr.

2.1. Schalldruck p

Die Stärke der von einer Schallquelle ausgehenden Druckschwankungen in der Luft steht im direkten Zusammenhang mit der Amplitude der Schwingung. Je größer die Schallschwingung, desto stärker wird die umgebende Luft verdichtet, und umso größer ist der Schalldruck.¹

Physikalische Ableitung des Schalldrucks:

$$\text{Druck} = \frac{\text{Kraft}}{\text{Fläche}}$$

$$p = \frac{F}{A} \quad (\text{Formel 2.1})$$

Einheit [Pa]

Definition der Einheit Pascal:

$$1 \text{ Pa} = \frac{1 \text{ N}}{1 \text{ m}^2} \quad (\text{Formel 2.2})$$

2.1.1. Absoluter Schalldruckpegel L_p

Bei Versuchen mit Testpersonen wurde ermittelt, dass die Hörschwelle bei einem Sinuston mit der Frequenz von 1 kHz bei ca. 0,00002 Pa liegt. Gelangt ein Schallereignis mit diesem Schalldruck an das Trommelfell, so kann es gerade noch wahrgenommen werden. Die Schmerzgrenze liegt dagegen bei einem Schalldruck von ca. 20 Pa.²

Durch weitere Untersuchungen ist bekannt, dass der Mensch Sinnesreize in Verhältnissen wahrnimmt. Dieser Zusammenhang ist auch bekannt als Weber-Fechner-Gesetz.³ Es wurde auch festgestellt, dass die Lautstärkeempfindung proportional zum Logarithmus des Schalldrucks ist.⁴

¹ vgl. Görne, 2006, Seite 29

² vgl. Webers, 2003, Seite 102 und Veit, 2005, Seite 30

³ Nach Ernst Heinrich Weber (1795 – 1878) und Gustav Theodor Fechner (1801 – 1889)

⁴ Zum Logarithmus s. Kap. 8.1. „Was ist ein Logarithmus?“

Um die Sinneswahrnehmung nachzubilden, wird also das Verhältnis zweier Schalldrücke logarithmiert. Man erhält dabei einen Pegel, welcher in Dezibel [dB] angegeben wird. Mit der folgenden Formel lässt sich für Schalldrücke oberhalb der Hörschwelle der zugehörige Pegel berechnen:

$$L_p = 20 \lg \frac{p}{p_0} \quad (\text{Formel 2.3})$$

Einheit [dB_{SPL}], Der Index „SPL“ steht für (engl.): Sound Pressure Level

p_0 : Bezugsschalldruck mit $p_0 = 0,00002 \text{ Pa}$

Beispiel: Bei einer lauten Unterhaltung beträgt der Schalldruck ca. 0,1 Pa. Wie groß ist der absolute Schalldruckpegel in [dB_{SPL}]?

Lösung:

$$L_p = 20 \lg \frac{0,1 \text{ Pa}}{0,00002 \text{ Pa}} = 74 \text{ dB}_{\text{SPL}}$$

In Tabelle 2.1 sind einige Beispiele für verschiedene Schalldruckpegel aufgeführt (ungefähre und gerundete Werte).

Tabelle 2.1: Beispiele für Schalldruckpegel⁵

Hörschwelle	0 dB _{SPL}
Ruhiges Zimmer	10 - 30 dB _{SPL}
Flüstern	30 - 40 dB _{SPL}
Musik mit Zimmerlautstärke	50 dB _{SPL}
Normales Gespräch	60 dB _{SPL}
Laute Unterhaltung	75 dB _{SPL}
Kino (Normalpegel)	85 dB _{SPL}
Pop- / Rockkonzert	100 dB _{SPL}
Schmerzgrenze	120 dB _{SPL}
Spielzeuggewehr (Abstand 50 cm)	155 dB _{SPL}
Knallkörper (Abstand 2 m)	165 dB _{SPL}

Bei bekanntem Schalldruckpegel in [dB_{SPL}] kann über die Umkehrfunktion auch wieder der entsprechende Schalldruck errechnet werden:⁶

$$p = p_0 * 10^{\frac{L_p}{20}} \quad (\text{Formel 2.4})$$

Einheit [Pa]

⁵ vgl. Cremer und Möser, 2003, Seite 6 und Görne, 2006, Seite 32

⁶ vgl. Görne, 2007, Seite 16 und s. Kap. 8.5. „Rechnen mit Pegeln“

Beispiel: Der Schalldruckpegel bei einem Konzert beträgt $100 \text{ dB}_{\text{SPL}}$. Wie groß ist der Schalldruck in $[\text{Pa}]$?

Lösung:

$$p = 0,00002 \text{ Pa} * 10^{\frac{100}{20}} = 2 \text{ Pa}$$

Schalldruckpegel und empfundene Lautstärke

Eine Verdoppelung des Schalldrucks entspricht einer Pegelsteigerung von $+6 \text{ dB}_{\text{SPL}}$. Allerdings wird dies nicht als „doppelt so laut“ empfunden, sondern lediglich als „etwas lauter“. Um das Gefühl der doppelten Lautstärke hervorzurufen, muss der Schalldruckpegel sogar um etwa $+10 \text{ dB}_{\text{SPL}}$ erhöht werden.⁷

2.1.2. Bewertete Schalldruckpegel $[\text{dB}_A]$ bis $[\text{dB}_D]$

Da das menschliche Gehör den Schalldruck in Abhängigkeit von der Frequenz wahrnimmt, wurden die bewerteten Schalldruckpegel $[\text{dB}_A]$ bis $[\text{dB}_D]$ eingeführt. Das bedeutet, dass bei Messungen von Schalldrücken mit einem Schallpegelmessgerät ein entsprechendes Filter mit der Bezeichnung A, B, C oder D dazwischengeschaltet wird. Abb. 2.1 zeigt die genormten Bewertungskurven nach DIN EN 61672-1 (Elektroakustik, Schallpegelmessgerät Teil 1: Anforderungen):

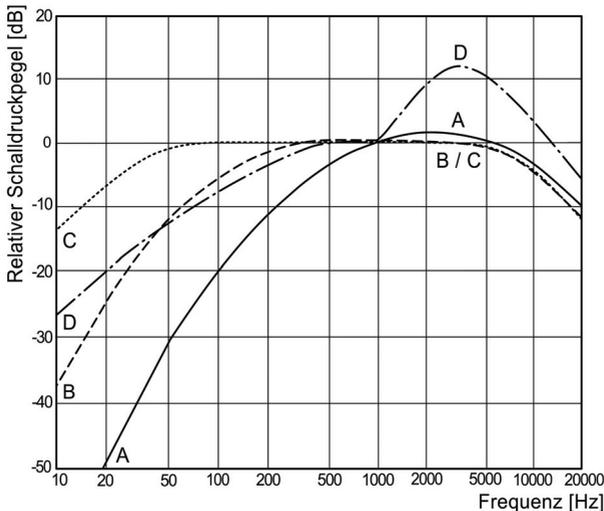


Abb. 2.1: Bewertungskurven für Schalldruckpegel

⁷ s. Kap. 4.2. „Wahrnehmung durch das Gehör“

Die Bewertungskurven für sind unterschiedliche Schalldruckpegel gedacht:⁸

- A-Filter [dB_A] = für geringe Schalldruckpegel bis $55 \text{ dB}_{\text{SPL}}$
- B-Filter [dB_B] = für mittlere Schalldruckpegel von 55 bis $85 \text{ dB}_{\text{SPL}}$
- C-Filter [dB_C] = für hohe Schalldruckpegel über $85 \text{ dB}_{\text{SPL}}$
- D-Filter [dB_D] = für sehr hohe Schalldruckpegel, z.B. Messungen an Strahltriebwerken

Entgegen diesen Empfehlungen wird bei vielen Messungen das A-Filter auch für mittlere und hohe Schalldruckpegel ausgewählt. In der Veranstaltungstechnik wird das A-Filter für die Erfassung von Durchschnittspegeln und das C-Filter bei Spitzenpegeln verwendet.⁹

2.2. Schallschnelle v

Die Schallschnelle ist die Geschwindigkeit, mit der die schwingenden Luftmoleküle um die Ruhelage oszillieren. Diese Schnelle darf nicht mit der Ausbreitungsgeschwindigkeit des Schalls verwechselt werden. Die Schallschnelle ist sehr gering und beträgt zum Beispiel bei einem Schalldruck von $0,1 \text{ Pa}$, also einer lauten Unterhaltung, nur $0,24 \text{ mm/s}$.¹⁰ An der Hörschwelle beträgt sie sogar nur noch $0,00005 \text{ mm/s}$.¹¹

Die Auslenkung der Luftmoleküle ist ebenfalls sehr klein. Bei einem Sinuston von 1 kHz mit einem Schalldruck von 20 Pa , d.h. an der Schmerzgrenze, beträgt die Auslenkung gerade mal $7,7 \text{ }\mu\text{m}$. An der Hörschwelle ist beträgt sie unvorstellbar kleine $7,7 \text{ pm}$, das ist ungefähr ein Zehntel eines Atomdurchmessers.

2.2.1. Berechnung der Auslenkung ξ der Luftmoleküle

Zunächst folgt eine Formel zur Berechnung der Auslenkung ξ , da dieser Wert anschließend für die Berechnung der Schallschnelle v benötigt wird:¹²

⁸ vgl. Eurovent, 2004, Seite 5

⁹ s. Kap. 5. „Lärmschutz“

¹⁰ Berechneter Wert für 1 kHz ; vgl. Henle, 1993, Seite 29

¹¹ Ebenfalls bei 1 kHz ; vgl. Veit, 2005, Seite 32

¹² Quelle für die Formel: Tolan, 2006, Seite 144

$$\xi = \frac{p}{c * \rho * 2\pi * f} \quad (\text{Formel 2.5})$$

Einheit [m]

p : Schalldruck [Pa]

c : Schallgeschwindigkeit

ρ : Dichte der Luft (1,21 kg/m³)

f : Frequenz [Hz]

2.2.2. Berechnung der Schallschnelle v

Berechnung der Schallschnelle v in Abhängigkeit von der Auslenkung ξ :

$$v = \xi * 2\pi * f \quad (\text{Formel 2.6})$$

Einheit [m/s]

ξ : Schallauslenkung [m]

f : Frequenz [Hz]

Der mathematische Ausdruck ($2\pi * f$) kann auch als Kreiswinkel ω in [rad/s] angegeben werden. Die Formel lautet dann:¹³

$$v = \xi * \omega \quad (\text{Formel 2.7})$$

Im Fernfeld sind Schallschnelle und Schalldruck in Phase. Das Maximum ist jeweils dort, wo die Auslenkung der Teilchen am geringsten ist. Wie der Schalldruck nimmt die Schnelle proportional mit der Entfernung von der Quelle ab:

$$p \sim v \sim \frac{1}{r} \quad (\text{Formel 2.8})$$

Im Nahfeld einer Schallquelle zeigt sich allerdings ein anderes Verhältnis: Der Schalldruck steigt weiter gleichmäßig, je näher man an die Schallquelle kommt. Die Schnelle steigt im Verhältnis zum Druck allerdings überproportional.¹⁴

$$v \sim \frac{1}{r^2} \quad (\text{Formel 2.9})$$

In Fachbüchern finden sich verschiedene Angaben darüber, wo genau der Übergang zwischen Nah- und Fernfeld liegt. Jens Blauert nimmt einen Wert von

¹³ vgl. Veit, 2005, Seite 31

¹⁴ vgl. Dickreiter, 1995, Seite 5

$\lambda/2$ an, Thomas Görne sieht den Übergang bei λ und Ivar Veit schließlich sogar bei $2 \cdot \lambda$. Letztlich läuft es darauf hinaus, dass Druck und Schnelle im Nahfeld nicht mehr phasengleich sind. Sehr dicht an der Schallquelle, d.h. bei einem Abstand von weniger als $\lambda/10$, beträgt die maximale Phasenverschiebung 90° . Der Übergang von Nah- zum Fernfeld ist also kontinuierlich.¹⁵ Eindeutig ist die Abhängigkeit von der Wellenlänge zu erkennen. Bei tiefen Frequenzen ist der Bereich des erhöhten Schnelleanstieges weiter um die Schallquelle ausgedehnt, bei hohen Frequenzen liegt der Bereich in einem kleineren Radius.¹⁶

In Abb. 2.2 werden als Beispiel die Verhältnisse von Nah- und Fernfeld für eine Frequenz von ca. 170 Hz skizziert.¹⁷

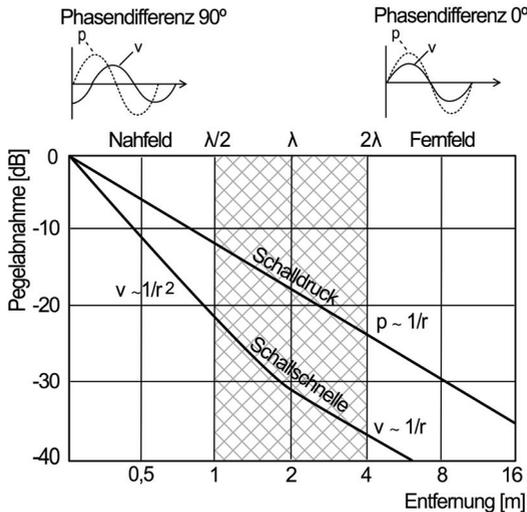


Abb. 2.2: Nahfeld und Fernfeld¹⁸

¹⁵ vgl. Blauert, 1974, Seite 23, Görne, 2006, Seite 37 und Veit, 2005, Seite 31

¹⁶ vgl. Dittmar, 1990, Seite 9

¹⁷ Die Abbildung beruht auf einer Grafik von Jens Blauert, die für dieses Buch modifiziert wurde; vgl. Blauert, 1974, Seite 23

¹⁸ vgl. Blauert, 1974, Seite 23

2.3. Schallimpedanz Z

Über die Schallgeschwindigkeit und die Dichte des Ausbreitungsmediums lässt sich die für das Medium charakteristische Schallimpedanz berechnen:

$$Z = c * \rho \quad (\text{Formel 2.10})$$

Einheit [N*s/m³]

c : Schallgeschwindigkeit [m/s]

ρ : Dichte des Ausbreitungsmediums [kg/m³]

Aber auch auf eine andere Weise kann die Schallimpedanz berechnet werden: Dividiert man den Schalldruck p durch die Schallschnelle v, so erhält man als Quotient ebenfalls die Schallimpedanz Z.

$$Z = \frac{p}{v} \quad (\text{Formel 2.11})$$

Die beiden Formeln für die Berechnung der Schallimpedanz gelten nur im Fernfeld, wenn p und v mit 0° in Phase sind. Im Nahfeld einer Kugelschallquelle wird die Schallimpedanz durch die Phasenverschiebung dagegen eine komplexe Größe:¹⁹

$$Z_{\text{Kugel}} = \frac{p(t)}{v(t)} \quad (\text{Formel 2.12})$$

Die Schallimpedanz ist dann von Interesse, wenn Schall von einem Medium in ein anderes übertritt. Aufgrund des Sachverhaltes, dass Körpergewebe und Wasser eine größere Schallimpedanz als Luft haben, müssten Schallwellen, die auf unseren Kopf treffen, eigentlich vollständig reflektiert werden (Tabelle 2.2). Da unser Gehör aber als Impedanzwandler funktioniert, können wir trotzdem hören. Mehr dazu im Kapitel 4. „Das menschliche Gehör“.

Tabelle 2.2: Vergleich verschiedener Schallimpedanzen²⁰

	c	ρ	Z
Luft 20°C	344 m/s	1,21 kg/m ³	416 N*s/m ³
Wasser 20°C	1 484 m/s	998 kg/m ³	1 480 000 N*s/m ³
Körpergewebe	1 540 m/s	1070 kg/m ³	1 650 000 N*s/m ³

¹⁹ vgl. Zollner und Zwicker, 2003, Seite 73

²⁰ vgl. Eska, 1997, Seite 32 und 37

2.4. Schallintensität I

Die bisher betrachteten Kenngrößen Schalldruck, Schallschnelle und Schallimpedanz sind lineare *Feldgrößen*. Die Schallintensität ist dagegen eine *Energiegröße* und kann aus den Feldgrößen abgeleitet werden.

Definition der Schallintensität: Die Schallenergie in Watt, die in einer bestimmten Zeiteinheit durch eine definierte Fläche von 1 m² hindurch tritt. Die Einheit ist [W/m²].

2.4.1. Berechnung der Schallintensität I

$$I = p \cdot v \quad (\text{Formel 2.13})$$

Einheit [W/m²]

p : Schalldruck [Pa]

v : Schallschnelle [m/s]

2.4.2. Schallintensitätspegel L_I

Zur Berechnung des Schallintensitätspegels wird die Bezugsschallintensität I₀ mit 10⁻¹² W/m² als Referenz herangezogen. Dies entspricht einer Schallintensität bei einem sehr leisen, gerade noch wahrnehmbaren Ton mit einer Frequenz von 1 kHz.²¹

$$L_I = 10 \lg \frac{I}{I_0} \quad (\text{Formel 2.14})$$

Einheit [dB]

Die Betrachtung der Schallintensität ist vor allem bei Messungen zum Zwecke des Schallschutzes von Interesse. Die Schallintensität hat einen Betrag und eine Richtung, und so kann auch in lauten Umgebungen der Ursprung einer Schallemission lokalisiert werden. Besondere Meßmethoden, die es erst seit wenigen Jahren gibt, erlauben die Erfassung der Schallintensität.²² Beispiel: In einer Werkshalle mit mehreren lauten Maschinen soll die Lärmquelle mit der höchsten Intensität ermittelt werden, damit gezielte Maßnahmen zur Reduzierung der Schallemission durchgeführt werden können. Die Messung des Schalldruckpegels alleine kann dies aber nicht erbringen, da Schall aus allen Richtungen erfasst wird und Reflexionen im Raum das Messergebnis mit beeinflussen.

²¹ vgl. Roederer, 1995 Seite 98 und Veit, 2005, Seite 35

²² vgl. die PDF-Dokumente von Brüel & Kjaer (Seitenaufwurf Oktober 2008):

<http://www.bruelkjaer.de/tbdoc/3697/sipruefstand.pdf>

<http://www.bruelkjaer.de/tbdoc/3698/Weimar.pdf>

2.5. Schalleistung und Schallenergie.

2.5.1. Schalleistung P

Schall mit einer bestimmten Intensität dringt bei der Ausbreitung durch eine bestimmte Fläche, die senkrecht zur Ausbreitungsrichtung steht. Das Produkt von Schallintensität zur Fläche ist die Schalleistung:

$$P = I \cdot A \quad (\text{Formel 2.15})$$

Einheit [W]

I : Schallintensität [W/m^2]

A : Durchschallte Fläche [m^2]

Diese Formel gilt streng genommen nur für das Fernfeld. Aufgrund der Phasenverschiebung von p und v im Nahfeld einer Schallquelle hat die Schalleistung hier einen Blind- und Wirkanteil.²³

In Tabelle 2.3 sehen wir einige Beispiele für die Schalleistung von verschiedenen Schallquellen.

Tabelle 2.3: Beispiele für die Schalleistung²⁴

Schallquelle	Schalleistung
Gespräch mit normaler Lautstärke	ca. 0,000007 W
Schreien	ca. 0,002 W
Klavier	ca. 0,2 W
Autohupe	ca. 5 W
Großes Orchester	ca. 70 W
Beschallung bei einem Rockkonzert	ca. 100 W
Sirene	ca. 1000 W

2.5.2. Schalleistungspegel L_w

Für den Schalleistungspegel ist die Bezugsschalleistung P_0 mit 10^{-12} W definiert.

$$L_w = 10 \lg \frac{P}{P_0} \quad (\text{Formel 2.16})$$

Einheit [dB]

²³ vgl. auch Kap. 6.1.2. „Wechselstrom“: Wirk-, Schein- und Blindleistung

²⁴ vgl. Veit, 2005, Seite 35

2.5.3. Schallenergie W

Die Schallenergie kann für den Direkt- und Diffusschall berechnet werden. Diese Begriffe werden im nächsten Kapitel erklärt und sind nicht mit dem Nah- und Fernfeld zu verwechseln.

Energie des Direktschalls:

$$W_{\text{direkt}} = \frac{P}{4 * c * \pi * r^2} \quad (\text{Formel 2.17})$$

Energie des Diffusschalls:

$$W_{\text{diffus}} = \frac{4 * P}{A * c} \quad (\text{Formel 2.18})$$

Einheit [$W*s/m^3$] oder auch [Joule/ m^3]

P : Schalleistung [W]

c : Schallgeschwindigkeit

r^2 : Abnahme des Schallintensitätspegels mit der Entfernung [m] $L_1 \sim 1/r^2$

A : äquivalente Absorptionsfläche des Raumes [m^2]

2.6. Übungsaufgaben

Aufgabe 1:

Wie wird eine sehr tiefe Frequenz von 50 Hz bei der Messung des bewerteten Schalldruckpegels mit dem A-Filter bewertet?

Aufgabe 2:

Was ist der Unterschied zwischen der Schallgeschwindigkeit und der Schallschnelle?

Aufgabe 3:

Wie lautet die Formel des absoluten Schalldruckpegels? Welchen Pegel hat ein Schalldruck von 0,1 Pa?

Aufgabe 4:

Eine Kugelschallquelle strahlt eine Schalleistung von 10 Watt ab. Wie groß ist die Direktschallenergie in 1 m Entfernung?

Aufgabe 5:

Recherchiere im Internet, wie Messungen der Schallintensität prinzipiell erfolgen können.

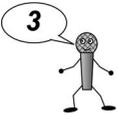


Literaturtipp:

Veit, Ivar: Technische Akustik.

Würzburg: Vogel Fachbuch.

3. Grundlagen der Akustik



Zusammen mit den beiden vorangegangenen Kapiteln komplettiert dieses Kapitel die physikalischen Grundlagen der Akustik und damit das Grundlagenwissen, welches im ersten Lehrjahr vermittelt wird.

3.1. Akustische Erscheinungen

3.1.1. Reflexion

3.1.1.1. Reflexion an ebenen Flächen

Trifft eine Schallwelle auf eine ebene Fläche, so wird sie mit dem gleichem Winkel wieder reflektiert. Der Einfallswinkel α ist gleich dem Ausfallswinkel α' (Abb. 3.1).

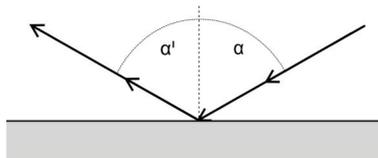


Abb. 3.1: Reflexion

Die reflektierende Fläche muss allerdings wenigstens so groß sein wie mehrere Wellenlängen, andernfalls tritt eine Beugung um die Fläche auf oder es kommt nur zu einer Teilreflexion.¹ Ist die Fläche größer als ca. drei Wellenlängen, so kommt es zur vollständigen Reflexion. Hat die Fläche dagegen nur die Abmessungen von ungefähr einer Wellenlänge, findet eine fast vollständige Beugung um das Hindernis statt.²

Druckstau bei frontalem Schalleinfall

Trifft Schall frontal auf ein Hindernis, das größer ist als die Wellenlänge, so kommt es zum Druckstau, d.h. der einfallende und reflektierte Schall überlagern sich gleichphasig und es kommt zu einer konstruktiven Interferenz.³

¹ vgl. Dickreiter, 1995, Seite 14 und 15

² vgl. Meyer, 1995, Seite 144

und Curdt, 2005, Vorlesung Grundlagen der Raumakustik, Seite 8 und 9

³ s. Kap. 1.2.3. „Überlagerung von Schwingungen“

3.1.1.2. Reflexion bei gewölbten Flächen

An gewölbten Flächen kommt es zur Fokussierung und/oder Streuung der Schallwellen, je nach Abstand der Schallquelle zur Fläche. Abb. 3.2 zeigt drei Fälle mit verschiedenen Positionen der Schallquelle vor einer gekrümmten Fläche.

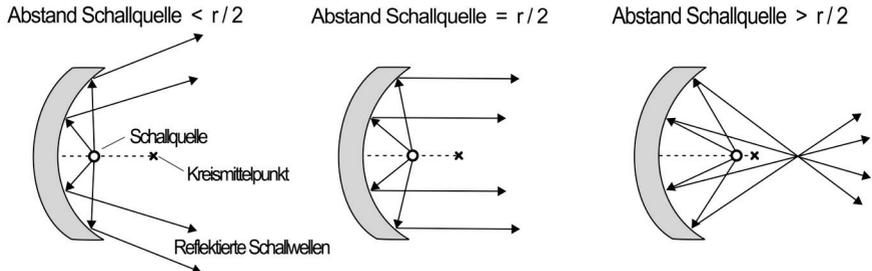


Abb. 3.2: Reflexion an gewölbten Flächen⁴

r = Kreisradius der gekrümmten Fläche

3.1.2. Diffuse Streuung

Trifft eine Schallwelle auf eine unregelmäßige Oberfläche, so wird sie in alle Richtungen gestreut. Allerdings muss auch dies wieder im Zusammenhang mit der Wellenlänge betrachtet werden. In Abb. 3.3 ist die Wellenlänge λ vergleichbar mit den Abmessungen der einzelnen Teilflächen. Hier kommt es zu einer diffusen Streuung des Schalls in alle Richtungen.

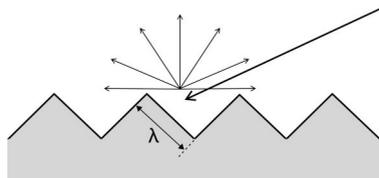


Abb. 3.3: Diffuse Streuung
Bildquelle: Goertz, 2001, Seite 47

Ist die Wellenlänge aber deutlich größer oder kleiner als die Teilflächen, dann tritt wieder eine Reflexion nach den vorher beschriebenen Gesetzmäßigkeiten auf.

3.1.3. Abschattung und Beugung

Trifft eine Schallwelle auf ein Hindernis, so wird sie um dieses herum gebeugt, solange das Hindernis klein im Verhältnis zur Wellenlänge ist. Ist das Hindernis groß gegenüber der Wellenlänge, so gibt es einen Schallschatten hinter dem Objekt (Abb. 3.4).

⁴ vgl. Dickreiter, 1987, Seite 13 und 14

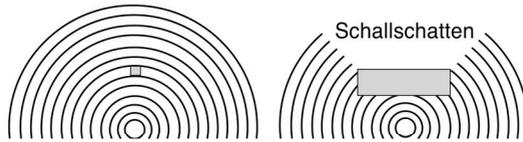


Abb. 3.4: Abschattung und Beugung
Bildquelle: Goertz, 2001, Seite 48

Trifft eine Schallwelle auf einen Spalt z.B. in einer Wand, dann wird der Schall hinter dem Spalt gebeugt, wenn die Wellenlänge groß gegenüber den Abmessungen des Spaltes ist. Der Schall breitet sich dann hinter dem Spalt punktförmig aus (Abb. 3.5).⁵

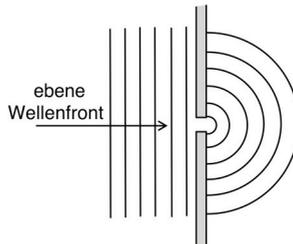


Abb. 3.5: Beugung an einem Spalt bei großer Wellenlänge

Ist die Wellenlänge klein gegenüber dem Spalt, so tritt der Schall als gerichteter Strahl durch die Öffnung (Abb. 3.6).⁶

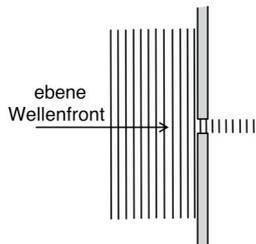


Abb. 3.6: Schallstrahl an einem Spalt bei kleiner Wellenlänge

⁵ vgl. Dittmar, 1990, Seite 13

⁶ vgl. Dittmar, 1990, Seite 13 und Veit, 2005, Seite 59

3.1.4. Stehende Wellen

Entsprechen die Entfernungen paralleler Flächen eines Raumes dem Vielfachen der halben Wellenlänge, so bilden sich stehende Wellen, die sog. Moden. Stehende Wellen bilden im Raum ein Muster aus Schalldruckminima und -maxima, die ortsabhängig zur Überhöhung oder Auslöschung von Resonanzfrequenzen und damit zu Klangfarbenveränderungen führen. Je größer der Raum ist, desto tiefer liegt der Bereich störender Raumresonanzen. Parallele Flächen sollten bei der Raumarchitektur vermieden werden (Abb. 3.7).

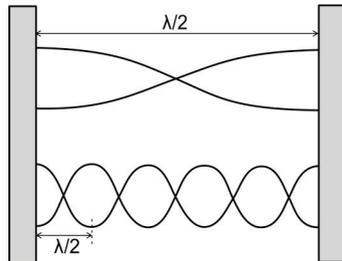


Abb. 3.7: Stehende Wellen zwischen zwei parallelen Flächen
Bildquelle: Dickreiter, 1987, Seite 13

3.1.5. Kammfiltereffekt

Als Kammfiltereffekt bezeichnet man Verstärkungen und Auslöschungen im Frequenzgang (Abb. 3.8) die zustande kommen durch:

- Frühe und pegelstarke Reflexionen ca. 1 bis 15 ms nach dem Direktschall, zum Beispiel durch ein Notenpult hinter dem Mikrofon oder die Skriptauflage eines Rednerpultes⁷
- Nah zusammen positionierte Mikrofone mit einer Distanz von unter einem Meter, die das gleiche Schallereignis aufnehmen. Bei der Zusammenmischung der Signale kommt es dann zum Kammfiltereffekt
- Elektronische Effektgeräte wie z.B. Phaser und Flanger⁸

Bei bekannter Laufzeitdifferenz Δt des Schalls lassen sich die Frequenzen der Senken (engl.: Notch \rightarrow Index n) und Überhöhungen (engl.: Peaks \rightarrow Index p) wie folgt berechnen:⁹

⁷ vgl. Curdt, 2005, Vorlesung Grundlagen der Raumakustik, Seite 24

⁸ s. Kap. 15.3. „Effektgeräte“

⁹ Quelle für die Formel: Rode, 2005, Seite 15 und 16

Erste Senke f_{n1} :

$$f_{n1} = \frac{1}{2 * \Delta t} \quad (\text{Formel 3.1})$$

Weitere Senken f_{nx} :

$$f_{nx} = x * f_{n1} \quad \text{für } x = 3, 5, 7, \dots \quad (\text{Formel 3.2})$$

Überhöhungen im Spektrum f_{py} :

$$f_{py} = y * f_{n1} \quad \text{für } y = 2, 4, 6, \dots \quad (\text{Formel 3.3})$$

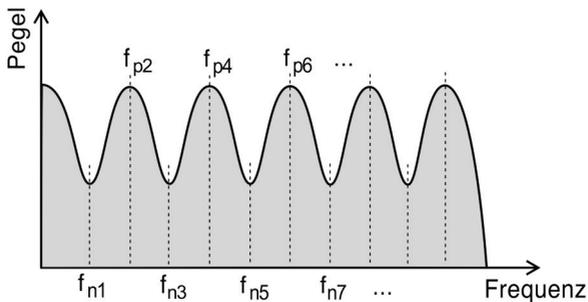


Abb. 3.8: Kammfiltereffekt

3.1.6. Dopplereffekt¹⁰

Bei einer bewegten Schallquelle werden die Schallwellen in Bewegungsrichtung gestaucht und auf der abgewandten Seite gestreckt (Abb. 3.9). Die Wellenlänge in Bewegungsrichtung ist daher kürzer und der hörbare Ton ist höher. Der Ton auf der Rückseite ist tiefer, da hier die Wellenlänge größer ist.



Abb. 3.9: Dopplereffekt bei einer bewegten Schallquelle

¹⁰ Zu Ehren von Christian Doppler (1803 – 1853)

Berechnung der Dopplerfrequenzen:¹¹

- Schallquelle nähert sich einem unbewegten Zuhörer:

$$f_1 = \frac{f}{1 - \frac{v}{c}} \quad (\text{Formel 3.4})$$

- Schallquelle entfernt sich:

$$f_2 = \frac{f}{1 + \frac{v}{c}} \quad (\text{Formel 3.5})$$

f : Frequenz [Hz]

c : Schallgeschwindigkeit [m/s]

v : Geschwindigkeit der Schallquelle [m/s]

Wie aus den Formeln ersichtlich ist, gibt es jeweils konstante Dopplerfrequenzen. In der Realität wird aber bei der Annäherung einer Schallquelle ein stetiger Anstieg der Tonhöhe wahrgenommen und genauso eine kontinuierliche Abnahme bei der Wegbewegung. Dies kann als psychoakustischer Effekt erklärt werden, wobei die Empfindung der Lautstärke mit zur Wahrnehmung der Tonhöhe beiträgt. Die Lautstärke erhöht sich bei der Annäherung und die Wahrnehmung täuscht uns vor, dass die Frequenz kontinuierlich steigt. Umgekehrt verhält es sich bei der Wegbewegung.¹²

¹¹ vgl. Veit, 2005, Seite 61

¹² vgl. Walker, 2008, Seite 163

3.1.7. Absorption von Schall

3.1.7.1. Schallschnelleabsorber

Beim Schnelleabsorber hindert eine Schicht aus porösem Schaumstoff die schwingenden Luftmoleküle in ihrer Bewegung und wandelt die Bewegungsenergie des Schalls in Wärme um. Die Dicke der Schicht muss mindestens $1/4$ der Wellenlänge der niedrigsten zu dämpfenden Frequenz entsprechen (Abb. 3.10).

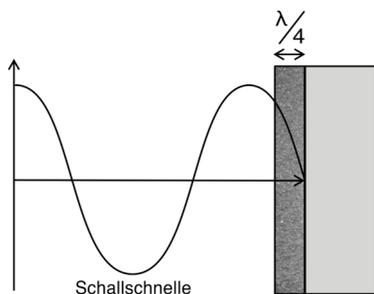


Abb. 3.10: Poröser Absorber an einer Wand

Schnelleabsorber werden meist zu einer breitbandigen Dämpfung hoher Frequenzen verwendet, sind damit also Höhenabsorber.

3.1.7.2. Schalldruckabsorber

Schalldruckabsorber funktionieren nach dem Prinzip des Masse-Feder-Systems: Die Schallenergie wird von einer Platte mit einer bestimmten Masse aufgenommen und in mechanische Energie umgewandelt. Die eingeschlossene Luft hinter der Platte wirkt als Feder und bedämpft die Schwingung der Platte.¹³ Schalldruckabsorber wirken am stärksten bei der eigenen Resonanzfrequenz.¹⁴ Die Anwendung ist daher auf eher schmalbandige Tiefen- und Mittenabsorbern beschränkt.

A: Ausführung als Plattenschwinger

Hier ist eine Deckplatte auf einen Rahmen in einem bestimmten Abstand zur Wand montiert. Die Konstruktion muss luftdicht abgeschlossen sein. Poröses Material im Rahmen erhöht den Absorptionsgrad, solange dieses die Platte nicht berührt und damit am Schwingen hindert.¹⁵

¹³ vgl. Fasold und Veres, 2003, Seite 83

¹⁴ vgl. Goertz, 2001, Seite 46

¹⁵ vgl. Dittmar, 1990, Seite 21

Berechnung der Resonanzfrequenz eines Plattenschwingers:¹⁶

$$f_r = \frac{1}{2\pi} * \sqrt{\frac{s'}{m' * d}} \quad (\text{Formel 3.6})$$

Oder vereinfacht auch:¹⁷

$$f_r = \frac{600}{\sqrt{m' * d}} \quad (\text{Formel 3.7})$$

Einheit [Hz]

s' : Dynamische Steifigkeit der Luft im Rahmen (= 140000 N/m²)

m' : Flächenbezogene Masse der Platte [kg/m²]

d : Tiefe des Rahmens [cm]

B: Ausführung als Helmholtzresonator¹⁸

Im Prinzip ist ein Helmholtzresonator ein geschlossener Kasten, im Studiobau meist aus Holz, mit einem bestimmten Innenvolumen und einer Öffnung mit einer definierten Größe (Abb. 3.11).

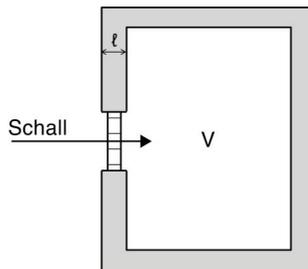


Abb. 3.11: Helmholtzresonator

Berechnung der Resonanzfrequenz f_r für eine runde Öffnung im Resonator:¹⁹

$$f_r = \frac{c}{2\pi} \sqrt{\frac{S}{V * (\ell + \frac{\pi}{2r})}} \quad (\text{Formel 3.8})$$

Einheit [Hz]

¹⁶ Quelle für die Formel:

http://www.uni-essen.de/ibpm/Bauphysik-Interaktiv/nh_sh_plattenschw1.htm

(Seitenaufruf Juli 2008)

¹⁷ Quelle für die Formel: Friesecke, 2006, Seite 149

¹⁸ vgl. von Helmholtz, 1968, Seite 600 bis 603

¹⁹ Quelle für die Formel: Ahnert und Steffen, 1993, Seite 106; s. auch: Veit, 2005, Seite 84

c : Schallgeschwindigkeit [m/s]

S : Öffnungsfläche [m²]

ℓ : Öffnungstiefe [m]

r : Radius der Öffnung [m]

V : Volumen [m³]

3.1.7.3. Der Absorptionsgrad

Die Wirkung eines Absorbers wird mit dem Absorptionsgrad α angegeben.

$\alpha = 0 \rightarrow$ Keine Absorption, d.h. einfallender Schall wird vollständig reflektiert

$\alpha = 1 \rightarrow$ Vollständige Absorption der Schallenergie

Der Absorptionsgrad von Tiefen-, Mitten- und Höhenabsorbern hängt von der Frequenz ab, wie die Abb. 1.12 und Tabelle 3.1 beispielhaft zeigen.

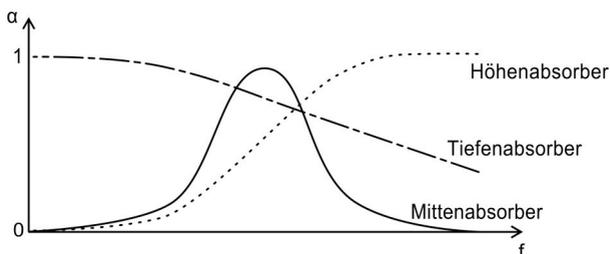


Abb. 3.12: Absorptionsgrade von verschiedenen Absorbern²⁰

Tabelle 3.1: Beispiele für Absorptionsgrade verschiedener Materialien²¹

Material:	125 Hz	250 Hz	500 Hz	1 kHz	2 kHz	4 kHz
Wasseroberfläche	0,008	0,008	0,013	0,03	0,04	0,05
Beton	0,04	0,03	0,03	0,02	0,02	0,03
Gipskartonwand	0,25	0,12	0,10	0,10	1,12	0,15
Schwerer, faltenreicher Vorhang	0,25	0,35	0,50	0,60	0,60	0,70
Schalldämmelemente mit Waffelpprofil	0,27	0,77	0,76	0,88	0,94	0,97
Mineralwolle, 60 cm	0,90	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00
Publikum sitzend in gepolsterten Stühlen	0,12	0,17	0,20	0,28	0,28	0,30
Stehendes Publikum	0,18	0,35	0,47	0,52	0,51	0,45

²⁰ vgl. Friesecke, 2007, Seite 37

²¹ vgl. Wirsum, 1991, Seite 44 und 45

3.2. Nachhall

Allgemein definiert ist der Nachhall die akustische Reaktion der Umgebung auf die von einer Schallquelle abgestrahlten Schallwellen.²²

3.2.1. Raumimpulsantwort

Die Abb. 3.13 zeigt die (am Computer simulierte) Raumimpulsantwort einer Veranstaltungshalle mit einer Nachhallzeit von ca. 3,5 Sekunden. Das Direktschallsignal stammt von einem impulsartigen Schallereignis, in diesem Fall ein Pistolenschuss.

Zuerst ist ein einzelner starker Impuls zu hören, hervorgerufen durch den *Direktschall* des Schallerzeugers. Dann folgen als Raumimpulsantwort die *ersten Reflexionen* der Wände, Decke und des Bodens und anschließend schwächer werdende und immer schneller aufeinander folgende weitere Reflexionen. Wo sich einzelne Reflexionen nicht mehr unterscheiden lassen, spricht man vom *Nachhall*.

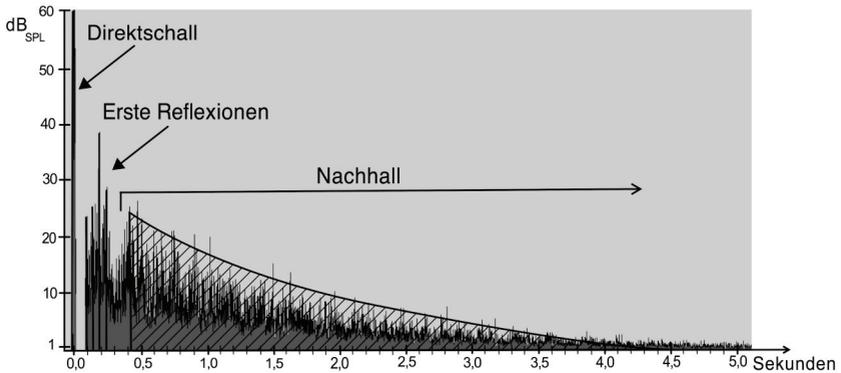


Abb. 3.13: Raumimpulsantwort

3.2.2. Anregung bei Dauerschall

Wird anstatt eines impulshaften Schalls ein Dauerschall wiedergegeben, so ergibt sich ein Pegelverlauf wie in Abb. 3.14. In diesem Fall war das anregende Signal ein rosa Rauschen, das über eine Beschallungsanlage in einen Theatersaal eingespielt wurde.²³

²² vgl. Pieper, 1999, Seite 87

²³ Apollo Theater in Stuttgart

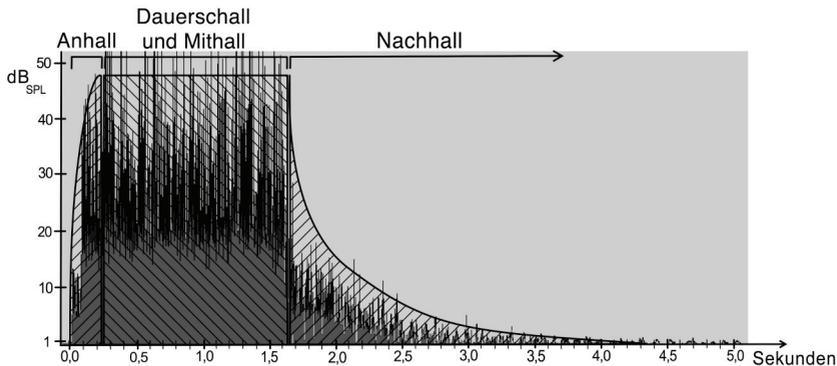


Abb. 3.14: Anregung eines Raumes bei Dauerschall²⁴

Bei einer Anregung mit Dauerschall können drei Phasen unterschieden werden: Der Anhall, Mithall und Nachhall.²⁵

A: Anhall

Wird die Schallquelle eingeschaltet, so baut sich unmittelbar das aus Reflexionen bestehende Diffusfeld auf.

Man spricht von einem harten Anhall, wenn die Verzögerungen bis zum Eintreffen der ersten Reflexionen weniger als 50 ms betragen. Das ist z.B. der Fall in kleinen Räumen mit glatten Wänden. Meist ist die Sprachverständlichkeit bei einem harten Anhall besser.

Beim sog. weichen Anhall treffen dagegen die ersten Reflexionen erst nach 50 ms und mit geringerem Pegel beim Zuhörer ein, wie z.B. in Räumen mit einem großen Raumvolumen.

B: Dauerschall bzw. Mithall

Der Mithall ist die Raumreaktion, die eine andauernde Schallabstrahlung begleitet. Ist der Mithall stark ausgeprägt, leidet die Transparenz des Klangbildes und richtige Lokalisation von einzelnen Schallquellen fällt schwerer.

C: Nachhall

Der Nachhall ist der Abklingvorgang der Reflexionen nach Verstummen der Schallquelle.

²⁴ Anmerkung zur Abbildung: Die Einspieldauer des Testsignals betrug in Wirklichkeit ca. fünf Sekunden. Um den Sachverhalt in der Abbildung besser darstellen zu können, wurde die Mithallphase mit einem Audioschnittprogramm nachträglich verkürzt.

²⁵ vgl. Pieper, 1999, Seite 88

3.2.3. Nachhallzeit RT_{60}

Als Nachhallzeit RT_{60} bezeichnet man den Zeitabschnitt, innerhalb dessen nach Abschalten einer Schallquelle in einem Raum der Schalldruckpegel um 60 dB abfällt. Die Nachhallzeit ist abhängig von...

- ... den Absorptionseigenschaften der Wände, Decke und des Bodens
- ... dem Raumbvolumen
- ... der Frequenz

Näherungsweise Berechnung der Nachhallzeit nach Sabine:²⁶

$$\text{Nachhallzeit } RT_{60} \approx k * \frac{V}{A} \quad (\text{Formel 3.9})$$

Einheit [s]

k : Konstante; Wird berechnet mit:

$$k = \frac{24 * \ln 10}{c} = 0,161 \quad (\text{Formel 3.10})$$

ln : Natürlicher Logarithmus²⁷

V : Raumbvolumen in m^3

A : Äquivalente Schallabsorptionsfläche in m^2 ; Diese setzt sich zusammen aus den Teilflächen S des Raumes mit dem zugehörigen Absorptionsgrad α :

$$A = S_1 * \alpha_1 + S_2 * \alpha_2 + \dots$$

Typische Werte von Nachhallzeiten:

Tonstudio	0,2 bis 0,5 Sekunden
Theatersaal	1,0 bis 2,0 Sekunden
Kirchen	mehr als 2 Sekunden

3.2.4. Frequenzabhängigkeit der Nachhallzeit

Unterschiedliche Oberflächen von Wänden, Decken und Boden absorbieren manche Frequenzen stärker als andere, der Hall bekommt eine Klangfärbung. Dazu tragen auch Frequenzauslöschungen zwischen überlagernden Schallwellen bei. Zu hohen Frequenzen hin macht sich außerdem immer mehr die

²⁶ Wallace Clement Sabine (1868 – 1919). Es gibt außer der Formel von Sabine noch weitere Berechnungsmöglichkeiten z.B. von Eyring, Millington-Sette, Fitzroy u.a.

vgl. Sengpiel, 2008c, PDF-Dokument: Relativer Abstandsfaktor und wirksamer Hallradius

²⁷ s. Kap. 8.1. „Was ist ein Logarithmus?“

Absorptionsfähigkeit der Luft als deutliche Höhendämpfung bemerkbar. Die Nachhallzeit ist daher also für jede Frequenz individuell. Um ein genaues Bild über die akustischen Eigenschaften eines Raumes zu erhalten, müssen deshalb Nachhallberechnungen bzw. -messungen mit mehreren Frequenzen oder in verschiedenen Frequenzbereichen erfolgen.

Beispiel: Für ein Theater wurden in einem akustischen Gutachten die Nachhallzeiten in den Oktavbändern von 125 Hz bis 4 kHz berechnet (Tabelle 3.2 und Abb. 3.15).

Tabelle 3.2: Berechnete Nachhallzeiten für einen Theatersaal²⁸

Mittenfrequenz Oktavband:	125 Hz	250 Hz	500 Hz	1 kHz	2 kHz	4 kHz
Saal ohne Bestuhlung:	3,08 s	2,91 s	3,64 s	3,61 s	3,30 s	2,37 s
Saal mit Bestuhlung:	1,90 s	1,44 s	1,37 s	1,58 s	1,50 s	1,40 s
Saal mit Personen:	1,66 s	1,37 s	1,30 s	1,36 s	1,30 s	1,13 s

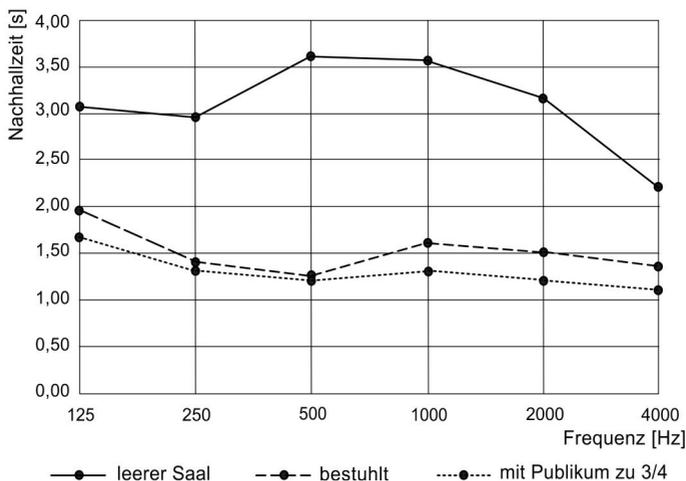


Abb. 3.15: Nachhallzeiten

Was sagen die Kurven der Frequenzabhängigkeit der Nachhallzeit aus?

Bei anerkannt guten Konzertsälen wurde festgestellt, dass der mittlere Frequenzbereich meist eine längere Nachhallzeit hat.²⁹ Die Nachhallzeit ist aber nicht der einzige Parameter, der eine „gute“ Akustik eines Raumes beschreibt. Wichtig sind zum Beispiel auch die subjektiv empfundene Nachhalldauer, die Deutlichkeit bei Sprache und die Klarheit von Musik.

²⁸ Quelle für die Daten:

Brüssau, 1992, Seite 18 (Berechnungen für das Apollo Theater in Stuttgart)

²⁹ vgl. Dickreiter, 1995, Seite 25

Verkürzung der Nachhallzeit durch Publikum im Saal

Mit der folgenden Formel kann die Verkürzung der Nachhallzeit eines Saales mit Publikum ungefähr abgeschätzt werden:³⁰

$$\text{Verkürzte Nachhallzeit } RT_{60}' \approx \frac{RT_{60}}{1 + (5 * n * \frac{RT_{60}}{V})} \quad (\text{Formel 3.11})$$

RT_{60} : Nachhallzeit ohne Publikum [s]

n : Anzahl der Zuschauer

V : Raumvolumen [m³]

3.2.5. Nachhallzeit und Nachhalldauer

Die *Nachhallzeit* ist eine physikalische Messgröße und definiert den Zeitraum, in dem der Schalldruckpegel um 60 dB_{SPL} nach Abschalten der Schallquelle abnimmt.

Die *Nachhalldauer* ist eine subjektive Empfindung. Für diese Empfindung ist der Pegel der Schallquelle maßgeblich ausschlaggebend. Je lauter ein Schallereignis, desto mehr Energie besitzen die Schallwellen, die dann ein länger andauerndes Diffusschallfeld erzeugen. Zusätzlich treten aber auch Störgeräusche im Raum in Erscheinung. Beispiel Konzert-Beschallung: Ist die Halle beim Soundcheck leer und gibt es nur einen geringen Störpegel, so erscheint der Nachhall laut und voluminös. Später bei der Vorstellung übertönt das Publikum durch laute Gespräche und Geräusche die leisen Nachhallphasen, die Nachhalldauer erscheint jetzt deutlich kürzer.³¹ Daneben haben sich durch die Zuschauer aber auch Absorptions- und Reflexionsparameter geändert.

³⁰ Quelle für die Formel: Görne, 2007, Seite 228

³¹ vgl. Pieper, 1999, Seite 90 und Fasold und Veres, 2003, Seite 141

3.2.6. Deutlichkeitsmaß C_{50}

Das Deutlichkeitsmaß ist ein Kriterium für gute Deutlichkeit und Sprachverständlichkeit am Hörerplatz.

Zur Gewährleistung einer ausreichenden Sprachverständlichkeit ist die bis 50 ms nach dem Direktschall am Ort des Zuhörers eintreffende Schallenergie gegenüber der Restschallenergie nach 50 ms maßgebend.³² Berechnet wird dies über ein sog. Integral. In diesem Fall wird der Schalldruck über die Zeit integriert (Abb. 3.16).

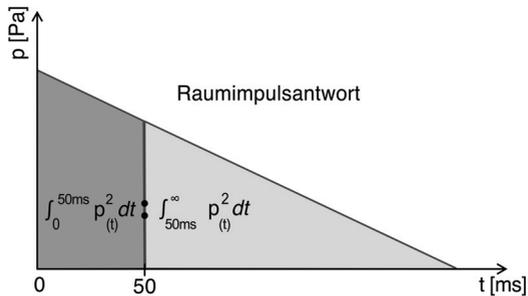


Abb. 3.16: Deutlichkeitsmaß

$$C_{50} = 10 \lg \frac{\int_0^{50\text{ms}} p^2(t) dt}{\int_{50\text{ms}}^{\infty} p^2(t) dt} \quad (\text{Formel 3.12})$$

Einheit [dB]

p : Schalldruck [Pa]

t : Zeit [ms]

Für Werte von $C_{50} > 0$ dB gilt eine gute Sprachverständlichkeit.³³

³² vgl. Ahnert und Steffen, 1993, Seite 329 und Ahnert und Reichardt, 1981, Seite 62

³³ vgl. ZVEI, 1999, Seite 35

3.2.7. Klarheitsmaß C_{80}

Das Klarheitsmaß ist ein Kriterium für die Zeit- und Registerdurchsichtigkeit von Musikdarbietungen.

Wichtig sind die Erkennbarkeit zeitlich aufeinander folgender Töne und die Unterscheidbarkeit gleichzeitig erzeugter Klänge von verschiedenen Instrumenten. Das Klarheitsmaß ist das Verhältnis der bis 80 ms nach dem Direktschall eintreffenden Energie zur nachfolgenden Schallenergie (Abb. 3.17).³⁴

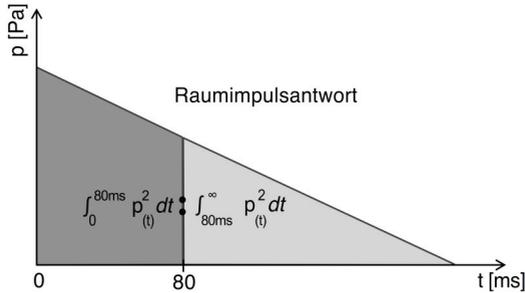


Abb. 3.17: Klarheitsmaß

$$C_{80} = 10 \lg \frac{\int_0^{80ms} p^2(t) dt}{\int_{80ms}^{\infty} p^2(t) dt} \quad (\text{Formel 3.13})$$

Einheit [dB]

p : Schalldruck [Pa]

t : Zeit [ms]

In Bühnennähe sollte der C_{80} -Wert zwischen -2 und +12 dB betragen, auf bühnenfernen Plätzen zwischen -5 und +9 dB.³⁵

³⁴ vgl. Ahnert und Reichardt, 1981, Seite 64

³⁵ vgl. ZVEI, 1999, Seite 35

3.3. Direktschall und Reflexionen

Eine Schallquelle strahlt Direktschall ab, der mit zunehmender Entfernung im Pegel rasch abnimmt. Außerdem entstehen in einem geschlossenen Raum Reflexionen, die nach einer gewissen Zeit überall im Raum den gleichen Pegel haben (Abb. 3.18).³⁶

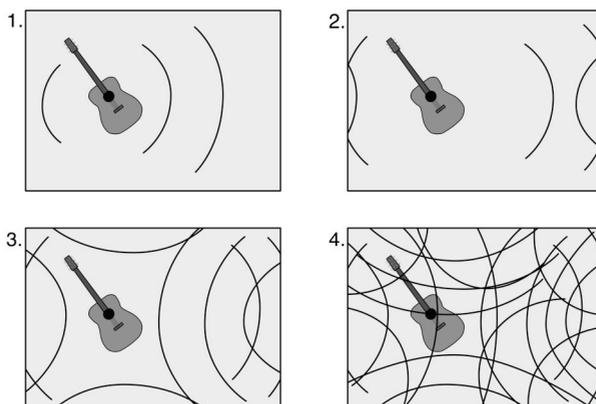


Abb. 3.18: Schallausbreitung in einem geschlossenen Raum

3.3.1. Freifeld

Mit Freifeld ist die Schallausbreitung im idealisierten freien Raum gemeint, wo keine Schallwellen reflektiert werden. In einem schalltoten Raum gibt es solche Bedingungen und auch im Freien, allerdings reflektiert dort u.U. der Boden. Der Direktschall einer Schallquelle kann als Freifeld betrachtet werden, solange es zu keiner Überlagerung von Reflexionen kommt. Daher wird das Freifeld oft auch als *Direktschallfeld* bezeichnet.

Im Freifeld nimmt der Schalldruckpegel gemäß dem $1/r$ -Gesetz proportional zur Entfernung ab:³⁷

$$p \sim \frac{1}{r} \quad (\text{Formel 3.14})$$

p : Schalldruckpegel [dB_{SPL}]

r : Radius um eine Schallquelle

³⁶ Aber nicht das gleiche Klangbild!

³⁷ Nicht zu verwechseln mit dem $1/r^2$ -Gesetz, welches die Abnahme des *Schallintensitätspegels* um -6 dB pro Entfernungsverdoppelung beschreibt.

Berechnung der Abnahme des Schalldruckpegels mit der Entfernung:

$$\Delta L = 20 \lg \frac{r_2}{r_1} \quad (\text{Formel 3.15})$$

Je Entfernungsverdoppelung nimmt der Schalldruckpegel um -6 dB ab.
Beispiel: Der Schalldruck in 1 m Entfernung vor einem Lautsprecher beträgt 96 dB_{SPL}, bei der doppelten Entfernung von 2 m sind es 90 dB_{SPL}, bei 4 m noch 84 dB_{SPL} usw.

3.3.2. Diffusfeld

Wird Schall in einem Raum so oft reflektiert, dass der Schalldruckpegel an jeder Stelle des Raums annähernd gleich ist, dann spricht man von einem Diffusfeld.

Im Diffusfeld gilt das 1/r-Gesetz nur eingeschränkt, da reflektierter Schall dem direkten Schall hinzugefügt wird.

3.3.3. Hallradius

Der Schalldruck von Direkt- und Diffusschall ist identisch bei einem Abstand zur Schallquelle, der als Hallradius r_H definiert wird.

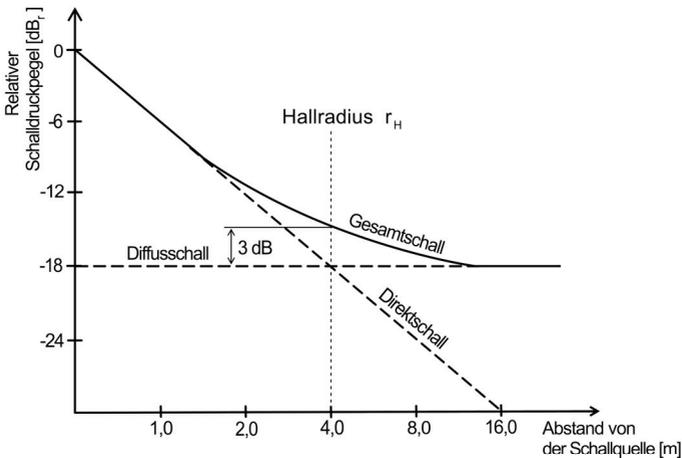


Abb. 3.19: Beispiel für den Hallradius³⁸

In Abb. 3.19 ergibt sich der Kurvenverlauf des Gesamtschalls durch eine inkohärente Addition mit +3 dB im Punkt der Gleichheit des Schalldrucks von Direkt- und Diffusschall.³⁹

³⁸ vgl. Ahnert und Steffen, 1993, Seite 34

³⁹ Addition kohärenter und nicht kohärenter Signale: s. Kap. 8. „Der Pegel“

Berechnung des Hallradius r_H

Der Hallradius kann bei bekannten Raumvolumen und Nachhallzeit näherungsweise mit der folgenden Formel errechnet werden:⁴⁰

$$r_H \approx 0,057 * \sqrt{\frac{V}{RT_{60}}} \quad (\text{Formel 3.16})$$

Einheit [m]

V : Raumvolumen [m³]

RT₆₀ : Nachhallzeit nach Sabine [s]

Die genaue mathematische Ableitung von r_H findet sich im Anhang.

Der Hallradius ist außerdem abhängig von der Richtwirkung einer Schallquelle und der des aufnehmenden Mikrofons. Eine genauere Berechnungsformel für den Hallradius lautet daher unter Einbeziehung der Bündelungsgrade:⁴¹

$$r_H \approx 0,057 * \sqrt{\gamma_M * \gamma_Q * \frac{V}{RT_{60}}} \quad (\text{Formel 3.17})$$

Einheit [m]

γ_M : Bündelungsgrad des Mikrofons; Faktor (1 = keine Bündelung)

γ_Q : Bündelungsgrad der Schallquelle; Faktor (1 = keine Bündelung)

In Tabelle 3.3 sind als Beispiel einige Bündelungsgrade für Mikrofone mit verschiedenen Richtcharakteristiken aufgeführt.⁴² In Kapitel 17 „Lautsprecher“ findet sich eine entsprechende Tabelle mit Bündelungsgraden verschiedener Lautsprecher.

Tabelle 3.3: Mikrofon-Bündelungsgrade γ_M

Mikrofonrichtcharakteristik	γ_M
Kugel	1
Breite Niere	2
Niere und Acht	3
Hyperniere	4
Richtrohrmikrofone	> 4

⁴⁰ vgl. Ahnert und Steffen, 1993, Seite 33

⁴¹ Quelle für die Formel:

Sengpiel, 2008c, PDF-Dokument: Relativer Abstandsfaktor und wirksamer Hallradius

⁴² vgl. Sengpiel, 2008a, PDF-Dokument: Bündelungsgrad und Bündelungsmaß der Mikrofone und weiterhin Ahnert und Reichardt, 1981, Seite 118;

Mehr über die Richtcharakteristik von Mikrofonen in Kap. 9. „Mikrofone“

Es ist zu beachten, dass die Richtcharakteristik immer frequenzabhängig ist und zu hohen Frequenzen eine Fokussierung der Richtwirkung eintritt. Das gilt für Mikrofone genauso wie für natürliche Schallquellen und Lautsprecher.

Außerhalb des Hallradius spielt die Richtwirkung eines Mikrofons keine Rolle mehr, da der Schall von allen Seiten mit gleichem Pegel auf das Mikrofon trifft. Daher sollten Hauptmikrofone innerhalb des Hallradius aufgestellt werden.⁴³ Bei Surround-Aufnahmen macht es dagegen Sinn, die Mikrofone für die hinteren Kanäle außerhalb des Hallradius aufzustellen.⁴⁴

⁴³ vgl. Sengpiel, 2008b, PDF-Dokument:
Relativer Abstandsfaktor und wirksamer Hallradius

⁴⁴ s. Kap. 10. „Verfahren zur Mikrofonierung“

3.4. Übungsaufgaben

Aufgabe 1: (Frage bei der Abschlussprüfung Sommer 2001 der IHK Erfurt)

Was versteht man unter dem Hallradius?

Aufgabe 2:

Stelle den frequenzabhängigen Absorptionsgrad eines schweren, faltenreichen Vorhangs zeichnerisch in einem Diagramm dar.

Aufgabe 3:

Berechne die Dopplerfrequenzen für ein bewegtes Lautsprechersystem - ein Leslie für eine Hammondorgel - welches sich mit 400 Umdrehungen pro Minute dreht. Der Durchmesser des rotierenden Systems beträgt 40 cm. Auf der Orgel wird die Note a'' mit 880 Hz gespielt.

Aufgabe 4:

In einem Tonstudio ist zwischen Aufnahmerraum und Regie eine Kabeldurchführung nicht verschlossen worden. Wie wirkt sich diese „Schallbrücke“ aus?⁴⁵

Aufgabe 5:

Wie groß muss die wirksame Dicke eines porösen Absorbers sein, der bei einer Frequenz von 200 Hz wirkungsvoll absorbiert?⁴⁶

Aufgabe 6:

Berechne den Hallradius für eine punktförmige Schallquelle (Bündelungsgrad=1) für drei verschiedene Räume:

- a) Saal mit 1250 m^3 Raumvolumen und einer Nachhallzeit von 1,3 Sekunden.
- b) Theater mit 15000 m^3 , Nachhallzeit 1,3 Sekunden.
- b) Kirche mit 15000 m^3 , Nachhallzeit 3,5 Sekunden.

Welche Schlussfolgerungen lassen sich aus den Ergebnissen ziehen?



Literaturtipp:

Meyer, Jürgen: Akustik und musikalische Aufführungspraxis.
Frankfurt am Main: Bochinsky Verlag.

⁴⁵ vgl. Dittmar, 1990, Seite 13

⁴⁶ vgl. Dittmar, 1990, Seite 22

4. Das menschliche Gehör



Das Wissen über die Funktion des Gehörs gehört zu den Grundlagen bei der Ausbildung und findet sich daher im Rahmenlehrplan im ersten Lehrjahr unter dem Themenbereich „physiologische Grundlagen“.

4.1. Anatomie des Gehörs

Abb. 4.1 zeigt als Schnittzeichnung die Anatomie des Gehörs. Das Gehör kann in Außenohr, Mittelohr und Innenohr unterteilt werden.

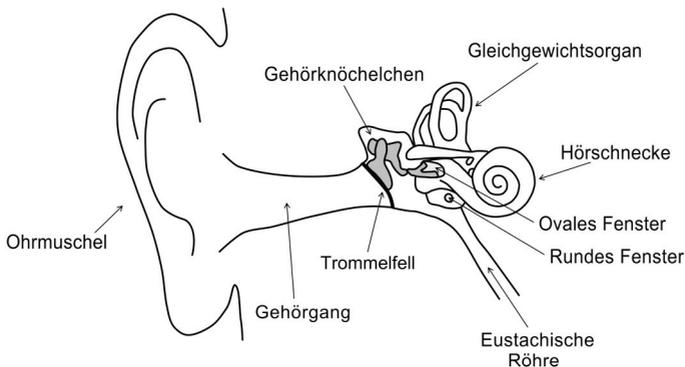


Abb. 4.1: Anatomie des Gehörs

4.1.1. Außenohr

Das äußere Ohr besteht aus der Ohrmuschel, dem Gehörgang und dem Trommelfell.

Die Ohrmuschel sammelt und leitet den Schall in den Gehörgang und erfüllt die Funktion eines Beugungsfilters, d.h. Schall aus verschiedenen Richtungen erhält eine differenzierte Klangfarbe. Die Ohrmuschel hat damit eine wichtige Aufgabe beim Richtungshören.

Auch durch Resonanzen im Gehörgang erfährt der Schall Veränderungen in seiner Klangfarbe. Die Resonanzfrequenz liegt zwischen 2,5 und 3 kHz. Schall mit diesen Frequenzen wird bis zu einem Dreißigfachen verstärkt.¹

Das Trommelfell ist eine ca. 0,5 cm² große trichterförmige Membran. Diese wird durch die Schallwellen zum Mitschwingen angeregt und überträgt so die Schwingungen des Luftschalls zum Mittelohr.

¹ vgl. Eska, 1997, Seite 103

4.1.2. Mittelohr

Das Mittelohr stellt die Verbindung zwischen Trommelfell und dem Innenohr her. Die drei Gehörknöchelchen Hammer, Amboss und Steigbügel (Abb. 4.2) wirken als Hebelsystem, welches die mit max. 0,1 mm sehr geringen Auslenkungen des Trommelfells an das ovale Fenster weiterleitet. Die Fläche des Trommelfells ist ca. 20- bis 30-mal größer als die Auflagefläche des Steigbügels am ovalen Fenster, somit findet eine Verstärkung der Kraft statt.² Das Innenohr ist demnach als Impedanzwandler zwischen dem Außenohr (Luft) und dem Innenohr (Gewebsflüssigkeit).³

Andererseits können die Gehörknöchelchen aber auch durch die Muskelvorspannung eine dämpfende Wirkung und dadurch eine Schutzfunktion haben. Diese Muskeln können aber nicht willentlich gesteuert werden, sondern werden erst bei sehr großen Schalldruckpegeln durch den sog. Stapediusreflex angespannt.

Das Mittelohr ist mit Luft gefüllt und besitzt über die Eustachische Röhre eine Verbindung zum Rachenraum. Durch Schlucken kann so ein Druckausgleich zwischen Außen- und Mittelohr erfolgen.

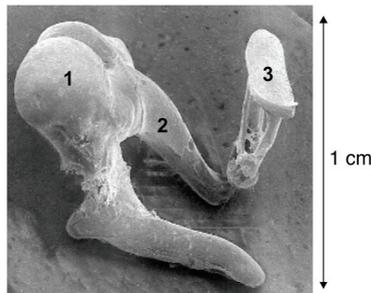


Abb. 4.2: Elektronenmikroskopaufnahme der Gehörknöchelchen
1 = Hammer, 2 = Amboss, 3 = Steigbügel

Bildquelle: William. A. Yost (2007): Fundamentals of Hearing.
Bingley, UK: Emerald Group Publishing.

4.1.3. Innenohr

Das Innenohr wird aufgrund seiner Form auch Schnecke genannt. Es wandelt die empfangenen Schwingungen in Nervenströme um. Die Hörschnecke ist mit Gewebsflüssigkeit gefüllt, der sog. Perilymphe. Der Steigbügel überträgt seine Schwingungen auf das ovale Fenster und dadurch auf die Perilymphe im Innenohr. Das runde Fenster dient zum Ausgleich der entstehenden

² vgl. Stickel, 2003, Seite 54

³ s. Kap. 2.3. „Schallimpedanz Z“

Druckunterschiede. Die Schwingungen breiten sich in der Schnecke als Wanderwelle aus und regen je nach Frequenz unterschiedliche Bereiche auf der Basilarmembran an. Durch die Bewegungen der Basilarmembran wird in den darauf befindlichen Haarzellen eine elektrische Potentialänderung verursacht. Diese elektrischen Ströme werden vom Hörnerv an das Gehirn weitergeleitet, und erst dort wird eine Schallempfindung ausgelöst (Abb. 4.3). Abb. 4.4 zeigt im Detail den inneren Aufbau der Hörschnecke, insbesondere die Haarzellen auf der Basilarmembran unterhalb der Deckmembran und den Hörnerv.

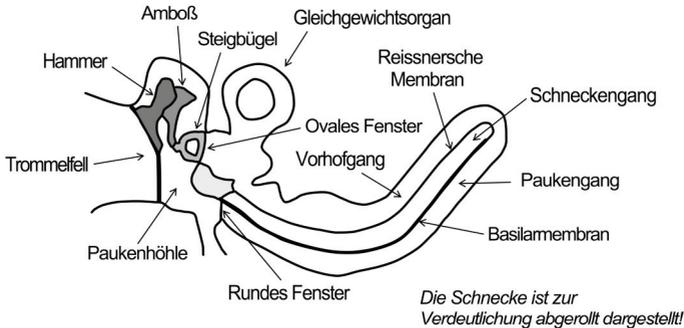


Abb. 4.3: Mittel- und Innenohr⁴

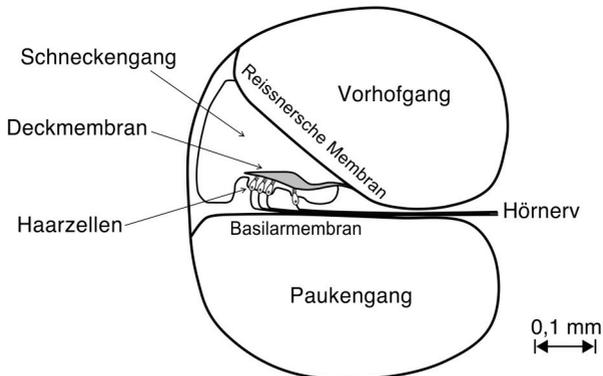


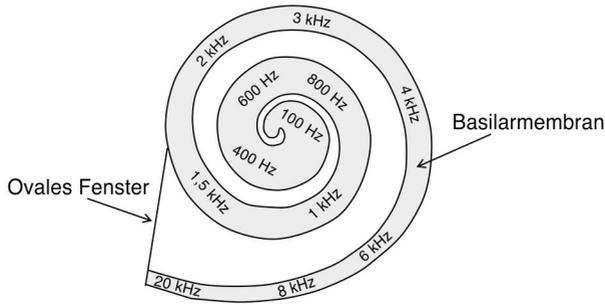
Abb. 4.4: Schnitt durch den Schneckengang⁵

Frequenzkodierung auf der Basilarmembran

In der Hörschnecke kann einer bestimmten Tonhöhe ein ganz bestimmter Bereich zugeordnet werden. Direkt am Anfang der Schnecke werden die hohen Töne wahrgenommen, am Ende die tiefen (Abb. 4.5).

⁴ vgl. Eska, 1997, Seite 94

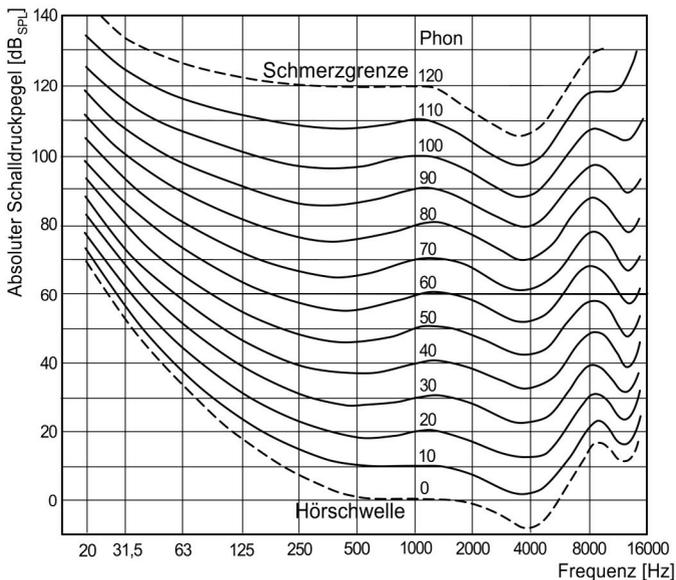
⁵ vgl. Eska, 1997, Seite 113

Abb. 4.5: Frequenzkodierung auf der Basilarmembran⁶

4.2. Wahrnehmung durch das Gehör

4.2.1. Lautstärkewahrnehmung

Die Lautstärke ist die wohl wichtigste Empfindung bei der Wahrnehmung von Schall. Diese Empfindung ist einerseits abhängig vom Schalldruckpegel, andererseits aber auch von der Frequenz. Ersichtlich wird dieser Zusammenhang aus den Kurven gleicher Lautstärkepegel, den sog. Isophonen (Abb. 4.6).

Abb. 4.6: Isophone⁷

⁶ vgl. Eska, 1997, Seite 123

⁷ vgl. DIN 45630

Lautstärkepegel L_N [Phon]: Jedem Isophon entspricht ein bestimmter absoluter Schalldruckpegel. Bei 1 kHz stimmen Schalldruckpegel und Lautstärkepegel zahlenmäßig überein.

Unterscheidung von Dezibel und Phon:

- *Ein Schallereignis* = Objektiv messbare Reizgröße. Einheit [dB]
- *Ein Hörereignis* = Subjektiv feststellbare Empfindungsgröße. Einheit [Phon]⁸

Was sagen die Isophone aus?

Die unterste Kurve repräsentiert die Hörschwelle, die oberste die Schmerzgrenze, der Bereich dazwischen wird als Hörfläche bezeichnet. Das Lautstärkeempfinden ist frequenzabhängig und diese Frequenzabhängigkeit ändert sich wiederum mit dem Schalldruck. Am empfindlichsten ist das Gehör in einem Frequenzbereich von ca. 2 bis 5 kHz, bei tiefen und hohen Frequenzen ist es wesentlich unempfindlicher.

Was bringt die Kenntnis über die Isophone in der Praxis?

Bei der Wiedergabe über eine Beschallungsanlage sind die Bässe und Höhen bei niedrigem Lautstärkepegel (z.B. 50 bis 60 Phon) weniger laut wahrzunehmen. Das Klangbild muss in diesen Fall durch Anhebung der tiefen und hohen Frequenzanteile gehörriktig korrigiert werden. Laute Darbietungen (z.B. 85 bis 100 Phon) nimmt das Gehör dagegen ausgeglichen wahr, so dass eine zusätzliche Tiefen- und Höhenanhebung nicht mehr erforderlich ist, bzw. sogar störend wirkt.

Aus den Isophonen wurden die Filterkurven für den bewerteten Schalldruckpegel abgeleitet.⁹

4.2.2. Räumliches Hören

4.2.2.1. Entfernungshören

Das Entfernungshören ist abhängig vom Schalldruckpegel und daneben wird auch die Dämpfung hoher Frequenzen durch die Luft berücksichtigt; z.B. klingt naher Donner grell, ferner dumpf. Das Entfernungshören ist relativ schlecht ausgeprägt, wir irren uns oft beim Abschätzen von Entfernungen nur durch akustische Reize.¹⁰ Vor allem im Freien ist das Entfernungshören schwierig, da hier keine zusätzlichen Reflexionen mit ausgewertet werden können, wie das in Räumen möglich ist.¹¹

⁸ vgl. Blauert, 1974, Seite 2

⁹ s. Kap. 2.1.2. „Der bewertete Schalldruckpegel“

¹⁰ vgl. Blauert, 1974, Seite 97 und Dickreiter, 1987, Seite 122

¹¹ vgl. Görne, 2007, Seite 29

4.2.2.2. Seitenlokalisation

In Blickrichtung ist die Seitenlokalisation mit einer Lokalisationsschärfe von ca. 3° bis 5° links/rechts sehr gut ausgeprägt. Schall, der seitlich auf unsere Ohren trifft, d.h. 90° zur Blickrichtung, wird dagegen mit ca. ±10° eher schlecht lokalisiert. Bei Schall von Hinten, also 180° zur Blickrichtung, sind es ca. ±5,5°. drei Faktoren sind werden zur Seitenlokalisation vom Gehirn ausgewertet:¹²

- Pegeldifferenzen zwischen den beiden Ohren
- Laufzeitdifferenzen zwischen beiden Ohren
- Unterschiedliche Klangfarben an beiden Ohren

Frequenzabhängigkeit:

Sehr tiefe Frequenzen unterhalb ca. 500 Hz werden nur durch Laufzeitdifferenzen und daher eher schwer lokalisiert.¹³ Zwischen ca. 500 Hz bis 2 kHz erfolgt die räumliche Wahrnehmung durch Pegel- und Laufzeitunterschiede. Oberhalb von ca. 2 kHz werden hauptsächlich Pegel- und Klangfarbenunterschiede registriert. Klangfarbenänderungen kommen dadurch zustande, dass seitlich eintreffender Schall mit hoher Frequenz am zugewandten Ohr einen Druckstau hervorruft, während das abgewandte Ohr sich im Schallschatten befindet.¹⁴

4.2.2.3. Höhenlokalisation

Die Höhenlokalisation beruht hauptsächlich auf Klangfarbenveränderungen und ist abhängig von der Hörerfahrung. Mit einer Lokalisationsschärfe von nur ca. 17° oben/unten ist sie relativ schlecht ausgeprägt.¹⁵ Durch spontanes Hinwenden des Kopfes in Richtung eines Hörereignisses wird die Lokalisation intuitiv verbessert.¹⁶

4.2.3. Verdeckungseffekte

4.2.3.1. Zeitliche Verdeckung

Ein leiser Ton kann durch einen vorher, nachher oder gleichzeitig auftretenden lauten Ton verdeckt werden. Man spricht hier von einer Vor-, Nach- und Simultanverdeckung (Abb. 4.7).

¹² vgl. Blauert, 1974, Seite 33, Dickreiter, 1987, Seite und. Nusser, 1990, Seite 7

¹³ vgl. Görne, 2007, Seite 125

¹⁴ vgl. Görne, 2007, Seite 28

¹⁵ vgl. Dickreiter, 1987, Seite 121

¹⁶ vgl. Blauert, 1974, Seite 143

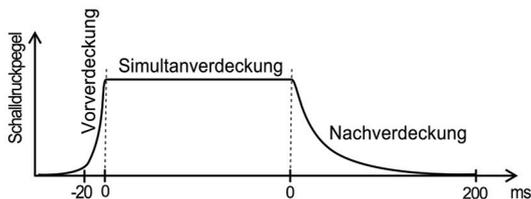


Abb. 4.7: Zeitliche Verdeckung
Bildquelle: Fastl und Zwicker, 2007, Seite 78

Die *Vorverdeckung* kann mit der verzögerten Wahrnehmung und Informationsverarbeitung durch das Gehirn erklärt werden und liegt unter 20 ms. Die *Simultanverdeckung* resultiert aus der Addition von inkohärenten Signalen; Ab einem gewissen Pegelunterschied bestimmt das lauteste Signal den gesamten Lautstärkeindruck. Die *Nachverdeckung* kommt zustande, wenn das Gehör noch auf eine große Lautstärke adaptiert und daher für eine gewisse Zeit unempfindlich für leise Töne ist (ca. 200 ms).

4.2.3.2. Spektrale Verdeckung

Ein Schallereignis mit einer bestimmten Frequenz oder Frequenzbandbreite kann ein anderes verdecken, wenn beide im Spektrum dicht zusammen liegen (Abb. 4.8). Grund: Töne mit leicht unterschiedlicher Frequenz können dieselben Hörzellen innerhalb der sog. kritischen Bandbreite anregen.¹⁷ Die kritische Bandbreite beträgt für Frequenzen unter 1 kHz etwa 1 Hz und für höhere Frequenzen ca. 0,1 bis 0,2%.¹⁸

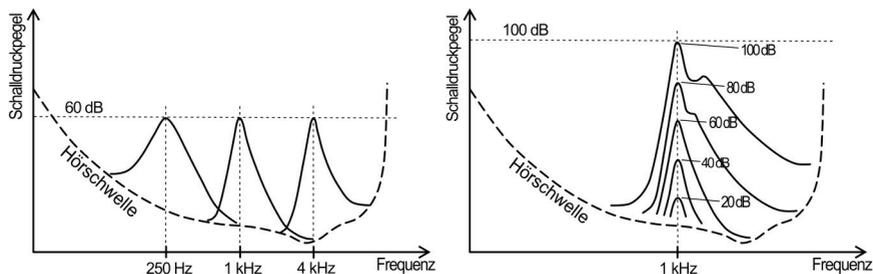


Abb. 4.8: Spektrale Verdeckung

Links: Schmalbandiges Rauschen mit gleichem Pegel (250 Hz, 1 kHz und 4 kHz)
Rechts: Schmalbandiges Rauschen (1 kHz) mit unterschiedlichen Pegeln

Bildquelle: Fastl und Zwicker, 2007, Seite 64 und 65

¹⁷ vgl. Stickel, 2003, Seite 40; Die kritische Bandbreite wird hier auch als Zwicker-Effekt bezeichnet, nach Eberhard Zwicker (1924 – 1990).

¹⁸ vgl. Institut für Phonetik und digitale Sprachverarbeitung, 2005, Online-Dokument : http://www.ipds.uni-kiel.de/Dokumente/ModulC/akustik_11.asc (Oktober 2008)

4.2.4. Schallwahrnehmung bei elektroakustischer Wiedergabe

4.2.4.1. Gesetz der ersten Welle

Kernaussage des Gesetzes der ersten Welle: Die zuerst eintreffende Schallwelle bestimmt den Richtungseindruck. Dieser Zusammenhang wird oft auch Haas-Effekt genannt, nach der Dissertation von Helmut Haas (1951).

Praktisches Beispiel: Stützlautsprecher (engl.: Delay Line) bei einer Beschallungsanlage. Wird über die Delay Line das gleiche Signal wiedergeben wie auf den Lautsprechern an der Bühnecante, so verschiebt sich für die Zuhörer im hinteren Bereich der Höreindruck in Richtung der Delay Line. Das Schallereignis wird also räumlich nicht richtig lokalisiert. Zudem ist der Direktschall von der Bühne mit einer kurzen Zeitverzögerung als störendes Echo wahrnehmbar (Abb. 4.9).

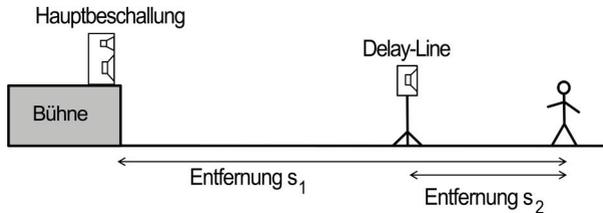


Abb. 4.9: Delay-Line

Durch eine elektronische Verzögerung wird das Audiosignal der Delay Line entsprechend später wiedergegeben. Um allerdings den räumlichen Höreindruck von der Delay Line zu lösen und um eine richtige Lokalisation der Schallquelle auf der Bühne zu ermöglichen, muss das Signal zusätzlich um ca. 1 bis 30 ms verzögert werden. Bei einer richtig eingestellten Verzögerungszeit kann der Schalldruckpegel für die Delay-Lautsprecher sogar zwischen 5 bis 10 dB_{SPL} größer sein als bei der Hauptbeschallung, ohne dass sich der Höreindruck in Richtung Delay Line verschiebt:¹⁹

$$\Delta t = \frac{s_1 - s_2}{c} + 1 \text{ bis } 30 \text{ ms} \quad (\text{Formel 4.1})$$

4.2.4.2. Phantomschallquellen bei stereofoner Wiedergabe

Beim natürlichen Hören gibt es für *eine* Schallquelle *eine* Wahrnehmung. Bei der elektroakustischen stereofonen Wiedergabe gibt es *zwei* Schallquellen (die Lautsprecher) aber bei kohärenten Signalen ebenfalls nur *eine* Wahrnehmung.²⁰

¹⁹ vgl. Blauert, 1974, Seite 180

²⁰ vgl. Blauert, 1974, Seite 163

Kommt also aus beiden Lautsprechern ein identisches Signal mit gleichem Pegel, so entsteht der Höreindruck einer Phantomschallquelle in der Mitte der Stereo-Basisbreite. Dies gilt nur für die optimale Abhörposition, d.h. der Zuhörer und beide Lautsprecher bilden ein gleichseitiges Dreieck (Abb. 4.10).

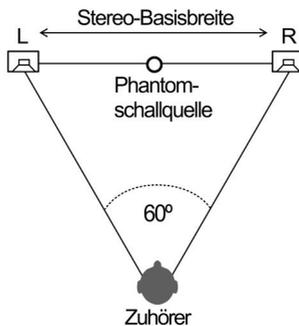


Abb. 4.10: Stereowiedergabe mit Phantomschallquelle

Eine Phantomschallquelle kann zur Seite verschoben werden, indem auf den beiden Lautsprechern unterschiedliche Pegel wiedergegeben werden = *Intensitätsstereofonie* (ΔL) mit dem Panorama-Regler am Mischpult.

Auch eine verzögerte Wiedergabe auf nur einem Lautsprecher ändert die Lokalisation der Phantomschallquelle = *Laufzeitstereofonie* (Δt) mit Delay-Schaltungen.

Tabelle 4.1: Vergleich von Intensitäts- und Laufzeitstereofonie²¹

Lokalisation	Intensitätsstereofonie ΔL		Laufzeitstereofonie Δt	
	Linker Kanal	Rechter Kanal	Linker Kanal	Rechter Kanal
Links	0 dB	-16 bis -20 dB	0 ms	1,5 ms
Halblinks	0 dB	-6 dB	0 ms	0,5 ms
Mitte	0 dB	0 dB	0 ms	0 ms
Halbrechts	-6 dB	0 dB	0,5 ms	0 ms
Rechts	-16 bis -20 dB	0 dB	1,5 ms	0 ms

Die Werte in Tabelle 4.1 sind nur als theoretische Anhaltspunkte zu sehen. Die Art des Schallsignals und die Hörsituation, d.h. zum Beispiel die Raumakustik, bestimmen in der Praxis die tatsächlich notwendigen Pegel- und Laufzeitdifferenzen. Als minimale Werte für eine gerade noch wahrnehmbare Verschiebung einer Phantomschallquelle können $\Delta t = 0,01$ ms und $\Delta L = 0,5$ dB angenommen werden.²²

²¹ vgl. Nusser, 1990, Seite 9 bis 14

²² vgl. Görne, 2007, Seite 30

4.3. Hörschaden

Nachlassendes Hörvermögen im Alter

Mit zunehmendem Alter verengt sich der hörbare Frequenzbereich. Ein Erwachsener mit 35 Jahren hört vielleicht nur noch Töne zwischen 30 Hz und 16 kHz, während Kinder noch den vollen Frequenzbereich von 20 Hz bis 20 kHz wahrnehmen.

Hörermüdung durch Lärmeinwirkung

Ist das Gehör mehreren Stunden Lärm mit mehr als 85 dB_A ausgesetzt, so führt das zu einer vorübergehenden Verschiebung der Hörschwelle, die aber noch reversibel sein kann. Innerhalb von Stunden oder Tagen kommt es wieder zu einer Normalisierung des Hörvermögens. Daher wird diese Hörstörung auch vorübergehende Hörschwellenverschiebung genannt, (engl.:) Temporary Threshold Shift = TTS.²³

Irreversibler Gehörschaden durch Lärmeinwirkung

Bei einer dauerhaften Überbelastung des Gehörs, d.h. über Tage, Wochen oder Jahre, können auch ganze Frequenzbereiche für immer ausfallen. Die Sinneszellen in der Gehörschnecke verkleben sich dabei oder knicken regelrecht ab, und haben damit keine Funktion mehr (Vergleiche die Abb. 4.11 und 4.12). Haarzellen erholen sich von diesem Schaden nicht mehr, der Gehörschaden ist also irreversibel. Die lärminduzierte Schwerhörigkeit wird daher auch (engl.:) Permanent Threshold Shift = PTS genannt.²⁴

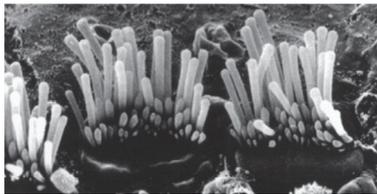


Abb. 4.11: Elektronenmikroskopaufnahme von gesunden Haarzellen

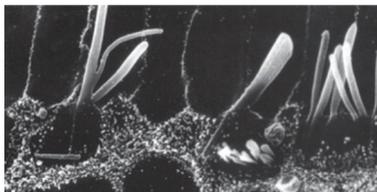


Abb. 4.12: Irreversibler Gehörschaden (abgeknickte Haarzellen)

²³ vgl. Stickel, 2003, Seite 62 und 66

²⁴ vgl. Stickel, 2003, Seite 71

Bildquellen Abb. 4.11 und 4.12: Aearo GmbH, <http://www.peltor.se>

Wie äußert sich ein dauerhafter Hörschaden?

Leise Töne können nicht mehr wahrgenommen werden und der dynamische Bereich des Hörsystems reduziert sich. Daneben wird die Frequenzselektivität beeinträchtigt: Der Gehörverlust im hohen Frequenzbereich überwiegt, da zuerst Haarzellen am Anfang der Schnecke absterben. Insgesamt wird die sprachliche Verständigung immer schwieriger, da zum einen die Verständlichkeit sinkt und zum anderen Sprache bei verdeckenden Hintergrundgeräuschen schlechter wahrgenommen wird. Sehr oft treten auch die Symptome eines Tinnitus auf, d.h. es werden Störgeräusche wie z.B. Pfeifen oder Rauschen wahrgenommen.

In Abb. 4.13 ist das Audiogramm eines gesunden Gehörs und das bei einer lärmverursachten Schwerhörigkeit zu sehen. Deutlich ist hier die sog. c⁵-Senke bei ca. 4 kHz zu erkennen. Ein Schwerhöriger nimmt dadurch vor allem die für die Sprachverständlichkeit wichtigen Konsonanten nicht mehr ausreichend wahr.²⁵

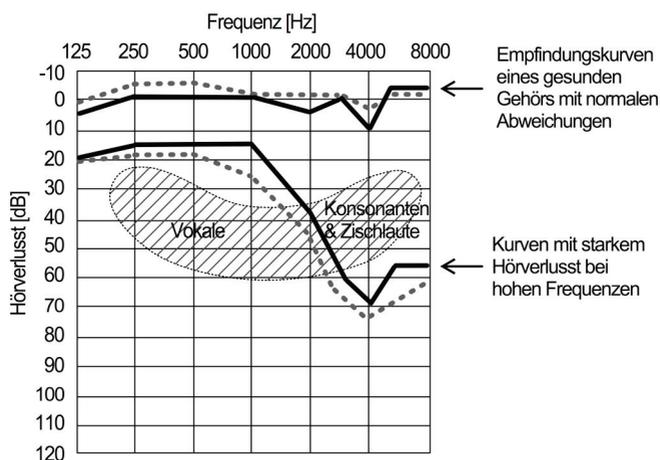


Abb. 4.13: Lärminduzierte Schwerhörigkeit²⁶

Doch nicht nur aufgrund des Risikos einer Lärmschwerhörigkeit sollten hohe Schalldruckpegel über längere Zeit vermieden werden. Generell hat eine Lärmeinwirkung negative psychische und physische Auswirkungen wie zum Beispiel:²⁷

²⁵ vgl. Veit, 2005, Seite 146

²⁶ vgl. AES Tutorial No. 69, 2006

²⁷ vgl. Veit, 2005, Seite 146

- Allgemeine Störung des Wohlbefindens und Nervosität
- Abnahme des Konzentrationsvermögens und der Lernfähigkeit
- Ermüdung als Folge von Schlafstörungen
- Kopfschmerzen und Überreizung
- Erhöhtes Risiko für Herz-Kreislauf-Erkrankungen

Jearl Walker schreibt über lärminduzierte Gehörschäden:

Viele gestandene Rockmusiker haben nach vielen Jahren, die sie lauter Musik ausgesetzt waren (entweder auf der Bühne oder im Studio unter Kopfhörern), ernsthafte Hörprobleme. Beispielsweise hat sich bei Pete Townshend (von The Who) und Lars Ulrich (von Metallica) ein permanentes „Klingel im Ohr“ (Tinnitus) entwickelt, das stark genug ist, um die Konzentrationsfähigkeit und den Schlaf der Musiker zu stören. Auch viele DJs, die ständig in sehr lauter Umgebung arbeiten, haben Hörprobleme. Dabei kann es sich um einen vorübergehenden Verlust des Gehörs nach dem Plattenauflegen, einen dauerhaften Gehörverlust oder um Ohrgeräusche handeln. [...]

Die Einzelheiten, wie laute Geräusche einen vorübergehenden oder dauerhaften Gehörverlust auslösen, sind noch nicht hinlänglich verstanden.

Zu einem vorübergehenden Verlust des Gehörs kann es kommen, weil die Verstopfung von Blutgefäßen zu einer Reduzierung der Blutversorgung des Innenohrs führt.

Ein dauerhafter Gehörverlust kann darauf zurückzuführen sein, dass die Härchen der Hörschnecke, die für die Umwandlung von Schallfrequenzen in neuronale Signale an das Gehirn zuständig sind, verbogen werden.

Wenn diese Härchen gekrümmt sind und die Signale an das Gehirn von der Norm abweichen, interpretiert das Gehirn diese Änderung so, als würde Schall das Ohr erreichen [= Tinnitus].

(Walker, 2008, Seite 166)

4.4. Übungsaufgaben

Aufgabe 1:

Die Empfindlichkeit des Gehörs ist stark abhängig von der Frequenz; dies erfassen die Kurven gleicher Lautstärkepegel. Bei 1 kHz entsprechen 30 Phon einem Schalldruckpegel von 30 dB_{SPL}. Wie hoch muss der Schalldruckpegel bei einem Ton mit 125 Hz sein, damit er gleich laut wahrgenommen wird? Stelle dieselbe Überlegung für 80 Phon an. Bei 1 kHz beträgt der Schalldruck 80 dB_{SPL}. Wie verhält sich das bei 4 kHz?

Aufgabe 2: (Frage bei der Abschlussprüfung Sommer 2001 der IHK Erfurt)

In einem Abstand von 40 Metern vor der Front der Hauptlautsprecher ist eine Delay-Line installiert. Wie groß ist die erforderliche Delay-Time am entsprechenden Gerät einzustellen, damit beide Schallereignisse gleichzeitig am Hörort eintreffen?

Aufgabe 3: (Frage bei der Abschlussprüfung Winter 2000 der IHK Berlin)

Welches Phänomen beschreibt der Haas-Effekt?

Aufgabe 4:

Wie äußert sich eine lärmbedingte Schwerhörigkeit?

Aufgabe 5:

Vergleiche die Kurven gleicher Lautstärkepegel mit den Bewertungskurven aus Kapitel 2. Was lässt sich grob über deren Verlauf sagen, wie verlaufen die Kurven relativ zueinander?²⁸

Aufgabe 6:

Wie interpretiert man den Anstieg eines Isophons zu niedrigen Frequenzen hin? Ist das Gehör für diese Frequenzen empfindlicher oder unempfindlicher?²⁹



Literaturtipps:

Eska, Georg: Schall & Klang.
Basel: Birkhäuser Verlag.

Stickel, Andrea: Faszination Gehör.
Bergkirchen: PPV Medien.

²⁸ vgl. Meyer-Schwarzenberger, 1976, Pegel C, Seite 41

²⁹ vgl. Meyer-Schwarzenberger, 1976, Pegel C, Seite 23

5. Lärmschutz



Die Unterweisung in die Lärmschutzvorschriften ist im zweiten Lehrjahr vorgesehen. Neben den theoretischen Inhalten zum Thema Lärmschutz sollen in der Praxis akustische Emissionen gemessen werden.

Wer muss vor Lärm bei einer Veranstaltung geschützt werden?

- Die Mitarbeiter
- Das Publikum
- Die Anwohner

Für den Schutz jeder Personengruppe gelten jeweils andere Verordnungen, Normen oder Gesetze, die im Folgenden erläutert werden.

5.1. Schutz der Mitarbeiter vor Lärm

Anfang 2007 wurden europäische Richtlinien durch die Lärm- und Vibrations-Arbeitsschutzverordnung in deutsches Recht umgesetzt.¹ In dieser Verordnung werden Maßnahmen beschrieben, wie der Schalldruckpegel zu messen und eine Gefährdung der versicherten Personen (d.h. alle Mitarbeiter, die einen Versicherungsschutz durch eine Berufsgenossenschaft haben) durch Lärm zu vermeiden ist.²

5.1.1. Lärm- und Vibrations-Arbeitsschutzverordnung

Laut der LärmVibrationsArbSchV ist eine Erfassung des Schalldruckpegels als Tages- oder Wochen-Expositionspegel möglich: $L_{EX,8h}$ und $L_{EX,40h}$.

Die besonders gefährlichen Pegelspitzen werden über die Grenzwerte des Spitzenschalldruckpegels $L_{PC,peak}$ berücksichtigt. Bereits ein einzelner Peak führt zur Überschreitung des Grenzwertes.

Die Messungen werden gemäß DIN 45645-2 durchgeführt (Ermittlung von Beurteilungspegeln aus Messungen, Teil 2: Geräuschmissionen am Arbeitsplatz).

¹ vgl. Bundesgesetzblatt, 08. März, 2007

² vgl. Ebner et al., 2007, Seite 1

Auslöswerte laut der LärmVibrationsArbSchV:

- Untere Auslöswerte: $L_{EX,8h} = 80 \text{ dB}_A$ und $L_{pCpeak} = 135 \text{ dB}_C$
- Obere Auslöswerte: $L_{EX,8h} = 85 \text{ dB}_A$ und $L_{pCpeak} = 137 \text{ dB}_C$

Mit diesen Werten sind verschiedene Maßnahmen verbunden, die durch den Arbeitgeber umzusetzen sind.

A: Allgemeine Maßnahmen

Generell hat der Arbeitgeber Schutzmaßnahmen nach dem Stand der Technik durchzuführen, um eine Gefährdung der Beschäftigten auszuschließen. Priorität vor der Verwendung von Gehörschutz hat dabei die Verhinderung oder Verringerung der Lärmemission am Entstehungsort.

B: Spezielle Maßnahmen

Für $L_{EX,8h} \geq 80 \text{ dB}_A$ und $L_{pCpeak} \geq 135 \text{ dB}_C$:

→ Die Beschäftigten sind über die Ergebnisse der Gefährdungsbeurteilung zu informieren und hinsichtlich möglicher Gesundheitsgefährdung durch Lärm zu unterweisen

Für $L_{EX,8h} > 80 \text{ dB}_A$ und $L_{pCpeak} > 135 \text{ dB}_C$:

→ Es ist geeigneter Gehörschutz bereit zu stellen

→ Eine arbeitsmedizinische Vorsorgeuntersuchung muss angeboten werden

Für $L_{EX,8h} \geq 85 \text{ dB}_A$ und $L_{pCpeak} \geq 137 \text{ dB}_C$:

→ Es sind Lärmbereiche zu erfassen, zu kennzeichnen und falls technisch möglich abzugrenzen

→ Die Verwendung von Gehörschutz ist Pflicht

→ Eine arbeitsmedizinische Vorsorgeuntersuchung ist Pflicht (G20 Lärm)³

Für $L_{EX,8h} > 85 \text{ dB}_A$ und $L_{pCpeak} > 137 \text{ dB}_C$:

→ Es ist ein Lärminderungsprogramm durchzuführen⁴

5.1.2. Ermittlung von Beurteilungspegeln aus Messungen

Die Ermittlung von Beurteilungspegeln erfolgt entweder durch eine ortsfeste Messung mit Handschallpegelmessgerät in Ohrnähe des Beschäftigten (nach DIN EN 61672) oder als personengebundene Messung mit einem am Körper getragenen Schalldosimeter mit Mikrofonposition auf der Schulter (nach DIN

³ s. Kap. 5.1.4. „Arbeitsmedizinische Vorsorgeuntersuchung G20 Lärm“

⁴ s. Kap. 5.1.5. „Lärminderungsprogramm“

EN 61252). Für beide Varianten sind Schallmessgeräte der Genauigkeitsklasse 1 zu verwenden.⁵

5.1.2.1. Aufgabenbezogene Messung

Die Tätigkeiten einer Arbeitsschicht werden in mehrere typische Teilzeiten mit gleicher Lärmexposition zerlegt. Der Lärmexpositionspegel kann dann durch separate Messungen in den einzelnen Teilzeiten und unter Berücksichtigung der jeweiligen Zeitanteile berechnet werden.

Beispiel: Abb. 5.1 zeigt den Schalldruckpegelverlauf für einen Arbeitstag mit dem Zeitraum $T = 8$ Stunden. In der Teilzeit T_1 mit 2 Stunden Dauer wurde ein durchschnittlicher Schalldruckpegel von $L_{m1} = 75 \text{ dB}_A$ gemessen, in der Teilzeit T_2 über 2,5 Stunden ein Pegel von $L_{m2} = 85 \text{ dB}_A$ und in T_3 innerhalb 3,5 Stunden der Pegel $L_{m3} = 68 \text{ dB}_A$.

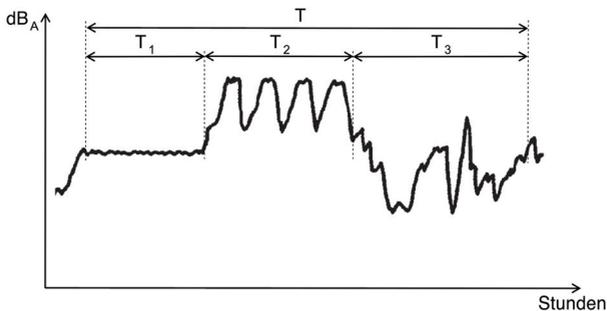


Abb. 5.1: Zerlegung einer Arbeitsschicht
Bildquelle: Hoffmann et al., 1999, Seite 122

Der Mittelungspegel L_m über die gesamte Arbeitszeit T berechnet sich dann:

$$L_m = 10 \lg \left[\frac{1}{T} \cdot (T_1 \cdot 10^{0,1 \cdot L_{m1}} + T_2 \cdot 10^{0,1 \cdot L_{m2}} + T_3 \cdot 10^{0,1 \cdot L_{m3}}) \right] \quad (\text{Formel 5.1})$$

$$L_m = 10 \lg \left[\frac{1}{8} \cdot (2,0 \cdot 10^{7,5} + 2,5 \cdot 10^{8,5} + 3,5 \cdot 10^{6,8}) \right]$$

$$L_m = 80,4 \text{ dB}_A$$

5.1.2.2. Berufsbildbezogene Messung

Für bestimmte Berufe oder einer Gruppe eines Berufsbildes mit Aufgaben von unbekannter Dauer erfolgt die Erfassung der Lärmexposition durch zufällige Stichprobenmessungen. Die Messdauer pro Stichprobe beträgt mindestens 15 Minuten, insgesamt summieren sich die Messzeiten aber auf mehrere Stunden.

⁵ vgl. Maue, 2006, Seite 3

5.1.2.3. Ganztagesmessung

Die Erfassung der Lärmexposition erfolgt hier durch Langzeitmessungen über mehrere vollständige Arbeitsschichten an mindestens drei Tagen. Ganztagesmessungen werden empfohlen für mobil eingesetzte Beschäftigte mit unterschiedlichen Tätigkeiten. Die Messungen sind mit personengebundenen Schalldosimetern durchzuführen.

5.1.2.4. Lärmdosis

Ohne Gehörschutz sollte die maximale Tagesdosis von 100 % nicht überschritten werden. Bei höheren Dosiswerten ist unbedingt ein geeignetes Gehörschutzmittel zu benutzen. Die Tagesdosis wird wie folgt berechnet:⁶

$$D_{\%} = 100 * \frac{T_e}{T_0} * 10^{0,1 * (L_m - L_0)} \quad (\text{Formel 5.2})$$

$D_{\%}$: Tagesdosis in %

T_e : Expositionsdauer, z.B. bei einer Veranstaltung 100 Minuten

T_0 : Bezugszeit 480 Minuten, d.h. ein Arbeitstag mit 8 Stunden

L_m : Gemittelter Schalldruckpegel über die Expositionsdauer

L_0 : Bezugsschalldruckpegel = 85 dB_A

5.1.3. Gehörschutzmittel

Wirksame Gehörschutzmittel müssen das Ohr vollständig abdichten, nur so wird Lärm effektiv gedämpft. Weiterhin sollte der Gehörschutz so leicht und bequem wie möglich sein und er darf den Träger nicht ablenken oder irritieren.⁷

5.1.3.1. Gehörgangverschließende Gehörschutzmittel

Es gibt verschiedene gehörgangverschließende Gehörschutzmittel:

- Ohrgerecht vorgeformte Gehörschutzwatte mit oder ohne Folienumhüllung
- Gehörschutzpfropfen, die fertig geformt sind oder aus Dehnschaumstoff bestehen können (Abb. 5.2)
- Otoplastiken: Werden nach Formabdrücken individuell an den Gehörgang angepasst. Von verschiedenen Herstellern gibt es Dämpfungsfiler mit möglichst linearem Frequenzgang. Beispiel Elacin: Hier werden Dämpfungsfiler mit 9, 15, 25 und 30 dB Dämpfung und Spezialfiter für impulshaften Schall angeboten (Abb. 5.3)

⁶ vgl. Maute, 2006, Seite 128

⁷ vgl. SUVA Pro, 2001, Seite 7ff

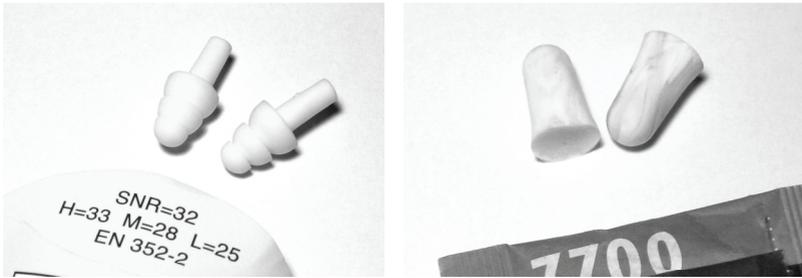


Abb. 5.2: Gehörschutzpfropfen



Abb. 5.3: Otoplastiken.

Links: Elacin Stöpsel, Rechts: Elacin Concha

5.1.3.2. Abdeckung des Gehörs

Durch Gehörschutzkapseln wird das Außenohr vollständig abgedeckt (Abb. 5.4). Manche Kapseln haben auch eine elektronische Antischallfunktion und pegelabhängige Schalldämmung. Gehörschutzkapseln mit Hör- und Sprechfunktion sind für den Anschluss an Kommunikationsanlagen geeignet.



Abb. 5.4: Gehörschutzkapseln

5.1.3.3. SNR-Wert

Laut DIN EN 352 und 458 ist für alle Gehörschutzmittel eine Baumusterprüfung vorgesehen, wobei hier der SNR-Schalldämmwert⁸ bestimmt wird. Der SNR-Schalldämmwert gibt an, um wie viel Dezibel ein Normgeräusch bei einer Labormessung reduziert wird.⁹ Die Messungen für den SNR erfolgen in acht Oktavbändern von 63 Hz bis 8 kHz. Zusätzlich werden Dämmwerte für hoch-, mittel- und tieffrequente Geräusche ermittelt:

- High (H) = 2 kHz bis 8 kHz
- Mid (M) = 1 kHz bis 2 kHz
- Low (L) = 63 Hz bis 1 kHz

In der Praxis wird durch unsachgemäße Benutzung des Gehörschutzes oft ein geringerer Dämmwert erreicht. Andererseits ist aber auch eine Überprotektion zu vermeiden, da sonst Warnsignale nicht mehr erfasst werden können.

5.1.4. Arbeitsmedizinische Vorsorgeuntersuchung G20 Lärm

Die ärztliche Vorsorgeuntersuchung G20 Lärm ist vor der erstmaligen Aufnahme einer Tätigkeit mit Gehörgefährdung von den Berufsgenossenschaften vorgeschrieben.¹⁰ Dabei werden die Gehörgänge untersucht und ein Hörtest in Luftleitung durchgeführt. Werden dabei Hörverluste festgestellt, dann müssen zusätzlich weitere Untersuchungen erfolgen: Kontrolle der Trommelfelle und ein Hörtest in Knochenleitung. Der Arzt muss außerdem ein Beratungsgespräch zum Thema Gehörschutz führen.

Die erste Nachuntersuchung erfolgt nach 12 Monaten, weitere Nachuntersuchungen sind Pflicht alle 60 Monate bei Belastung zwischen 85 und 90 dB_A bzw. alle 36 Monate bei über 90 dB_A.

5.1.5. Lärminderungsprogramm

Ein Lärminderungsprogramm umfasst Maßnahmen zur Arbeitsgestaltung und technische Vorkehrungen.¹¹ Mit Prioritätenliste und Zeitplan sind schriftlich protokolliert folgende Punkte abzarbeiten:¹²

- Erstellen eines Lärmquellen-Katasters, d.h. eine Ermittlung und Auflistung der Lärmschwerpunkte mit Angabe der jeweiligen Schallkennwerte

⁸ SNR = (engl.:) Single Number Rating

⁹ vgl. SUVA Pro, 2001, Seite 13ff

¹⁰ BGI 504-20, 1998, Seite 3

¹¹ vgl. BGV B 3, 2005, Seite 12

¹² vgl. BGI 712, 1994

- Feststellung der Arbeitsplatz-Belegung: Welche Arbeitsplätze befinden sich im Lärmbereich?
- Erstellen einer Schallpegeltopografie: Anfertigen eines Grundrissplans der Arbeitsplätze mit eingezeichneten Lärmquellen und die Verteilung des Schalldruckpegels (z.B. mit farbigen Dezibel-Linien in 5 dB-Schritten)
- Ursachenanalyse durchführen: Wo entsteht der Lärm und wie breitet sich der Schall im Arbeitsbereich aus?
- Aufstellung einer Lärminderungsprognose: Abschätzung der zu erwartenden Pegelminderung nach Durchführung von Lärminderungsmaßnahmen

5.1 DIN 15 905-5: Schutz des Publikums

Diese Norm beschreibt Maßnahmen zur Vermeidung einer Gehörgefährdung des Publikums durch hohe Schallemissionen bei elektroakustischer Beschallung. Anwendungsbereiche sind beschallte, für Publikum zugängliche Bereiche bei Veranstaltungen. Zum Beispiel in/bei:

- Diskotheken
- Filmtheatern
- Konzertsälen
- Mehrzweck- und Messehallen
- Räume für Shows, Events, Kabaretts und Varietes
- Studios für Hörfunk und Fernsehen
- Theater und Freilichtbühnen
- Open-Air-Veranstaltungen
- Festumzügen und Stadtfesten

5.2.1 Richtwerte

Für jede halbstündige Messperiode darf der durchschnittliche Pegel maximal $99 \text{ dB}_{L(A)eq}$ betragen ($=L_{eq30}$). Dieser Richtwert darf für jeweils eine halbstündige Messperiode innerhalb von zwei Stunden überschritten werden, wenn $99 \text{ dB}_{L(A)eq}$ über die gesamte Beurteilungszeit von zwei Stunden eingehalten werden ($=L_{eq120}$). Spitzenpegel dürfen $135 \text{ dB}_{L(C)peak}$ nicht überschreiten ($=L_{peak}$).

Die Einhaltung der geforderten Pegel wird durch Messungen nachgewiesen und ggf. muss eine Limitierung oder Leistungsbeschränkung der Beschallungsanlage erfolgen, wenn die Richtwerte überschritten werden. Messung werden mit Messmikrofonen und Geräten der Genauigkeitsklasse 2 am lautesten Punkt im Publikum durchgeführt ($=\text{maßgeblicher Immissionsort}$). Ein

davon abweichender Messort macht Korrekturwerte erforderlich. Ein geeichter Schallpegelmessgerät wird nicht vorgeschrieben, aber vor und nach der Messung ist das Messgerät zu kalibrieren.

5.2.2 Maßnahmen

Bei 85 dB_A und mehr:

- Eine protokollierte Messung ist durchzuführen und/oder die Beschallungsanlage zu begrenzen
- Das Publikum ist über den hohen Schalldruckpegel zu informieren
- Informationsmaterial zum Thema Gehörfähigung ist bereitzustellen

Bei 95 dB_A und mehr:

- Gehörschutz muss bereitgestellt und das Publikum zum Tragen aufgefordert werden

Generell Empfohlen:

- Eine Ampelanzeige am Mischerplatz:

Unter 95 dB_A Grün,

bei 95 bis 99 dB_A Gelb,

über 99 dB_A Rot.

Beispiel eines Mess-Systems für Schallpegelmessungen nach DIN 15905-5: dBmess 2007 von der dBmess Franchise GmbH (Abb. 5.5 und 5.6):

Dies ist ein Windows-Programm in Kombination mit einem speziellen Vorverstärker mit integrierten Bewertungsfiltren. Eine handelsübliche Soundkarte dient als A/D-Wandler. Mit zwei Messmikrofonen kann während der Veranstaltung an verschiedenen Orten der Schalldruckpegel erfasst werden z.B. in der Nähe der Hauptbeschallung und am Mischerplatz. Die Messung am Mischerplatz erfolgt dann jedoch nicht nach der DIN, sondern gemäß der LärmVibrationsArbSchV. Ein drittes Mikrofon direkt am Vorverstärker wird zur Kalibrierung vor und nach einer Messung benötigt.

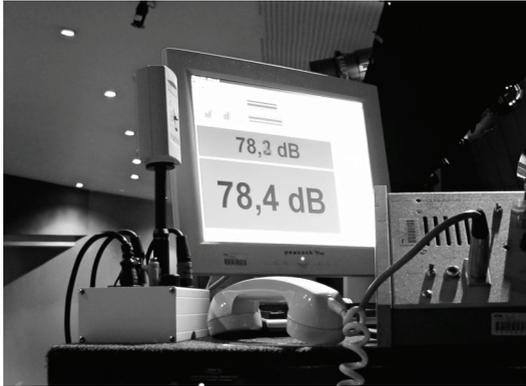


Abb. 5.5: dBmess am Mischertplatz



Abb. 5.6: Screenshot dBmess

In Abb. 5.7 ist ein Ausschnitt aus einem Messprotokoll zu sehen, welches mit dBmess erstellt wurde:

Zeit	Anzahl	Leq	Lmax	Lpeak	Leq30	Leq120
29.03.08 13:30:00	0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
29.03.08 14:00:00	0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
29.03.08 14:30:00	9	76,8	85,0	99,9	71,6	65,6
29.03.08 15:00:00	30	77,0	79,6	93,5	77,0	72,1
29.03.08 15:30:00	30	90,1	104,9	128,2	90,1	84,4
29.03.08 16:00:00	30	89,9	104,8	118,1	89,9	87,1
29.03.08 16:30:00	30	93,7	105,5	119,7	93,7	90,4
29.03.08 17:00:00	30	92,2	106,0	119,1	92,2	91,8

Abb. 5.7: Beispiel Messprotokoll

Erklärung des Messprotokolls: In der ersten Spalte steht das Datum der Veranstaltung und die Uhrzeit bzw. Startzeit der halbstündigen Messperioden. Unter „Anzahl“ stehen weniger als 30 Minuten, wenn die Messung innerhalb der halben Stunde gestartet oder gestoppt wurde (siehe die dritte Spalte: hier stehen nur 9 Minuten, d.h. die Messung wurde um 14:51 Uhr gestartet).

L_{eq} = Level Energy Equivalent. Der L_{eq} ist der berechnete Dauerschallpegel, der zu einer gleichen physikalischen Belastung des Gehörs führen würde, wie der tatsächliche Pegelverlauf

L_{max} = Maximum Level. Maximalpegel als RMS-Wert¹³

L_{peak} = Peak Level; Mit dem C-Filter bewerteter Spitzenpegel

L_{eq30} = L_{eq} über 30 Minuten gemittelt

L_{eq120} = L_{eq} über 120 Minuten gemittelt

5.2.3 Zeitbewertung bei Messungen

Nach DIN EN 60651 werden Zeitkonstanten für Schalldruckmessungen definiert. Im Prinzip soll damit die Trägheit des Gehörsinns bei den Messungen nachgebildet werden.

Tabelle 5.1: Zeitkonstanten für Schalldruckmessungen (Effektivwerte)

	Pegelanstieg	Pegelabfall
S = Slow	1 s	
F = Fast	125 ms	
I = Impuls	35 ms	1500 ms

Die Erfassung der Spitzenwerte ist durch extrem kurze Zeitkonstanten im μ s-Bereich möglich (P = Peak).¹⁴

¹³ RMS = (engl.) Root Mean Square;

vgl. Effektivwert einer Wechselspannung in Kap. 6.1.2. „Wechselstrom“

5.3 TA-Lärm: Schutz der Anwohner

Die Technische Anweisung Lärm ist eine Ausführungsbestimmung des Bundesimmissionsschutzgesetzes. Die zuständige Behörde kann verlangen, dass eine Messung durch eine zugelassene Meßstelle gemäß §26 und §28 BImSchG durchgeführt wird. Die Messung erfolgt 50 cm vor dem Fenster des nächsten Anwohners mit einem geeichten Schallpegelmessgerät der Klasse 1. Die zulässigen Beurteilungspegel sind in Tabelle 5.2 aufgeführt.

Tabelle 5.2: Zulässige Schalldruckpegel gemäß der TA-Lärm¹⁵

	Tag (6 bis 22 Uhr):	Nacht (22 bis 6 Uhr):
Industriegebiet	70 dB _A	70 dB _A
Gewerbegebiet	65 dB _A	50 dB _A
Kern- / Mischgebiet	60 dB _A	45 dB _A
Wohngebiet	55 dB _A	40 dB _A
Reines Wohngebiet	50 dB _A	35 dB _A
Krankenhäuser	45 dB _A	35 dB _A

Einzelne kurzzeitige Geräuschspitzen dürfen die Richtwerte am Tag um nicht mehr als 30 dB_A und in der Nacht um nicht mehr als 20 dB_A überschreiten.

Weiterhin sind Immissionsrichtwerte für sog. seltene Ereignisse festgelegt. Definition eines seltenen Ereignisses: Eine Lärmbelastung an nicht mehr als zehn Tagen oder Nächten im Jahr und an nicht mehr als jeweils zwei aufeinander folgenden Wochenenden. Hier dürfen die Richtwerte von 70 dB_A am Tag und 55 dB_A in der Nacht nicht überschritten werden.

An Tageszeiten mit erhöhter Empfindlichkeit wird außerdem ein Zuschlag von 6 dB berücksichtigt:

- An Werktagen zwischen 6 bis 7 und 20 bis 22 Uhr
- An Sonn- und Feiertagen zwischen 6 bis 9, 13 bis 15 und 20 bis 22 Uhr

Alle genannten Richtwerte gelten während der Tageszeit für einen Beurteilungszeitraum von 16 Stunden. In der Nacht wird die volle Stunde mit dem höchsten Beurteilungspegel herangezogen (z.B. 23:00 bis 0:00 Uhr).

In die Ermittlung bzw. Berechnung des Beurteilungspegels gemäß TA-Lärm fließen weiterhin noch meteorologische Korrekturwerte und Zuschläge für Ton-, Informations- und Impulshaltigkeit mit ein.

¹⁴ vgl. Hoffmann et al., 1999, Seite 102

¹⁵ vgl. VSGA, 03/2002

5.4 Übungsaufgaben

Aufgabe 1:

Welche Regelungen bzw. Vorschriften zum Lärmschutz gelten für die Mitarbeiter einer Veranstaltung, für das Publikum und die Anwohner?

Aufgabe 2:

Bei einem mehrtägigen Konzertfestival wird am FOH-Mischpult der Auslösewert von $L_{EX,8h} \geq 85 \text{ dB}_A$ überschritten, d.h. die Mitarbeiter dieser Veranstaltung müssen in diesem Bereich Gehörschutz tragen. Welche weiteren Maßnahmen muss der Veranstalter bzw. Arbeitgeber für die versicherten Personen an diesem Arbeitsplatz treffen?

Aufgabe 3:

Bei einem Konzert wird am FOH-Mischpult ein $Leq120$ von $91,8 \text{ dB}_A$ gemessen.¹⁶ Wie hoch ist die Lärmdosis des Tonmeisters am Mischpult mindestens bezogen auf einen Arbeitstag mit acht Stunden Arbeitszeit? Welche Folgerung ziehst Du aus dem berechneten Dosiswert?

Aufgabe 4:

Was bedeuten die Aufdrucke „H=33, M=28, L=25“ auf der Verpackung eines Gehörschutzmittels?



Literaturtipps:

Maute, Dieter: Technische Akustik und Lärmschutz.
München: Hanser Verlag.

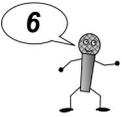
Hoffmann, Heinz, von Lüpke, Arndt und Maue, Jürgen H.:
0 Dezibel + 0 Dezibel = 3 Dezibel.
Berlin: Erich Schmidt Verlag.

Internet:

<http://www.din15905.de>

¹⁶ s. Abb. 5.7

6. Grundlagen der Elektronik



Neben den wichtigsten Grundlagen der Elektronik wird in diesem Kapitel der schaltungstechnische Aufbau von passiven und aktiven Filtern erklärt. Dies sind Themen für das erste Lehrjahr.

6.1. Gleichstrom und Wechselstrom

6.1.1. Gleichstrom

In einem Gleichstromkreis ist die Polarität der Spannungsquelle festgelegt, d.h. es gibt einen Plus- und Minuspol. Gleichspannungsquellen sind z.B. Batterien und Akkus (Akkumulatoren). Strom und Spannung sind beim Gleichstrom über die Zeit konstant (Ab. 6.1).

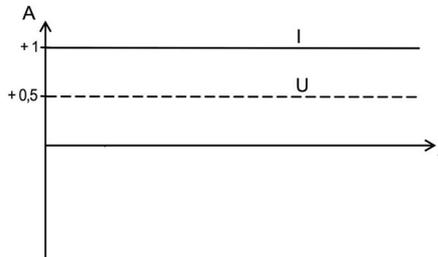


Abb. 6.1: Strom I und Spannung U bei Gleichstrom (Beispiel)

Strom I

Bewegt sich eine gewisse Menge an elektrischen Ladungsträgern Q in einer definierten Zeitspanne t durch einen Leiter, dann fließt der Strom I:

$$I = \frac{Q}{t} \quad (\text{Formel 6.1})$$

Einheit [A]

Q : Elektrische Ladung in Coulomb [C]

t : Zeit, in der die Ladungsmenge Q durch den Leiter fließt

Stromrichtung im Leiter

- Technischer Stromfluss = Von Plus- zum Minuspol (Angenommener Stromfluss in elektronischen Schaltungen)
- Physikalisch = Die Elektronen bewegen sich vom Minus- zum Pluspol (Tatsächlicher Stromfluss)

Spannung U

Allgemein betrachtet entsteht eine elektrische Spannung durch Ladungstrennung. Die getrennten Ladungen sind bestrebt, sich wieder aufzuheben und dieses Ausgleichsbestreben wird als elektrische Spannung bezeichnet.¹ Ist der ohmsche Widerstand R eines Leiters bekannt und der Strom I, der durch diesen Leiter fließt, so lässt sich die Spannung U berechnen:

$$U = R \cdot I \quad (\text{Formel 6.2})$$

Einheit [V]

R : Ohmscher Widerstand [Ω]

Elektrische Leistung P

Die elektrische Leistung P ist das Produkt aus der Spannung U und dem Strom I, welcher durch einen Leiter fließt:

$$P = U \cdot I \quad (\text{Formel 6.3})$$

Einheit [W]

Alternative Berechnungsmöglichkeiten für die elektrische Leistung:

$$P = \frac{U^2}{R} \quad (\text{Formel 6.4})$$

$$P = I^2 \cdot R \quad (\text{Formel 6.5})$$

Elektrische Energie W

Wirkt eine elektrische Leistung P über eine gewisse Zeit t, so wird die elektrische Energie W umgesetzt:

$$W = P \cdot t \quad (\text{Formel 6.6})$$

Einheiten: Wattsekunden [Ws] oder Kilowattstunden [kWh]

6.1.2. Wechselstrom

Wechselstromquellen sind zum Beispiel Generatoren, aber auch Niederfrequenz- und Hochfrequenzsignale in der Audio- und Nachrichtentechnik sind Wechselströme.² Wechselstrom kann durch Transformatoren auf andere Spannungen transformiert und durch Gleichrichterschaltungen zu Gleichstrom gewandelt werden.³ Strom und Spannung ändern sich beim Wechselstrom periodisch mit der Zeit (Abb. 6.2). Daraus folgt, dass es für Strom und Spannung

¹ vgl. Mueller, 2004, Seite 216

² NF = Niederfrequenz; HF = Hochfrequenz

³ s. Kap. 6.3.4. „Gleichrichterschaltungen“

die Spitzenwerte i_{\max} und u_{\max} gibt, aber auch die Durchschnitts- bzw. Effektivwerte I_{eff} und U_{eff} , die sich daraus ableiten lassen.

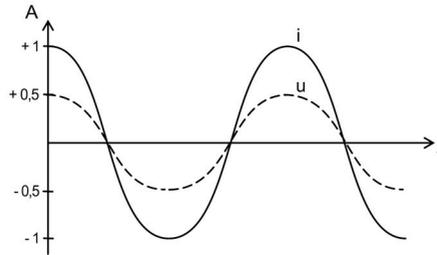


Abb. 6.2: Strom i und Spannung u bei Wechselstrom (Beispiel)

Effektivwert des Wechselstromes I_{eff}

$$I_{\text{eff}} = \frac{i_{\max}}{\sqrt{2}} \quad (\text{Formel 6.7})$$

Effektive Spannung U_{eff}

$$U_{\text{eff}} = \frac{u_{\max}}{\sqrt{2}} \quad (\text{Formel 6.8})$$

Crest-Faktor C

Der Crest-Faktor ist das Verhältnis zwischen dem Spitzenwert und Effektivwert einer Wechselspannung:

$$C = \frac{u_{\max}}{U_{\text{eff}}} \quad (\text{Formel 6.9})$$

Beispiel Crest-Faktor einer Sinusschwingung:

$$C = \frac{\sqrt{2}}{1} = 1,414 \quad (\text{Formel 6.10})$$

Der Crest-Faktor kann entweder als dimensionsloses Verhältnis ausgedrückt werden oder auch in Dezibel. Ein Crest-Faktor von $\sqrt{2}$ entspricht 3 Dezibel, d.h. die Signalspitzen der Wechselspannung liegen in diesem Fall +3 dB über dem Effektivwert.

Leistung beim Wechselstrom $p(t)$

Da sich der Strom und die Spannung beim Wechselstrom ständig mit der Zeit ändern, ist auch die elektrische Leistung eine zeitabhängige Größe:

$$p(t) = u(t) \cdot i(t) \quad (\text{Formel 6.11})$$

Durch Induktivitäten (Spulen) oder Kapazitäten (Kondensatoren) in einem Wechselstromkreis entstehen zudem noch Phasenverschiebungen zwischen Strom und Spannung (Abb. 6.3). Diese Phasenverschiebung führt dazu, dass es bei Wechselstrom mehrere Leistungsdefinitionen gibt, nämlich die Wirk-, Blind- und Scheinleistung.⁴

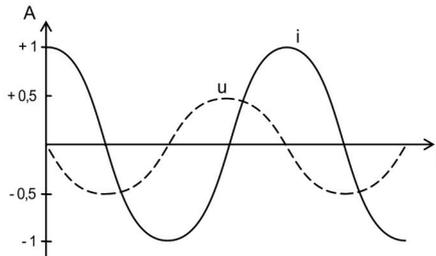


Abb. 6.3: Phasenverschiebung zwischen Strom und Spannung um 90°

Wirkleistung P

Die Wirkleistung P ist dann am größten, wenn Strom und Spannung mit 0° in Phase sind. Berechnung:

$$P = U * I * \cos\varphi \quad (\text{Formel 6.12})$$

Einheit [W]

oder bei bekannten Effektivwerten:

$$P = U_{\text{eff}} * I_{\text{eff}} \quad (\text{Formel 6.13})$$

Blindleistung Q

Die Blindleistung Q ist praktisch nicht nutzbar, da sie vom elektrischen Verbraucher zwar aufgenommen, aber sofort wieder an die Quelle zurückgegeben wird. Bei einer Phasenverschiebung von 90° ist die Blindleistung maximal und die Wirkleistung gleich Null.⁵ Berechnung der Blindleistung:

$$Q = U * I * \sin\varphi \quad (\text{Formel 6.14})$$

Einheit [var]

Scheinleistung S

Die Scheinleistung S lässt sich aus der Wirkleistung P und die Blindleistung Q ableiten:

$$S = \sqrt{P^2 + Q^2} \quad (\text{Formel 6.15})$$

⁴ vgl. Czichos und Hennecke, 2008, Seite G67 und SRT, 2000, Band 1, Seite 28

⁵ vgl. Mueller, 2004, Seite 219

oder auch:

$$S = U \cdot I \quad (\text{Formel 6.16})$$

Einheit [VA]

Die Scheinleistung liefert letztlich die effektiv nutzbare Energie für einen elektrischen Verbraucher.⁶

6.2. Widerstand, Induktivität und Kapazität (R, L und C)

6.2.1. Eigenschaften von R, L und C

6.2.1.1. Widerstand R

Fließen Elektronen durch einen elektrischen Leiter, so verlieren sie Energie, da sie gelegentlich mit den Atomen des Leiters zusammen stoßen. Der Leiter setzt den Elektronen gewissermaßen einen Widerstand entgegen. Bei diesem Vorgang wird Wärme freigesetzt.⁷

Definition des elektrischen Widerstandes (Ohmsches Gesetz):

$$R = \frac{U}{I} \quad (\text{Formel 6.17})$$

$$1 \Omega = \frac{1 \text{ V}}{1 \text{ A}} \quad (\text{Formel 6.18})$$

Einheit: Ohm [Ω]

Leitwert G

Der Leitwert G ist der Kehrwert des Widerstandes R:

$$G = \frac{1}{R} \quad (\text{Formel 6.19})$$

Einheit: Siemens [S]

Temperaturabhängigkeit von R

Für die meisten leitenden Materialien gilt, dass sich der elektrische Widerstand bei steigender Temperatur erhöht.

⁶ vgl. Mueller, 2004, Seite 220

⁷ vgl. Mueller, 2004, Seite 216

Verhalten bei Gleich- und Wechselspannung

Der Wechselstromwiderstand bzw. die Impedanz Z entspricht dem Gleichstromwiderstand R . Das bedeutet auch, dass der ohmsche Widerstand nicht abhängig ist von der Frequenz der Wechselspannung.

Reihenschaltung von Widerständen

$$R_{\text{Ges}} = R_1 + R_2 + R_3 + \dots + R_n \quad (\text{Formel 6.20})$$

Parallelschaltung von Widerständen

$$\frac{1}{R_{\text{Ges}}} = \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} + \frac{1}{R_3} + \dots + \frac{1}{R_n} \quad (\text{Formel 6.21})$$

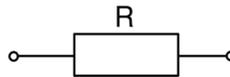


Abb. 6.4: Schaltsymbol Widerstand



Abb. 6.5: Verschiedene Widerstände

6.2.1.2. Induktivität L

In einer Induktivität, zum Beispiel in einer Spule, wird die elektrische Energie zeitlich begrenzt über ein magnetisches Feld gespeichert.

Definition der induktiven Einheit Henry [H]

$$1 \text{ H} = \frac{1 \text{ Vs}}{1 \text{ A}} \quad (\text{Formel 6.22})$$

Verhalten der Induktivität bei Gleichstrom

Legt man eine konstante Spannung an eine Induktivität an, so steigt der Strom kontinuierlich an. Die Spannung U sinkt proportional zur zeitlichen Änderung des Stromes I (Abb. 6.6). Eine Induktionsspannung entsteht nur, wenn sich die Stromstärke ändert, bei Gleichstrom entsteht daher keine Induktionsspannung.

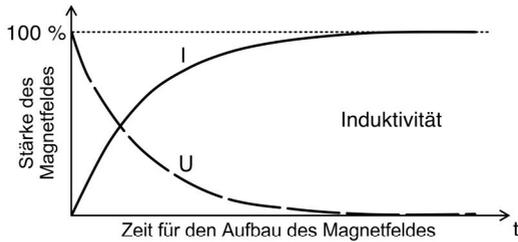


Abb. 6.6: Induktivität bei Gleichstrom

Verhalten bei Wechselstrom

Die Impedanz Z erhöht sich mit steigender Frequenz f :

$$Z = 2\pi f * L \quad (\text{Formel 6.23})$$

Das bedeutet, dass hohe Frequenzen durch eine Induktivität bedämpft werden, tiefe Frequenzen aber ungehindert passieren können.

Reihenschaltung von Induktivitäten

$$L_{\text{Ges}} = L_1 + L_2 + L_3 + \dots + L_n \quad (\text{Formel 6.24})$$

Parallelschaltung von Induktivitäten

$$\frac{1}{L_{\text{Ges}}} = \frac{1}{L_1} + \frac{1}{L_2} + \frac{1}{L_3} + \dots + \frac{1}{L_n} \quad (\text{Formel 6.25})$$



Abb. 6.7: Schaltsymbol Induktivität



Abb. 6.8: Drosselspule

6.2.1.3. Kapazität C

Ist eine Kapazität geladen, dann ist die Energie im elektrischen Feld zwischen den Kondensatorplatten gespeichert.

Definition der kapazitiven Einheit Farad [F]

$$1 \text{ F} = \frac{1 \text{ As}}{1 \text{ V}} \quad (\text{Formel 6.26})$$

Verhalten der Kapazität bei Gleichstrom

Speist man eine Kapazität mit einem konstanten Strom, so steigt die Spannung kontinuierlich an. Während der Ladezeit sinkt der Strom I proportional zur Spannung U . Nach Abschluss des Ladungsausgleichs fließt kein Strom mehr (Abb. 6.9).

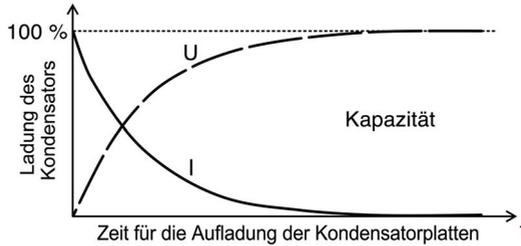


Abb. 6.9: Kapazität bei Gleichstrom

Verhalten bei Wechselstrom

Die Impedanz Z sinkt mit steigender Frequenz f :

$$Z = \frac{1}{2\pi f * C} \quad (\text{Formel 6.27})$$

Hier werden also tiefe Frequenzen durch die Kapazität bedämpft (Gleichstrom als „tiefste“ Frequenz wird sogar komplett gesperrt), hohe Frequenzen können aber ungehindert passieren.

Reihenschaltung von Kapazitäten

$$\frac{1}{C_{\text{Ges}}} = \frac{1}{C_1} + \frac{1}{C_2} + \frac{1}{C_3} + \dots + \frac{1}{C_n} \quad (\text{Formel 6.28})$$

Parallelschaltung von Kapazitäten

$$C_{\text{Ges}} = C_1 + C_2 + C_3 + \dots + C_n \quad (\text{Formel 6.29})$$

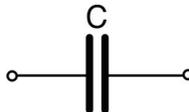


Abb. 6.10: Schaltsymbol Kapazität

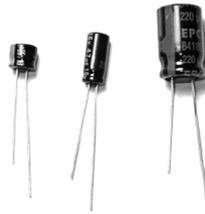


Abb. 6.11: Kondensatoren

6.2.2. Passive Filter

Aus Kombinationen von Widerständen, Induktivitäten und Kapazitäten können verschiedene passive Filter gebaut werden.

6.2.2.1. RC-Kombination als Tiefpass

Wie vorher schon aufgezeigt, sinkt die Impedanz eines Kondensators mit steigender Frequenz. Bezogen auf die RC-Schaltung in Abb. 6.12 bedeutet dies, dass hohe Frequenzen über den Kondensator „kurzgeschlossen“ werden und nur abgeschwächt bis zu den Ausgangsklemmen U_a gelangen. Umgekehrt betrachtet können tiefe Frequenzen die Schaltung ungehindert passieren, daher die Bezeichnung „Tiefpass“.

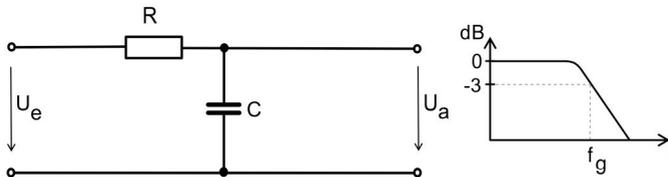


Abb. 6.12: RC-Tiefpass

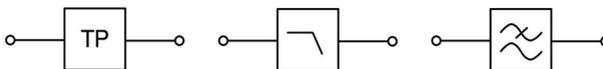


Abb. 6.13: Schaltbilder Tiefpass

6.2.2.2. RC-Kombination als Hochpass

Bei der Schaltungsanordnung in Abb. 6.14 werden die hohen Frequenzen ungehindert über den Kondensator geleitet. Tiefe Frequenzen werden dagegen abgeschwächt. Die tiefste Frequenz, letztlich also Gleichstrom, wird vom Kondensator komplett gesperrt.

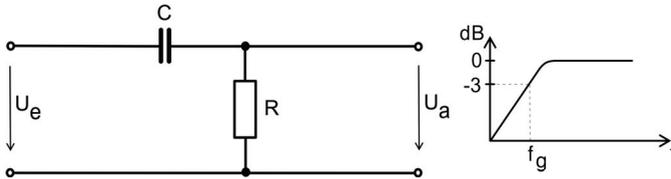


Abb. 6.14: RC-Hochpass

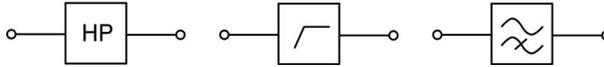


Abb. 6.15: Schaltbilder Hochpass

Bei den beiden gezeigten RC-Schaltungen für einen Tief- und Hochpass ist die Grenzfrequenz f_g mit

$$U_a = \frac{U_e}{\sqrt{2}} \approx U_e * 0,707 \quad (\text{Formel 6.30})$$

definiert. D.h. bei 70% des ursprünglichen Pegels liegt f_g ; Das entspricht einem Pegelabfall um -3 dB. Die Grenzfrequenz f_g lässt sich mit der folgenden Formel berechnen:

$$f_g = \frac{1}{2\pi * R * C} \quad (\text{Formel 6.31})$$

Die Flankensteilheit der Dämpfungskurve beträgt bei beiden Schaltungen -6 dB/Oktave bzw. -20 dB/Dekade, das bedeutet es sind Filter der 1. Ordnung (Oktave = Frequenzverdoppelung, Dekade = Frequenzverzehnfachung).

6.2.2.3. Filter höherer Ordnung

Bei einer Kettenschaltung von RC-Kombinationen erhält man Filter höherer Ordnung.

- Filter 2. Ordnung = Flankensteilheit -12 dB/Oktave (-40 dB/Dekade)
- Filter 3. Ordnung = Flankensteilheit -18 dB/Oktave (-60 dB/Dekade)
- Filter 4. Ordnung = Flankensteilheit -24 dB/Oktave (-80 dB/Dekade) etc.

Beispiel Tiefpass 2. Ordnung (Abb. 6.16):

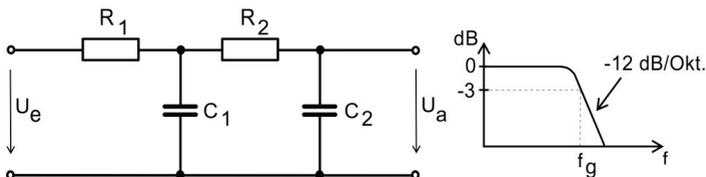


Abb. 6.16: Tiefpass zweiter Ordnung

6.2.2.4. RLC-Kombinationen als Tief- und Hochpass

Bei der Schaltung in Abb. 6.17 werden die hohen Frequenzen zum einen durch die Induktivität in Reihe und zusätzlich durch die parallele Kapazität bedämpft. Dieser Filter hat eine Flankensteilheit von -12 dB/Oktave (-40 dB/Dekade) und ist damit ein Tiefpass 2. Ordnung.

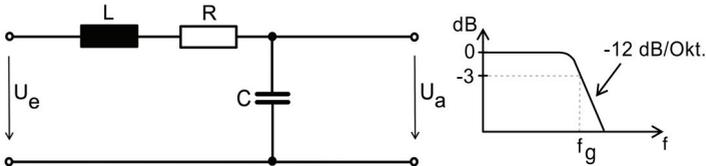


Abb. 6.17: RLC-Kombination als Tiefpass 2. Ordnung

Werden bei der Schaltung wie in Abb. 6.18 die Induktivität und Kapazität vertauscht, so ergibt sich ein Hochpassfilter 2. Ordnung:

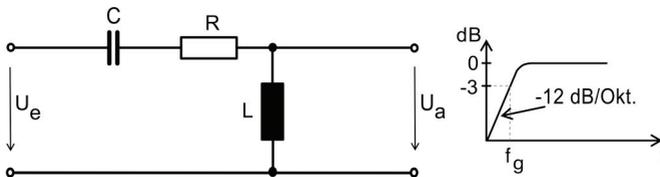


Abb. 6.18: RLC-Kombination als Hochpass 2. Ordnung

6.2.2.5. RLC-Kombination als Bandpass

Werden eine Induktivität und eine Kapazität in Reihe geschaltet, dann entsteht ein Reihenschwingkreis mit einer bestimmten Resonanzfrequenz. Die Induktivität schließt hier die niedrigen Frequenzen kurz, die Kapazität die hohen. Es kann also nur ein Frequenzband um die Resonanzfrequenz passieren und damit ist diese Schaltung ein Bandpassfilter (Abb. 6.19).

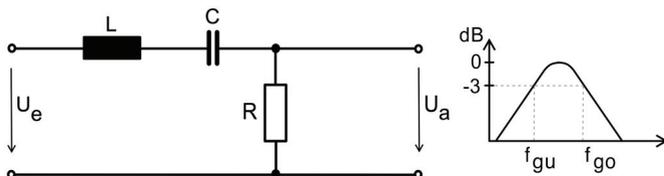


Abb. 6.19: RLC-Bandpass

Mittenfrequenz f_0 :

Die Resonanz- bzw. Mittenfrequenz des Reihenschwingkreises lässt sich wie folgt berechnen:

$$f_0 = \frac{1}{2\pi * \sqrt{L * C}} \quad (\text{Formel 6.32})$$

Ein Bandpass hat eine untere und obere Grenzfrequenz f_{gu} und f_{go} , die jeweils bei den -3dB -Punkten liegen. Sind nur die beiden Grenzfrequenzen bekannt, so kann die Mittenfrequenz auch wie folgt berechnet werden:

$$f_0 = \sqrt{f_{gu} * f_{go}} \quad (\text{Formel 6.33})$$

Weiterhin lassen sich mathematisch aus den Grenzfrequenzen die Bandbreite und die Güte des Filters ableiten:

Bandbreite Δf :

$$\Delta f = f_{go} - f_{gu} \quad (\text{Formel 6.34})$$

Güte Q :

$$Q = \frac{f_0}{\Delta f} \quad (\text{Formel 6.35})$$

6.2.2.6. Wien-Brücke (Bandpass)

Die Wien-Brücke ist eine Reihenschaltung eines Hoch- und Tiefpasses der 1. Ordnung und funktioniert damit als Bandpass mit einer Dämpfung von -6 dB/Oktave unterhalb der Grenzfrequenzen (Abb. 6.20).

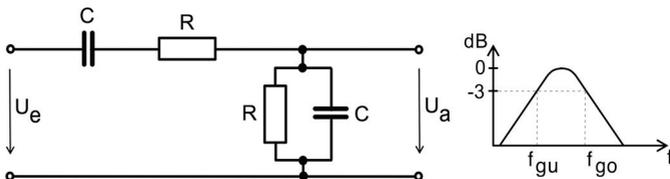


Abb. 6.20: Bandpass als Wien-Brücke

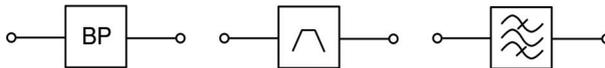


Abb. 6.21: Schaltbilder Bandpass

6.2.2.7. Doppel-T-Filter (Bandsperre)

Ein Doppel-T-Filter ist eine Parallelschaltung von Hoch- und Tiefpass der 1. Ordnung und funktioniert als Bandsperre mit einer Dämpfung von -6 dB/Oktave (Abb. 6.22). Bandsperren verhalten sich umgekehrt wie Bandpässe. Bandsperren werden zum Beispiel eingesetzt, um genau eine (Stör-)Frequenz herauszufiltern. Sehr schmalbandige Bandsperren mit einer hohen Güte nennt man auch Kerbfilter.

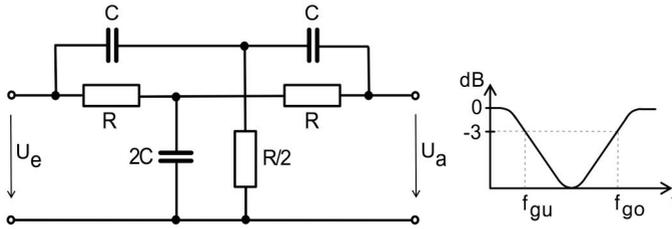


Abb. 6.22: Bandsperre als Doppel-T-Filter

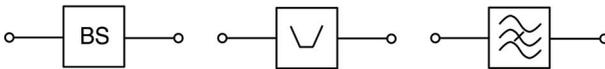
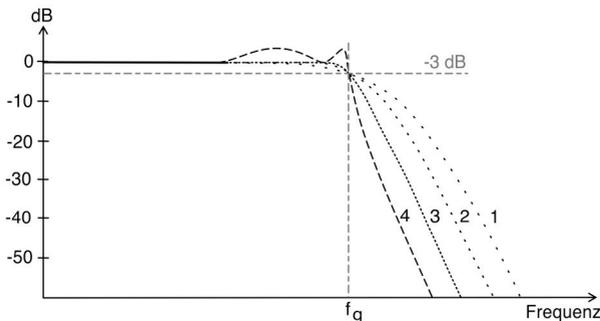


Abb. 6.23: Schaltbilder Bandsperre

6.2.2.8. Ideale und reale Filter

Der ideale Filter ist eine theoretische Modelvorstellung. Ein ideales Filter hat eine unendlich hohe Dämpfung im Sperrbereich, aber keine Dämpfung im Durchlassbereich, einen linearen Phasengang und eine senkrechte Flankensteilheit beim Übergang vom Durchlass- in den Sperrbereich. Reale Filter weichen dagegen vom Ideal in allen Punkten ab. Wird versucht, einen Parameter zu optimieren, so bewirkt dies Nachteile bei den anderen Parametern. Verschiedene Schaltungsprinzipien realer Filter haben unterschiedliche Kurvenverläufe und nichtlineare Phasengänge. Ein nichtlinearer Phasengang bedeutet, dass Frequenzanteile werden unterschiedlich verzögert (verschiedene Gruppenlaufzeiten). In Abb. 6.24 sind exemplarisch verschiedene reale Tiefpassfilter 4. Ordnung und deren Überschwingverhalten bei f_g gezeichnet.

Abb. 6.24: Kurven von Tiefpassfiltern 4. Ordnung
Bildquelle: Schenk und Tietze, 1999, Seite 841

- 1 = Tiefpass mit kritischer Dämpfung (kein Überschwingen)
- 2 = Bessel-Tiefpass (0,84% Überschwingen)
- 3 = Butterworth-Tiefpass (10,8% Überschwingen)
- 4 = Tschebyscheff-Tiefpass mit 3 dB Welligkeit (35,7 % Überschwingen)

6.3. Diode und Transistor

6.3.1. Leitfähigkeit von verschiedenen Materialien

Leiter

Leiter sind zum Beispiel Metalle, die freie Elektronen im Metallgitter aufweisen. Die Leitfähigkeit wird angegeben in Siemens pro Zentimeter. Gute Leiter haben eine Leitfähigkeit von 10^6 S/cm.

Nichtleiter (Isolatoren)

Nichtleiter sind zum Beispiel Kunststoffe oder Porzellan. Hier gibt es keine freien Ladungsträger und die Leitfähigkeit ist verschwindend gering.

Halbleiter

Hauptbestandteil von Halbleitern sind die 4-wertigen Elemente Silizium (Si) oder Germanium (Ge). Die Leitfähigkeit von Halbleitern ist temperaturabhängig bzw. beeinflussbar durch ein gezieltes Verunreinigen mit Fremdatomen, dem sog. Dotieren. Es ist möglich, Silizium und Germanium mit 3- und 5-wertigen Atomen anderer Elemente wie z.B. Aluminium oder Phosphor zu dotieren. 3-wertig dotierte Halbleiter nennt man auch p-Leiter, 5-wertig dotierte heißen n-Leiter.

6.3.2. Diode

Das einfachste Bauelement aus dotierten Halbleitermaterialien ist die Diode mit einem pn-Übergang (Abb. 6.25). Eine Diode hat für elektrischen Strom eine Durchlass- und eine Sperrrichtung:

- Durchlassrichtung = Pluspol an der Anode
- Sperrrichtung = Pluspol an der Kathode

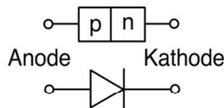


Abb. 6.25: Schaltbilder der Diode



Abb. 6.26: Verschiedene Dioden

Abb. 6.27 zeigt das Verhalten einer Diode in Durchflussrichtung. Erst oberhalb einer sog. Durchbruchspannung ist das Verhältnis von Spannung U und Strom I annähernd linear, zudem ist die Charakteristik der Diode abhängig von der Temperatur.

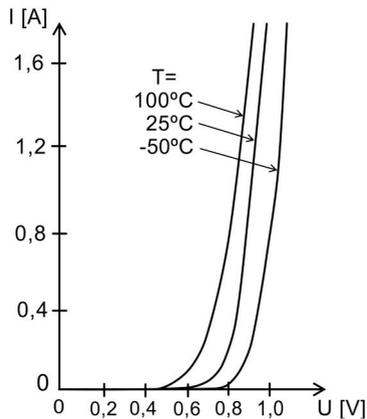


Abb. 6.27: Charakteristik einer Diode

6.3.3. Gleichrichterschaltungen

Dioden werden aufgrund ihrer Eigenschaft der Sperr- und Durchlassrichtung zum Beispiel in elektrischen Schaltungen eingesetzt, die Wechselstrom in Gleichstrom wandeln. Es gibt verschiedene Möglichkeiten, solche Gleichrichter zu bauen. Vier Schaltungsarten sollen hier aufgezeigt werden: Die Einweg-, Zweiweg- und Brückengleichrichtung und die Mittelpunktschaltung.

6.3.3.1. Einweggleichrichtung

Die Einweggleichrichtung ist das einfachste Schaltungsprinzip. Die Restwelligkeit der Ausgangsspannung hängt von der Kapazität des Kondensators ab, und ist im Vergleich zu den anderen Schaltungen noch recht hoch (Abb. 6.28).

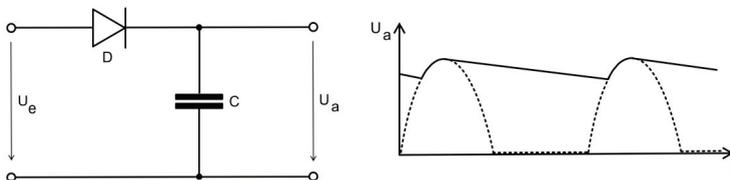


Abb. 6.28: Einweggleichrichter

Da immer nur eine halbe Schwingungsperiode des Wechselstroms gewandelt wird, hat der Einweggleichrichter einen schlechten Wirkungsgrad.

6.3.3.2. Brückengleichrichtung

Bei der Brückengleichrichterschaltung ist die Restwelligkeit schon wesentlich geringer (Abb. 6.29).

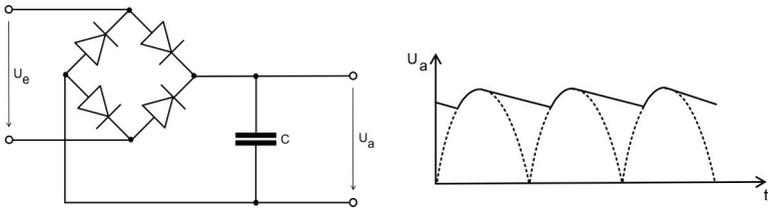


Abb. 6.29: Brückengleichrichter

Durch die weiteren Dioden kommt es allerdings zu Verlusten, trotzdem ist der Wirkungsgrad wesentlich besser als beim Einweggleichrichter, da jetzt die positive und negative Schwingungsperiode des Wechselstroms gewandelt wird.

6.3.3.3. Zweiweggleichrichtung

Bei einer Schaltung zur Zweiweggleichrichtung treten weniger Diodenverluste auf im Vergleich zum Brückengleichrichter auf. Meist wird ein Zweiweggleichrichter bei großen Strömen verwendet (Abb. 6.30).

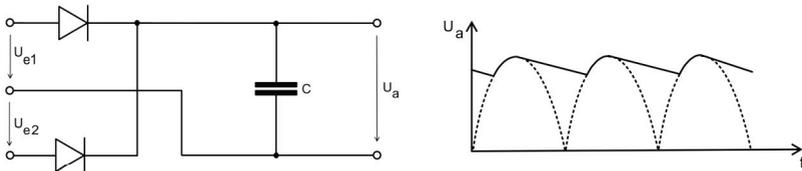


Abb. 6.30: Zweiweggleichrichter

6.3.3.4. Mittelpunktschaltung

Bei der Mittelpunktschaltung stehen am Ausgang zwei Gleichspannungen mit positiver und negativer Polarität zu Verfügung (Abb. 6.31).

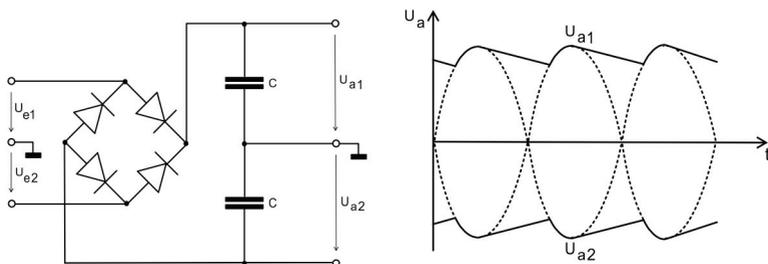


Abb. 6.31: Gleichrichter in Mittelpunktschaltung

6.3.4. Transistor

So wie die Diode besteht auch ein Transistor aus verschiedenen Halbleitermaterialien, also n- und p-Leitern. Der Aufbau erfolgt Schichtweise wie in Abb. 6.32 dargestellt. Die drei Anschlüsse eines Transistors haben die Bezeichnung Kollektor (C), Basis (B) und Emmitter (E).

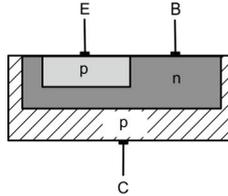


Abb. 6.32: Physikalischer Aufbau eines npn-Transistors

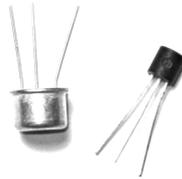


Abb. 6.33: Transistoren

Je nach Bauart stoßen entweder zwei p-dotierte Seiten zusammen (npn-Transistor) oder die zwei n-dotierte Seiten (pnp-Transistor). Die entsprechenden Schaltbilder unterscheiden sich durch die Richtung des Pfeils am Emmitter (Abb. 6.34).

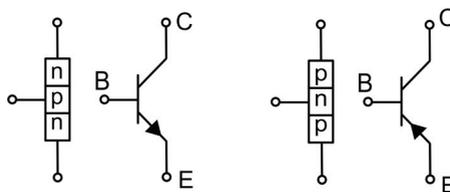


Abb. 6.34: Schaltbilder npn- und pnp-Transistor

Beim Transistor steuern kleine Steuerströme (bzw. Steuerspannungen) an der Basis große elektrische Ströme (Spannungen) zwischen Emmitter und Kollektor. Transistoren werden daher für Verstärkerschaltungen eingesetzt.

Einteilung der Transistoren nach der Anwendung

Je nach dem Frequenzbereich, in dem diese Verstärkerschaltungen optimal arbeiten sollen, können entsprechende Transistoren eingesetzt werden. Es gibt

spezielle Transistoren für NF-, HF-, VHF- und UHF-Signale. Daneben kann ein Transistor aber auch als einfacher Schalter ausgeführt sein.

Einteilung der Transistoren nach dem Stromfluss

- Kleinsignaltransistoren für Ströme von 20 mA bis 1 A
- Leistungstransistoren für Ströme über 1 A

Feldeffekt-Transistoren (FET)

Feldeffekt-Transistoren steuern den Stromfluss durch ein induziertes elektrisches Feld. Bei Feldeffekt-Transistoren haben die Anschlüsse andere Bezeichnungen: Source (S), Gate (G) und Drain (D).

Transistor-Schaltungsarten:

Je nachdem welcher Kontakt des Transistors mit der Masse verbunden ist, wird unterschieden zwischen der Basis-, Kollektor- und Emitterschaltung (Abb. 6.35 bis 6.37).

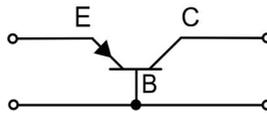


Abb. 6.35: Basisschaltung

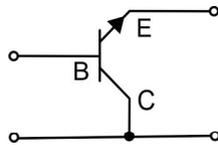


Abb. 6.36: Kollektorschaltung

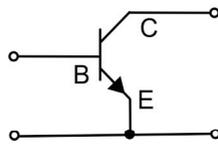


Abb. 6.37: Emitterschaltung

Tabelle 6.1: Eigenschaften der Transistorschaltungen

	Spannungs- verstärkung	Strom- verstärkung	Eingangs- widerstand	Ausgangs- widerstand
Basisschaltung	> 1	≈ 1	sehr klein	hoch
Kollektorschaltung	≈ 1	> 1	sehr hoch	sehr klein
Emitterschaltung	> 1	> 1	mittel	hoch

Anwendung verschiedener Transistorschaltungen:

Basisschaltung: Aufgrund des geringen Eingangswiderstands ist die Basisschaltung geeignet für HF-Verstärker (einfache Anpassung an niederohmige HF-Leitungen oder Antennen).

Kollektorschaltung: Eine Kollektorschaltung eignet sich als Impedanzwandler, d.h. zur Anpassung einer hochohmigen Quelle an einen niederohmigen Eingang.⁸

Emitterschaltung: Für NF-Schaltungen wie z.B. in einem Audioverstärker.

6.3.5. Einfacher Audioverstärker in Emitterschaltung

Beispiel: Mikrofonvorverstärker mit dem npn-Transistor BC 109

Erklärung zur Typenbezeichnung des Transistors:

- B = Silizium (A steht dagegen für Germanium)
- C = Tonfrequenztransistor, Kleinsignaltyp
(F = Hochfrequenztransistor, S = Schalttransistor)
- 109 = Registriernummer

Grenzwerte des BC 109 laut Datenblatt:⁹

- $I_{C \max.} = 200 \text{ mA}$, $U_{CE \max.} = 20 \text{ V}$
- Obere Grenzfrequenz $f_g = 100 \text{ MHz}$ bei $I_C = 10 \text{ mA}$ und $U_{CE} = 5 \text{ V}$ (Abb. 6.38)

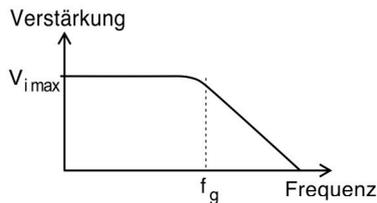


Abb. 6.38: Obere Grenzfrequenz des Transistors

Bei f_g ist die Verstärkung auf 70 % bzw. den Faktor $1/\sqrt{2}$ gefallen. Dies entspricht einem Pegel von -3 dB:

$$f_g \text{ bei } \frac{V_{i \max}}{\sqrt{2}} \quad (\text{Formel 6.36})$$

⁸ s. Kap. 11. „Anpassung und Audioleitungen“

⁹ vgl. BC 107, 1997, Seite 2 und 3

Schaltbild des Verstärkers

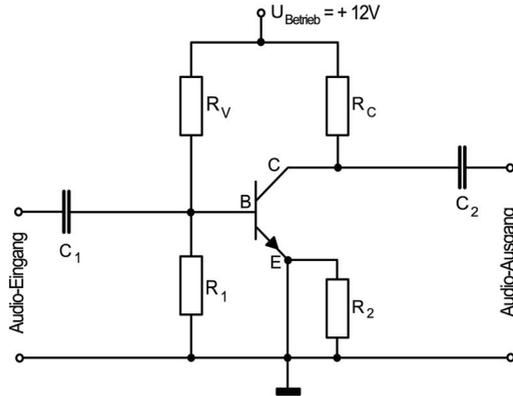


Abb. 6.39: Einstufiger Audioverstärker in Emitterschaltung
Bildquelle: Zastrow, 1984, Seite 131

$$U_{BE} \approx 0,6 \text{ V}$$

$$U_{CE} \approx 0,5 * U_{\text{Betrieb}} \approx 6 \text{ V}$$

$$R_C = 5,6 \text{ k}\Omega$$

$$R_V = 270 \text{ k}\Omega$$

C_1 und C_2 ($25\mu\text{F}$) : Kondensatoren zur Sperrung der Gleichspannung vor und hinter der Schaltung

R_1 ($47 \text{ k}\Omega$) und R_2 ($3,3 \text{ k}\Omega$) : Widerstände zur Temperaturstabilisierung; Der Transistor erwärmt sich während des Betriebes und dadurch ändert sich der interne Widerstandswert.

Die $+12 \text{ V}$ Gleichspannung ist nötig zum Betrieb des Transistors, die überlagerte Wechselspannung ist das Audio-Nutzsignal. Das Ein- und Ausgangssignal sind um 180° in der Phase gedreht (Abb. 6.40).

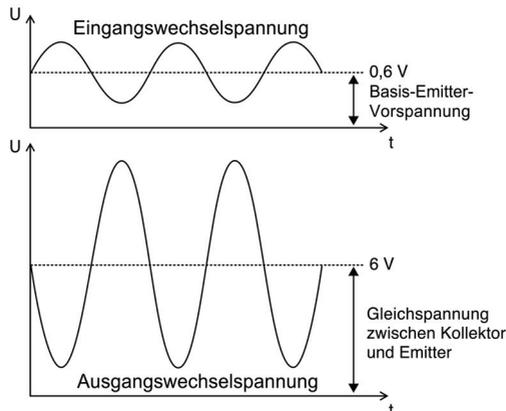


Abb. 6.40: Eingangs- und Ausgangssignal der Emitterschaltung

6.3.6. Anforderungen an Spannungsverstärker

A: Ein Wechselspannungsverstärker soll kleine Spannungen verstärken

Beispiel: Ein Signal am Eingang mit $U_e = 20 \text{ mV}$ soll auf $U_a = 2 \text{ V}$ verstärkt werden. Berechnung des Spannungsverstärkungsfaktor V_u :

$$V_u = \frac{U_a}{U_e} = \frac{2 \text{ V}}{20 \text{ mV}} = 100 \quad (\text{Formel 6.37})$$

Verstärkung 1 : 1 \rightarrow Keine Verstärkung ($V_u = 1$)

Verstärkung 20 : 1 \rightarrow Verstärkungsfaktor ($V_u = 20$)

Verstärkung 1 : 2 \rightarrow Verstärkungsfaktor ($V_u = 0,5 = \text{Dämpfung}$)

B: Der Verstärker soll möglichst wenig verzerren

D.h. der Kurvenverlauf der zu verstärkenden Spannung soll möglichst nicht verändert werden. Dieser Forderung steht zum einen die Begrenzung der Verstärkung durch die Betriebsspannung des Transistors entgegen (Clipping) und zum anderen die Verstärkungskennlinie, die nicht über den ganzen Bereich linear ist (Abb. 6.41 und 6.42). In beiden Fällen werden dem verstärkten Signal nichtlineare Verzerrungen in Form von zusätzlichen Oberschwingungen hinzugefügt.

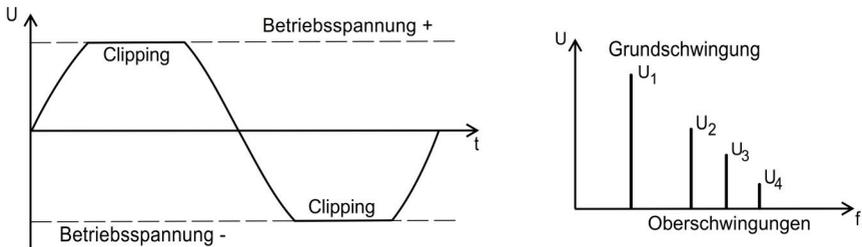


Abb. 6.41: Clipping (links) und Oberschwingungen (rechts)

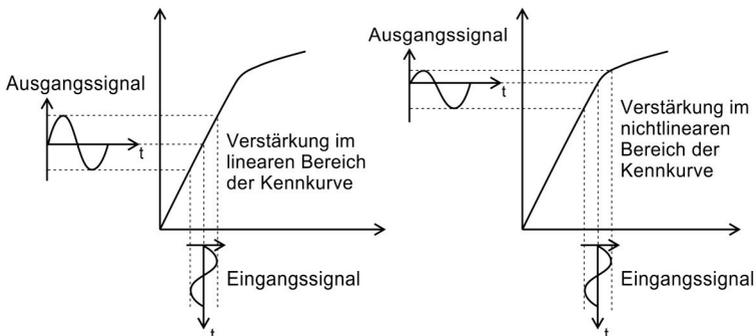


Abb. 6.42: Verstärkungskennlinie eines Transistors

Das Maß für die nichtlinearen Verzerrungen ist der Klirrfaktor k , welcher als THD-Wert (engl.: Total Harmonic Distortion) in Prozent angegeben wird.

$$k = \sqrt{\frac{\text{Effektivwert der Oberschwingungen}}{\text{Effektivwert der Grundschwingung}}} \cdot 100 [\% \text{ THD}] \quad (\text{Formel 6.38})$$

Bezogen auf das in Abb. 6.41 gezeigte Beispiel mit den drei Obertönen U_2 , U_3 und U_4 lautet die genaue Formel zum Berechnung des Klirrfaktors:

$$k = \sqrt{\frac{U_2^2 + U_3^2 + U_4^2}{U_1^2}} \cdot 100 [\% \text{ THD}] \quad (\text{Formel 6.39})$$

Der Klirrfaktor wird gemessen für eine bestimmte Frequenz (meist 1 kHz) und für eine bestimmte Aussteuerung (z.B. 0 dB_U).

C: Die Verstärkung soll im relevanten Frequenzbereich konstant sein

Die zulässigen Toleranzen im Verstärkungsbereich innerhalb der unteren und oberen Grenzfrequenz f_{gu} und f_{go} werden vom Hersteller definiert (Abb. 6.43). So dürfen diese Schwankungen im Frequenzgang zum Beispiel max. $\pm 1,5$ dB zwischen 20 Hz und 20 kHz betragen.

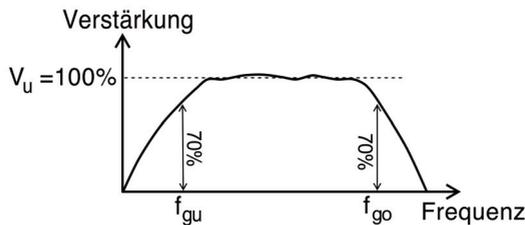


Abb. 6.43: Bandbreite

f_{gu} : untere Grenzfrequenz bei 70 % bzw. -3dB

f_{go} : obere Grenzfrequenz bei 70 % bzw. -3dB

100% Signalpegel sind dabei bezogen auf eine Frequenz von 1 kHz

6.3.7. Gegenkopplung

Arten der Gegenkopplung:

- Rückkopplung: Das Ausgangssignal wird vollständig auf den Eingang gelegt, es entsteht ein elektrischer Kurzschluss (Wird hier nicht weiter betrachtet)
- Mitkopplung: Nur ein Teil des Ausgangssignals wird auf den Eingang zurückgeführt. Es wird unterschieden zwischen einer Mitkopplung in Phase und gegen Phase

6.3.7.1. Mitkopplung in Phase

Bei der Mitkopplung in Phase wächst die wirksame Verstärkung, daneben steigen aber auch die Verzerrungen. Das System wird instabil und es entstehen eigenständige Schwingungen. Eine mögliche Anwendung sind daher z.B. Tongeneratoren.

6.3.7.2. Mitkopplung gegen Phase

Bei der Mitkopplung gegen Phase ist eine bessere Linearität gegeben, d.h. ein verbesserter Frequenzgang. Das System wird stabiler und die Verstärkung ist über den Rückkopplungsfaktor einstellbar (Abb. 6.44).

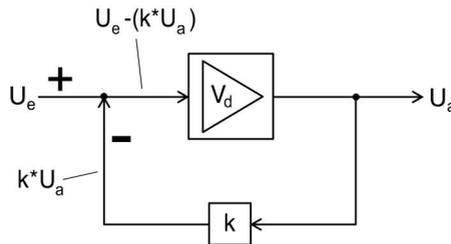


Abb. 6.44: Mitkopplung gegen Phase

Übertragungsfunktion der Mitkopplung:

$$U_a = \frac{U_e * V_d}{1 + (k * V_d)} \quad (\text{Formel 6.40})$$

Einheit [V]

U_e : Eingangsspannung

U_a : Ausgangsspannung

V_d : Verstärkungsfaktor

k : Rückkopplungsfaktor

6.4. Operationsverstärker

Ein Operationsverstärker (OP) ist eine miniaturisierte Schaltung, die aus mehreren Transistoren bestehen kann. Es gibt acht Anschlüsse an einem Operationsverstärker (Abb. 6.45).



Abb. 6.45: Operationsverstärker auf einer Platine

In Schaltbildern werden zur Vereinfachung aber meist die Anschlüsse für die Betriebsspannung weggelassen (in Abb. 6.46 sind sie noch eingezeichnet):

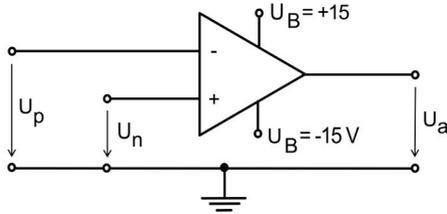


Abb. 6.46: Operationsverstärker

- : invertierender Eingang

+ : nicht invertierender Eingang

U_p : Spannung zwischen nicht invertierenden Eingang und Masse

U_n : Spannung zwischen invertierenden Eingang und Masse

U_a : Ausgangsspannung

U_B : Betriebsspannung

Im Folgenden werden einige einfache Schaltungen mit Operationsverstärkern gezeigt.

6.4.1. Nichtinvertierender Spannungsverstärker

Ein nichtinvertierender Spannungsverstärker behält die Polarität des Eingangsspannung bei (Phase = 0°) (Abb. 6.47).

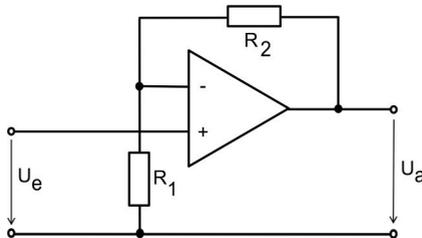


Abb. 6.47: Nichtinvertierender Spannungsverstärker¹⁰

Berechnung der Verstärkung V :

$$V = \frac{U_a}{U_e} = 1 + \frac{R_2}{R_1} \quad (\text{Formel 6.41})$$

¹⁰ vgl. Schmidt, 1996, Seite 57

6.4.2. Invertierender Spannungsverstärker

Beim invertierenden Spannungsverstärker ist die Polarität der Ausgangsspannung umgekehrt zur Eingangsspannung (Phase = 180°) (Abb. 6.48).

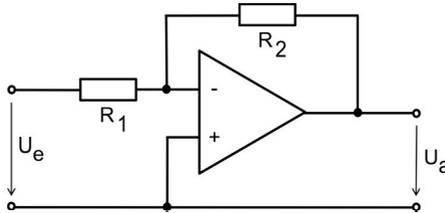


Abb. 6.48: Invertierender Spannungsverstärker¹¹

Berechnung der Verstärkung V :

$$V = \frac{U_a}{U_e} = -\frac{R_2}{R_1} \quad (\text{Formel 6.42})$$

6.4.3. Aktive Filter

6.4.3.1. Aktiver Tiefpass

Bei dieser Schaltung lässt der Kondensator in Gegenkopplung hohe Frequenzen durch. Diese werden zu dem invertierten Ausgangssignal addiert und löschen sich daher aus (Abb. 6.49).

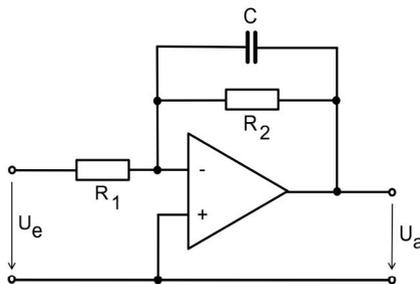


Abb. 6.49: Aktiver Tiefpass

¹¹ vgl. Schmidt, 1996, Seite 57

6.4.3.2. Aktiver Hochpass

Die Spule in Gegenkopplung lässt hier tiefe Frequenzen durch; Diese werden zu dem invertierten Ausgangssignal addiert und löschen sich daher aus (Abb. 6.50).

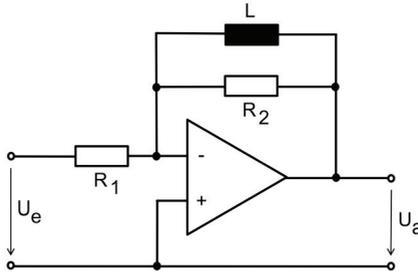


Abb. 6.50: Aktiver Hochpass

6.4.3.3. Allpass

Allpässe haben einen konstanten Amplituden-Frequenzgang, d.h. die Dämpfung ist für jede Frequenz gleich. Allerdings wird die Phase frequenzabhängig gedreht (Abb. 6.51).

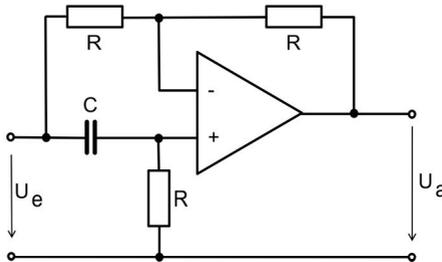


Abb. 6.51: Allpassfilter

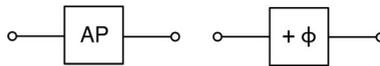


Abb. 6.52: Schaltbilder Allpass

6.5. Übungsaufgaben

Aufgabe 1:

Bei einem Verstärker beträgt die Eingangsspannung $U_e = 1 \text{ mV}$ und die Ausgangsspannung $U_a = 1 \text{ V}$. Wie groß ist der Verstärkungsfaktor?

Aufgabe 2:

Ein Bandpassfilter hat eine untere Grenzfrequenz von 600 Hz und eine obere Grenzfrequenz von 1200 Hz. Berechne die Mittenfrequenz, die Bandbreite und die Güte.

Aufgabe 3:

Eine Audiosignal hat eine Spitzenspannung von $1,4 \text{ V}_{\text{SS}}$, und eine effektive Spannung von $1,13 \text{ V}_{\text{eff}}$. Berechne den Crest-Faktor.

Überlege und begründe: Was ist der „Grenzwert“ des Crest-Faktors?

Aufgabe 4:

Skizziere die Impedanzverläufe von Widerstand, Spule und Kondensator.

Aufgabe 5:

Recherchiere (in Literatur oder im Internet): Wie ist ein Hochpass und ein Tiefpass als RL-Glied aufgebaut. Skizziere die jeweilige Schaltungen. Wie wird die Grenzfrequenz dieser Filter berechnet?

Aufgabe 6:

Eine sinusförmige Wechselspannung hat einen Spitzenwert von 18 V. Wie groß ist der Effektivwert?



Literaturtipp:

Kories, Ralf und Schmidt-Walter, Heinz: Taschenbuch der Elektrotechnik. Frankfurt am Main: Harri Deutsch Verlag.

7. Netzteile, Batterien und Akkus



Die Stromversorgung von Audiogeräten wird nicht ausdrücklich im Rahmenlehrplan erwähnt. Trotzdem sollte ein Grundlagenwissen darüber vermittelt werden, da letztlich jedes Gerät über ein Netzteil verfügt. Batterien und Akkus werden bei der drahtlosen Tonübertragung eingesetzt werden.

7.1. Netzteile

Jedes Gleichspannungsnetzteil besteht im Prinzip aus einem Transformator (Trafo), der die Eingangswechselspannung von 230 V auf den gewünschten Wert herunter transformiert (z.B. auf 9, 12, 18 oder 24 V), und einer Gleichrichterschaltung in Kombination mit einem Ladekondensator. Es gibt unregelte, stabilisierte und getaktete Netzteile.¹

7.1.1. Ungeregelte Netzteile

Ungeregelte Netzteile bestehen aus einem Trafo, dem Gleichrichter mit Ladekondensator und einer Siebeschaltung (Abb. 7.1).

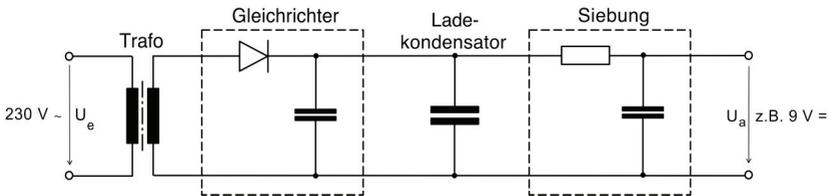


Abb. 7.1: Ungeregeltes Netzteil

Ungeregelte Netzteile sind die einfachste und damit billigste Variante. Sie werden hauptsächlich als Steckernetzteilen angeboten.

Was ist zu beachten?

Die Stromaufnahme des Verbrauchers darf den maximalen Ausgangsstrom des Netzteils nicht überschreiten und der Verbraucher muss polungsrichtig angeschlossen werden. Das Netzteil muss die richtige Ausgangsspannung haben.

Vorsicht: Manche Audiogeräte haben Buchsen, in die der Stecker eines Gleichspannungs-Standardnetzteils passt, obwohl das Gerät mit Wechselspannung betrieben werden muss. Daher immer auf die Beschriftungen achten.

¹ s. Kap. 6.3.4. „Gleichrichterschaltungen“

7.1.2. Stabilisierte Netzteile (Analoge Spannungsstabilisierung)

Bei stabilisierten Netzteilen sorgt ein Regelement für eine konstante Ausgangsspannung (Abb. 7.2).

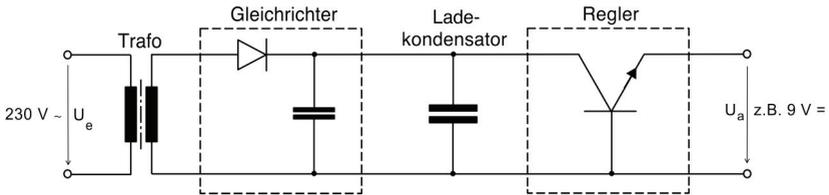


Abb. 7.2: Stabilisiertes Netzteil

Eigenschaften stabilisierter Netzteile:

- Positiv: Geringe Restwelligkeit und stabile Ausgangsspannung bei verschiedenen Lasten
- Negativ: Hohe Wärmeentwicklung; Daher ist der Einsatz von Kühlkörpern und manchmal auch eines Lüfters notwendig. Folglich haben stabilisierte Netzteile oft eine große Bauweise

7.1.3. Getaktete Netzteile (Schaltnetzteile)

Ein Transistor, der als Schalter betrieben wird, zerhackt die Spannung nach dem Gleichrichter in ein Rechtecksignal. Diese Rechteckspannung lädt dann ständig den Ausgangskondensator nach. Die Schaltfrequenz liegt bei 20 bis 1300 kHz, d.h. außerhalb des Hörbereichs (Abb. 7.3).

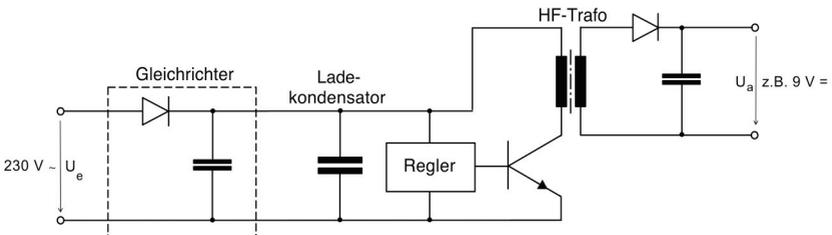


Abb. 7.3: Getaktetes Netzteil

Eigenschaften getakteter Netzteile:

- Positiv: Wenig Wärmeentwicklung, geringe Baugröße, hoher Wirkungsgrad
- Negativ: Das Netzteil kann HF-Störungen verursachen

7.2. Batterien und Akkus

7.2.1. Funktionsprinzip von Batterien und Akkus

Bei Batterien und Akkumulatoren (Akkus) bilden zwei Elektroden und ein Elektrolyt zusammen ein galvanisches Element. Die Elektroden, Kathode und Anode, bestehen aus verschiedenen Metallen und aufgrund der elektrochemischen Spannungsreihe baut sich eine Spannung zwischen ihnen auf. Elektrochemische Spannungsreihe: Metalle nehmen bei Kontakt mit Elektrolyten unterschiedlich stark Elektronen auf oder geben diese in die Lösung ab.

Bei Batterien (manchmal auch Einweg- oder Primärzellen genannt) kann die Anode aus Blei, Zink oder Lithium bestehen. Die Kathode besteht z.B. aus Kupfer, Silber oder Kohle. In Batterien laufen chemische Reaktionen ab, welche die Elektroden zerstören und somit ist dieser Prozess nicht umkehrbar. Die Anode verbraucht sich beim Entladen und dabei verringert sich die chemisch wirksame Oberfläche. Der Innenwiderstand der Batterie steigt dadurch und die Ausgangsspannung sinkt.² Bei Akkus (Sekundärzellen) sorgen dagegen spezielle Metallkombinationen dafür, dass der Entladevorgang umkehrbar ist.³

7.2.2. Vor- und Nachteile von Batterien und Akkus

7.2.2.1. Batterien

Vorteile

- Können mehr Energie als ein Akku vergleichbarer Größe speichern
- Behalten bei Lagerung die Energie über einen langen Zeitraum (Jahre)
- Standardbatterien sind überall erhältlich

Nachteile

- Verbrauchte Batterien müssen über den Sondermüll entsorgt werden
- Auf Dauer teurer als Akkus

7.2.2.2. Akkus

Vorteile

- Durch mehrmalige Verwendung weniger umweltschädlich im Vergleich zu Batterien
- Bei häufigen Einsatz billiger als Batterien

² vgl. Fluch, 2008, Seite 16

³ vgl. SRT, 2000, Band 1, Seite 55

Nachteile

- Akkusätze müssen oft nach einem Jahr komplett erneuert werden
- Gute Ladegeräte sind teuer

7.2.3. Technische Parameter von Batterien und Akkus

Nennspannung

Die Nennspannung ist die ungefähre Größe der Spannung an den Kontakten. Die tatsächliche Spannung hängt ab von der Belastung, dem Ladezustand und der Temperatur.

Kapazität

Die Kapazität ist die Größe der gespeicherten Ladung; Einheit [Ah] bzw. [mAh]. Ein Akku mit 500 mAh kann theoretisch über eine halbe Stunde 1 A Strom liefern, oder 50 mA über 10 Stunden etc.⁴

Selbstentladung

Die chemische Reaktion in der Zelle findet auch bei ungenutzten Batterien und Akkus statt. Diese Selbstentladung ist verschieden stark ausgeprägt. Manche Bleiakkus können pro Tag bis zu 1% der Ladung verlieren, während einige Batterietypen mehrere Jahre lagerfähig sind. Die Selbstentladung wird meist in [%] pro Monat angegeben.⁵

Innenwiderstand und Modellvorstellung der „realen Spannungsquelle“

Die Batterie besteht aus zwei fiktiven Komponenten: Einer konstanten Spannungsquelle und dem Innenwiderstand, der dafür sorgt, dass der Stromfluss begrenzt wird. Diese Ersatzschaltung (Abb. 7.4) beschreibt das reale Verhalten der Batterie. Ohne Belastung kann die Leerlaufspannung gemessen werden, die bei zunehmender Stromentnahme geringer wird. Der Innenwiderstand ist dabei das Maß für den Ladezustand der Batterie. Je weniger Ladung sie enthält, desto größer ist der Innenwiderstand.

Bei Belastung sinkt an den Polen der Batterie bzw. des Akkus die Spannung ab. Je mehr Strom entnommen wird, desto kleiner wird die Spannung, im Extremfall gibt die Zelle den maximal möglichen Strom ab, während die Spannung auf nahezu 0 V sinkt (Kurzschluss).

⁴ vgl. Hanus, 2008, Seite 22

⁵ vgl. Hanus, 2008, Seite 44 und Fluch, 2008, Seite 17 und 18

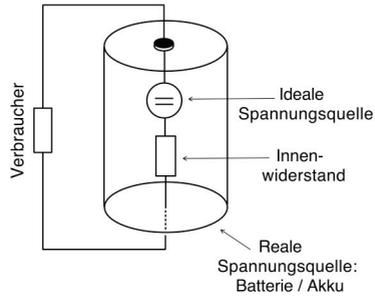


Abb. 7.4: Ersatzschaltung
Bildquelle: SRT, 2000, Band 1, Seite 56

Berechnung der Leerlaufspannung U_0 :

$$U_0 = I \cdot R_i + U_{Kl} \quad (\text{Formel 7.1})$$

U_0 : Leerlaufspannung

I : Strom, der über einen Verbraucher fließt

R_i : Innenwiderstand

U_{Kl} : Klemmspannung

Serienschaltung von Spannungsquellen

Die Gesamtspannung ergibt sich bei der Serienschaltung durch die Addition der Einzelspannungen:

$$U_{\text{Gesamt}} = U_1 + U_2 + U_3 + \dots + U_n \quad (\text{Formel 7.2})$$

Die Innenwiderstände addieren sich in gleicher Weise:

$$R_{i \text{ Gesamt}} = R_{i1} + R_{i2} + R_{i3} + \dots + R_{in} \quad (\text{Formel 7.3})$$

Parallelschaltung von Spannungsquellen

Die Gesamtspannung U bleibt bei der Parallelschaltung gleich, solange die Einzelquellen gleiche Ausgangsspannungen haben.

$$U_{\text{Gesamt}} = U_1 = U_2 = U_3 = \dots = U_n \quad (\text{Formel 7.4})$$

Der Gesamt-Innenwiderstand der Parallelschaltung sinkt und berechnet sich für drei Spannungsquellen wie folgt:⁶

$$R_{i \text{ Gesamt}} = \frac{R_1 + R_2 + R_3}{R_1 \cdot R_2 + R_2 \cdot R_3 + R_3 \cdot R_1} \quad (\text{Formel 7.5})$$

⁶ vgl. Fluch, 2008, Seite 6

7.2.4. Eigenschaften von verschiedenen Batterietypen⁷

Zink-Kohle-Batterien (ZnC)

Zink-Kohle-Batterien sind erhältlich in billigen Standardausführungen mit 1,5 V (Typ: D, C, AA und AAA)⁸ oder als 9 V-Blockbatterie. Meist haben Zink-Kohle-Batterien ein angedicktes Elektrolyt und sind daher auslaufsicher. Sie haben eine relativ niedrige Kapazität und sind deshalb nur für Geräte mit geringem Stromverbrauch geeignet.⁹

Alkali-Mangan-Batterien (AlMn)

Die sog. Alkaline-Batterien gibt es als teure Standardausführungen mit einer bis zu vierfach höheren Kapazität im Vergleich zu Zink-Kohle-Batterien. Alkaline-Batterien werden daher auch bei der drahtlosen Tonübertragung für die tragbaren Funksender und -empfänger eingesetzt.

Silberoxid- und Lithium-Batterien

Silberoxid-Batterien sind meist Knopfzellen, die in verschiedenen Baugrößen angeboten werden und eine Spannung von z.B. 1,55 V haben. Lithium-Batterien gibt es in Spezialbauformen z.B. für Fotoapparate mit 1,55 V und 3 V.



Abb. 7.5: verschiedene Batterien
Oben: Micro (AAA), Mitte: Mignon (AA), Unten: 9V-Block

⁷ vgl. SRT, 2000, Band 1, Seite 56

⁸ Andere Bezeichnungen: D = Mono, C = Baby, AA = Mignon und AAA = Micro

⁹ vgl. Hanus, 2008, Seite 15

Was ist bei Batterien zu beachten?¹⁰

- Immer komplette Batteriesätze austauschen, denn bei unterschiedlichen Ladungszustand fließen Ausgleichsströme zwischen den Zellen (dies gilt auch für Akkus)
- Wird ein batteriebetriebenes Gerät länger nicht benutzt, dann die Batterien wegen Auslaufgefahr entnehmen
- Auf die Mindesthaltbarkeit achten
- Batterien müssen als Sondermüll entsorgt werden

7.2.5. Eigenschaften von verschiedenen Akkutypen¹¹

Bleiakkus (Pb)

Die Elektroden bestehen aus Blei (Kathode) bzw. Bleioxid (Anode), das Elektrolyt ist Schwefelsäure. Beim Laden entsteht Knallgas. Bleiakkus haben eine hohe Selbstentladung von ca. 1% pro Tag und sind empfindlich auf Tiefentladung, die den Akku beschädigen oder vernichten kann.¹² Ein Auslaufen der Säure ist möglich, außer bei wartungsfreien Blei-Gel-Akkus. Bleiakkus mit 12 oder 24 V werden in Kraftfahrzeugen eingesetzt.

Nickel-Cadmium-Akkus (NiCd)

NiCd-Akkus haben keine Probleme mit Tiefentladung, allerdings tritt stattdessen der Memory-Effekt auf: Der Akku verliert einen Teil der Kapazität durch eine Veränderung der Kristallstruktur im Inneren der Zelle. Kleine Kristalle wandeln sich zu großen Kristallen um, die dann weniger reaktionsfreudige Oberfläche aufweisen. Das passiert, wenn der Akku nicht oder nur teilweise belastet wird. Der Memory-Effekt ist reparabel durch ein langsames, vollständiges Entladen und anschließender Vollaufladung.¹³ Die Spannung von NiCd-Akkus beträgt bei Standardtypen nur 1,2 V anstatt 1,5 V wie bei vergleichbaren Batterien.

Nickel-Metallhydrid-Akkus (NiMH)

NiMH-Akkus sind in allen Standardbauformen erhältlich und haben den Vorteil, dass sie ohne das Schwermetall Cadmium auskommen. Bei gleicher Baugröße kann mehr Ladung gespeichert werden als bei NiCd-Akkus. Auch gibt es keinen Memory-Effekt, allerdings eine höhere Selbstentladung.

¹⁰ vgl. SRT, 2000, Band 1, Seite 57

¹¹ vgl. SRT, 2000, Band 1, Seite 58 und 59

¹² vgl. Hanus, 2008, Seite 30 und 31

¹³ vgl. Fluch, 2008, Seite 19

Lithium-Ionen Akkus (Li-Ion)

Die Nennspannung von Lithium-Ionen-Akkus ist ungefähr dreimal so hoch wie bei NiMH-Akkus. Die Kapazität verringert sich mit der Zeit ohne Benutzung und eine Tiefendladung schädigt den Akku dauerhaft. Es sind für diesen Akkutyp spezielle Ladeschaltungen notwendig.

7.2.6. Kenndaten von Akkus

Entladeschlußspannung

Während des Entladens sinkt die Klemmspannung des Akkus nur geringfügig. Erst, wenn der Akku die gespeicherte Energie fast komplett abgegeben hat, sinkt die Spannung rapide bis zur Entladeschlußspannung ab (Abb. 7.6). Die Kapazität eines Akkus ist immer im Bezug auf die Entladeschlußspannung zu sehen, bei NiCd-Akkus liegt sie beispielsweise bei 0,85 bis 1,0 V, bei NiMh-Akkus beträgt sie 1 V.¹⁴

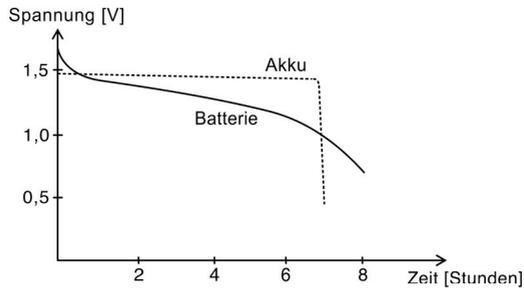


Abb. 7.6: Entladekurven Batterie und Akku

Ladeschlußspannung

Beim Laden steigt die Klemmspannung des Akkus erst schnell, dann langsamer an. Die Ladeschlußspannung ist der Wert bei vollständiger Ladung des Akkus. Längeres Überschreiten dieser Spannung führt zur Schädigung: Der Akku wird warm und fängt an zu gasen.¹⁵ Die Ladeschlußspannung liegt z.B. bei einer NiMH-Zelle bei 1,55 V.¹⁶

C-Rate

Die C-Rate ist ein Maß für Größe des Stromes, der bei den Lade- und Entladevorgängen fließt. Der Strom wird dazu in Relation zur Kapazität des Akkus gesetzt:

¹⁴ vgl. Fluch, 2008, Seite 17 und 18

¹⁵ vgl. SRT, 2000, Band 1, Seite 57 und 58

¹⁶ vgl. Hanus, 2008, Seite 86

$$C - \text{Rate} = \frac{\text{Strom}}{\text{Kapazität}} \quad (\text{Formel 7.6})$$

Beispiel: Ein Akku mit der Kapazität von 700 mAh wird mit 70 mA geladen. Wie hoch ist die C-Rate?

Lösung:

$$C - \text{Rate} = \frac{70 \text{ mA}}{700 \text{ mAh}} = 0,1$$

7.2.7. Laden von Akkus

Normalladung

Hier wird der Akku mit einer C-Rate von 0,1 über einen Zeitraum von 10 bis 16 Stunden geladen. Die Normalladung ist für jeden Akkutyp anwendbar, eine Überschreitung der Ladezeit um mehrere Stunden ist dabei unproblematisch.

Beschleunigtes Laden

Ladestrom mit einer C-Rate von ca. 0,3 bis 0,5 über drei bis fünf Stunden. Der Ladezustand muss ständig überwacht werden, um Schädigungen durch Überladen zu vermeiden.

Schnellladen

Ladeströme mit einer C-Rate = 1 über ca. 30 Minuten. Die Ladezeit darf nicht überschritten werden, sonst wird der Akku zerstört. Daher ist das Schnellladen nur für speziell ausgelegte Akkutypen geeignet, die entsprechend gekennzeichnet sind.

Erhaltungsladung

Hier wird der Akku bei einer C-Rate von 1/20 bis 1/30 auf voller Kapazität gehalten. Zur Vermeidung des Memory-Effekts erfolgt die Erhaltungsladung durch kurze Stromimpulse.

Gute Ladegeräte...

... haben eine Timerfunktion, oder besser eine Logikschaltung zur Auswertung des Ladezustandes für jeden Akku.

... passen den Ladestrom individuell für jeden Akku an.

... entladen den Akku bis zur Entladeschlussspannung vor einem erneuten Ladezyklus.

... haben eine Schaltung zur Erhaltungsladung.¹⁷

¹⁷ vgl. SRT, 2000, Band 1, Seite 59 und 60

7.3. Übungsaufgaben

Aufgabe 1:

Ein Akku mit einer Kapazität von 800 mAh, wird mit einer Laderate C/10 aufgeladen. Welcher Ladestrom fließt? Um welche Ladungsart handelt es sich dabei?

Aufgabe 2:

Warum lassen sich Batterien nicht aufladen?

Aufgabe 3:

Warum sollte man Batterie- oder Akku-Sätze immer komplett tauschen?

Aufgabe 4:

Die Klemmspannung einer 9V-Blockbatterie Batterie geht von 9,57 V auf 9,18 V zurück, wenn ein Verbraucher angeschlossen wird, der 22 mA Strom aufnimmt (Gitarren Bodeneffektgerät). Wie hoch ist der Innenwiderstand der Batterie?

Nach 5 Stunden im Betrieb hat die gleiche Batterie eine gemessene Klemmspannung von 8,03 V mit angeschlossenem Effektgerät und im Leerlauf 8,73 V. Wie hoch ist jetzt der Innenwiderstand der Batterie?

Wie erklärst Du die verschiedenen Innenwiderstände?

Aufgabe 5:

Bis vor wenigen Jahren wurden die großen Theatermischpulte des englischen Herstellers Cadac mit stabilisierten Netzteilen ausgeliefert. Inzwischen werden ausschließlich Schaltnetzteile verkauft. Was ist der Grund dafür?

Aufgabe 6:

Für einen Funkmikrofon-Taschensender wird in der Bedienungsanleitung eine Stromaufnahme von 250 mA angegeben. Der Sender wird mit einem Akku Typ AA mit einer Kapazität von 1500 mAh betrieben. Wie lange ist die theoretische Betriebsdauer des Senders?



Literaturtipps:

SRT: Ausbildungshandbuch audiovisuelle Medienberufe, Band 1.

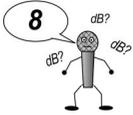
(Kapitel „Stromversorgung von Geräten“)

Heidelberg: Hüthig Verlag.

Hanus, Bo: Akkus und Batterien richtig pflegen und laden.

Poing: Franzis Verlag.

8. Der Pegel



Im Lehrplan wird der Begriff „Pegel“ erst im zweiten Lehrjahr erwähnt. Allerdings sollte dieses Thema schon im ersten Lehrjahr unterrichtet werden, da es hier um absolutes Grundlagenwissen handelt.

Was ist ein Pegel?

Ein Pegel ist das logarithmische Verhältnis von einem gemessenen Wert zu einem Bezugswert. Das führt gleich zur nächsten Frage:

8.1. Was ist ein Logarithmus?

Das Tonhöhen- und Lautstärkeempfinden des Menschen erfolgt in Verhältnissen, wie wir schon in den ersten beiden Kapiteln gesehen haben. Konstante Reizverhältnisse entsprechen also einer konstanten Reizerhöhung (Weber-Fechner'sches Gesetz). Die Empfindungsgrößen sind dabei nicht linear, sondern folgen einer logarithmischen Funktion, bei der gleiche Zahlenverhältnisse gleiche Abstände auf der Skala haben (Abb. 8.1).¹

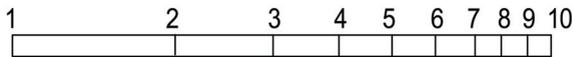


Abb. 8.1: logarithmische Skala

Allgemeine Definition eines Logarithmus

Mathematische Funktion:

$$x = \log_a b \quad \text{wenn} \quad a^x = b \quad (\text{Formel 8.1})$$

a ist die Basis, x ist der Exponent (die Hochzahl) und b ist das „Ergebnis“ der Berechnung.

Zehnerlogarithmus (Dekadischer Logarithmus)

Die Basis ist hier die Zahl 10. Schreibweise: \log_{10} oder einfach nur \lg .

$$x = \lg b \quad \text{wenn} \quad 10^x = b \quad (\text{Formel 8.2})$$

¹ vgl. Görne, 2007, Seite 25

Natürlicher Logarithmus

Hier ist die Basis die eulersche Konstante² $e \approx 2,71828\dots$

Schreibweise: \log_e oder abgekürzt \ln .

$$x = \ln b \quad \text{wenn} \quad e^x = b \quad (\text{Formel 8.3})$$

Umrechnung dekadischer in natürlichen Logarithmus³

$$\ln x = 2,303 * \lg x \quad (\text{Formel 8.4})$$

Einige Rechenregeln für Logarithmen⁴

$$\lg a + \lg b = \lg (a * b) \quad (\text{Formel 8.5})$$

$$\lg a - \lg b = \lg \frac{a}{b} \quad (\text{Formel 8.6})$$

$$b * \lg a = \lg a^b \quad (\text{Formel 8.7})$$

8.2. Relative Pegel

Vorüberlegung: Ist ein Verstärker mit der doppelten Leistung [W] auch doppelt so laut?

Beispiel: Ein Gitarrenverstärker mit 100 Watt im Vergleich zu einem mit 50 Watt elektrischer Leistung.

$$\frac{P_2}{P_1} = \frac{100 \text{ W}}{50 \text{ W}} = \text{Verhältnis von } 2 : 1 \quad (\text{Formel 8.8})$$

$$\lg \frac{2}{1} = 0,30103 \text{ Bel} \quad (\text{Formel 8.9})$$

Erst ein logarithmisches Verhältnis, welches als Ergebnis 1 Bel ergibt, bedeutet eine Lautstärkeverdoppelung.⁵ Bezogen auf das Beispiel mit den Gitarrenverstärkern bedeutet dies, dass erst eine Ausgangsleistung von 500 Watt doppelt so laut wahrgenommen wird.

$$\lg \frac{500 \text{ W}}{50 \text{ W}} = 1 \text{ Bel} \quad (\text{Formel 8.10})$$

² Leonard Euler (1707 – 1783)

³ vgl. Meyer-Schwarzenberger, 1976, Pegel A, Seite 11

⁴ vgl. Görne, 2007, Seite 18

⁵ Benennung der Einheit zu Ehren von Graham Bell (1847 – 1922)

Die Einheit [Bel] ist für allerdings noch zu grob und wird daher noch weiter in Zehntel unterteilt. Um also von [Bel] auf das Dezibel [dB] zu kommen, wird die Gleichung mit 10 multipliziert (1 Bel = 10 Dezibel):

$$10 \lg \frac{500 \text{ W}}{50 \text{ W}} = 10 \text{ dB} \quad (\text{Formel 8.11})$$

Das Ergebnis der Berechnung ist ein Pegel, genauer gesagt ein relativer Leistungspegel.

8.2.1. Relativer Leistungspegel L

Definition des relativen Leistungspegels:

$$L = 10 \lg \frac{P_2}{P_1} \quad (\text{Formel 8.12})$$

Einheit [dB_R]

Zur Kennzeichnung von relativen Pegelangaben wird der Index „R“ an die Einheit [dB] angehängt = [dB_R]. Ein positives Vorzeichen bedeutet eine Verstärkung (z.B. +10 dB_R), ein negativer Wert ist eine Dämpfung (z.B. -24 dB_R). Eine Verdoppelung der Leistung entspricht einer Pegelzunahme von +3 dB_R.

8.2.2. Relativer Spannungspegel L_U

Mathematische Ableitung des Spannungspegels:

A: Das ohmsche Gesetz

Spannung [V] = Stromstärke [A] * Widerstand [Ω]

$$U = R * I$$

$$\text{Umformen zu: } I = \frac{U}{R} \quad (\text{Formel 8.13})$$

B: Die elektrische Leistung

Leistung [W] = Spannung [V] * Stromstärke [A]

$$P = U * I$$

Ersetzen von I durch das ohmsche Gesetz aus Formel 8.13:

$$P = \frac{U * U}{R} = \frac{U^2}{R} \quad (\text{Formel 8.14})$$

C: Der relative Leistungspegel

Leistung P ersetzen durch das Ergebnis von Formel 8.14:

$$L = 10 \lg \frac{P_2}{P_1} = 10 \lg \left(\frac{\frac{U_2^2}{R_2}}{\frac{U_1^2}{R_1}} \right) \quad (\text{Formel 8.15})$$

Leistungsanpassung: Widerstände R_1 und R_2 haben den gleichen Wert

→ Herauskürzen von R

D: Der relative Spannungspegel

$$L_U = 10 \lg \frac{U_2^2}{U_1^2} \quad (\text{Formel 8.16})$$

Diese Gleichung wird noch umgeformt zu:

$$L_U = 20 \lg \frac{U_2}{U_1} \quad (\text{Formel 8.17})$$

Einheit [dB_R]

8.3. Absolute Pegel

Bei absoluten Pegeln gibt es einen festen Bezugswert. Beim absoluten Schalldruckpegel ist dies zum Beispiel der Bezugsschalldruck von 0,00002 Pa. Beim absoluten Spannungspegel ist der Bezugswert eine Referenzspannung.

8.3.1. Absoluter Spannungspegel p_U

$$p_U = 20 \lg \frac{U}{U_0} \quad (\text{Formel 8.18})$$

Beim absoluten Spannungspegel ist U_0 bekannt bzw. festgelegt:

$$U_0 = 0,775 \text{ V}$$

Damit lautet die vollständige Formel:

$$p_U = 20 \lg \frac{U}{0,775 \text{ V}} \quad (\text{Formel 8.19})$$

Einheit [dB_U]

Zur Kennzeichnung des absoluten Spannungspegels wird der Index „U“ an die Einheit [dB] angehängt = [dB_U].

Berechnung von U_0

U_0 leitet sich aus dem absoluten Leistungspegel P_L ab, bei welchem an einem Widerstand mit 600Ω eine Bezugsleistung von 1 mW gemessen wird:

$$P_L = 10 \lg \frac{P}{1 \text{ mW}} \quad (\text{Formel 8.20})$$

Einheit [dB_m].

Durch Umformen der Gleichung...

$$P = \frac{U^2}{R} \quad (\text{Formel 8.21})$$

...und einsetzen der Werte 600Ω und 1 mW , ergibt sich die Spannung U_0 :

$$U^2 = P * R$$

$$U = \sqrt{P * R}$$

$$U = \sqrt{0,001 \text{ W} * 600 \Omega}$$

$$U_0 = 0,775 \text{ V}$$

Tabelle 8.1 listet einige absolute Spannungspegel, die dazugehörigen Verstärkungsfaktoren und Spannungen auf.

Tabelle 8.1: Spannungspegel, Verstärkungsfaktoren und Spannungen

Absoluter Spannungspegel [dB _U]	Verstärkungsfaktor	Spannung [V]
+20	10	7,75
+18	8	6,2
+12	4	3,1
+9 ↑	2,8	2,17
+6 ↑	2	1,55
+3 Verstärkung ↑	1,4	1,085
0	1	0,775
-3 Dämpfung ↓	0,7	0,5425
-6 ↓	0,5	0,3875
-9 ↓	0,355	0,27125
-12	0,25	0,19375
-18	0,13	0,10075
-20	0,1	0,0775
-40	0,01	0,00775
-60	0,001	0,000775
-80	0,0001	0,0000775
-100	0,00001	0,00000775

Andere Schreibweise im amerikanischen Bereich:

Für den absoluten Spannungspegel ist auch die amerikanische Schreibweise mit dem Index (klein) „v“ üblich = $[dB_v]$.

Andere Referenzspannung für U_0 :

Viele japanische Hersteller von Audiogeräten vor allem für Homerecording benutzen als Referenzspannung $U_0 = 1 \text{ V}$. Als Schreibweise hat sich dafür das $[dB_v]$ etabliert mit dem Index (groß) „V“.

8.3.2. Normpegel

Wenn ein VU-Meter⁶ (Abb. 8.2) einen Vollausssteuerungspegel von 0 VU anzeigt, dann kann dies je nach verwendeter Bezugsspannung einen anderen absoluten Spannungspegel bedeuten:

- 0 VU bei Studiopegel (USA) = 1,23 V = +4 dB_v
- 0 VU bei Rundfunknormpegel (Deutschland) = 1,55 V = +6 dB_U
- 0 VU bei Homerecording-Pegel (Japan) = 0,316 V = -10 dB_v

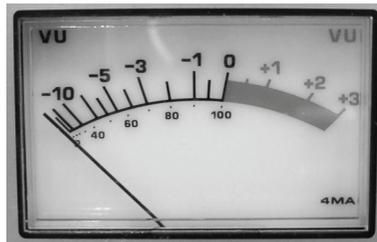


Abb. 8.2: VU-Meter

Der Rundfunknormpegel p

Pegelangaben werden beim Rundfunk als absoluter Spannungspegel angegeben. 0 dB Vollausssteuerung bzw. 100% am Pegelmessgerät entsprechen einer Spannung von 1,55 V und damit einem absoluten Pegel von +6 dB_u. Die Definition des Rundfunknormpegels ist also:

$$p = 20 \lg \frac{U}{1,55V} \quad (\text{Formel 8.22})$$

Einheit $[dB_U]$

Umrechnung vom absoluten Spannungspegel p_u in Rundfunknormpegel p:

$$p = p_u - 6 \text{ dB} \quad (\text{Formel 8.23})$$

⁶ VU = (engl.): Volume Unit

8.4. Aussteuerung

8.4.1. Peak Program Meter (PPM)

Neben dem schon erwähnten VU-Meter wird zur Anzeige von Pegeln vor allem das Peak Program Meter verwendet. Wie der Name schon sagt, werden hier die Spitzenpegel angezeigt. Die Anstiegszeit der Anzeige beträgt 5 ms und die Rücklaufzeit 1,5 s pro 20 dB. Damit ist das PPM 30-mal schneller als der Zeiger eines VU-Meters, das 300 ms benötigt, um vom Linksanschlag auf 99% Vollausschlag zu kommen.

Die DIN-Skala eines PPM reicht von -50 dB bis +5 dB. 0 dB entsprechen dabei 1,55 V. Es gibt aber auch Peak Program Meter mit der Nordic-Skala, hier sind 0 dB auf der Anzeige mit 0,775 V gleichzusetzen. Die British-Skala hat ebenfalls die Bezugsspannung von 0,775 V, allerdings ist hier dieser Wert einfach nur mit der Ziffer „6“ beschriftet (Abb. 8.3).⁷

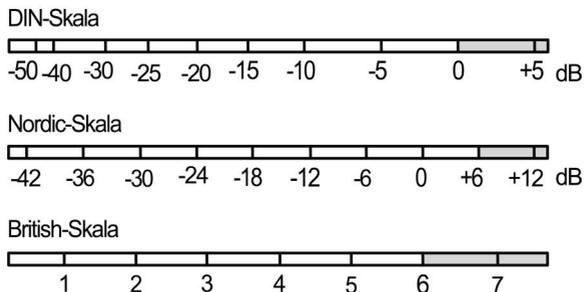


Abb. 8.3: Vergleich verschiedener Skalen zur Aussteuerung

8.4.2. Pegel bei Tonbandaufnahmen

Tonbandaufnahmen gehören eigentlich schon fast der Vergangenheit an und sind i.d.R. kein Thema für Veranstaltungstechniker; Allerdings ist es hilfreich, einige Grundlagen zu kennen, da die Angaben zur Aussteuerung ursprünglich auf Spannungspiegel bei Tonbandaufzeichnungen bezogen wurden.

Hersteller von Tonbandgeräten geben vor, mit welchem optimalen Arbeitspegel das Signal auf das Magnetband aufgezeichnet werden soll. Beispiel 24-Spur-Maschine A800 von Studer: Der Arbeitspegel beträgt hier +6 dB_U bei einem Bandfluss⁸ des Magnetbandes von 520 nWb/m.

Bei Überschreiten dieses Pegels tritt zunehmend eine Bandsättigung auf, d.h. dem aufgezeichneten Signal werden nichtlineare Verzerrungen hinzugefügt, und

⁷ vgl. Brixen, 2001, Seite 93 und 95

⁸ Der Bandfluss Φ ist ein Maß für die Stärke der Magnetisierung

die Pegelspitzen werden komprimiert (Bandkompression). Wenn das Tonband schließlich nicht mehr stärker magnetisiert werden kann, ist die volle Bandsättigung erreicht, und das aufgezeichnete Signal klingt stark verzerrt. Eine leichte Übersteuerung und damit eine gewisse Bandkompression können durchaus erwünscht sein. Oft wird dieser Effekt als der „warme Charakter“ einer analogen Aufnahme beschrieben.

8.4.3. Aussteuerung bei digitalen Aufnahmen

Bei der Analog-zu-Digital-Wandlung gibt es eine absolute Obergrenze für die Aussteuerung. Da ein AD-Wandler nur fest definierte, diskrete Zahlenwerte ausgeben kann, ist die Vollaussteuerung beim der höchsten zu wandelnden Spannung erreicht. Die Vollaussteuerung liegt damit bei 0 dB_{FS} . Der Index „FS“ steht für (engl.:) Full Scale. Bei Überschreitung der Vollaussteuerung kommt es sofort zu heftigen Verzerrungen mit hohem Pegel.

Welcher absoluter Spannungspegel 0 dB_{FS} entspricht, legen die Hersteller von digitalen Wandlern fest; Oft werden zum Beispiel $+24 \text{ dB}_U$ als Referenzwert angegeben. Bei der A/D-Wandlung wird also ein Sicherheitsabstand zur Vollaussteuerung eingehalten, der sog. Headroom (Tabelle 8.2).

Tabelle 8.2: Beispiel Aussteuerung Analog und Digital ($0 \text{ dB}_{\text{FS}}=24 \text{ dB}_U$)⁹

Absoluter Spannungspegel	Digital	Bandfluss	Bemerkung
$+ 24 \text{ dB}_U$	0 dB_{FS}	-	Aussteuerungsgrenze D/A-Wandler
$+ 8 \text{ dB}_U$	$- 16 \text{ dB}_{\text{FS}}$	804 nWb/m	Obere Aussteuerungsgrenze von Bandmaschinen
$+ 6 \text{ dB}_U$	$- 18 \text{ dB}_{\text{FS}}$	520 nWb/m	Arbeitspegel, z.B. der Bandmaschine Studer A800
$+ 4 \text{ dB}_U$	$- 20 \text{ dB}_{\text{FS}}$	507 nWb/m	Studiopegel USA
0 dB_U	$- 24 \text{ dB}_{\text{FS}}$	320 nWb/m	Referenzspannung von $0,775 \text{ V}$

8.5. Rechnen mit Pegeln

8.5.1. Pegel-Umkehrsatz

Bei bekanntem Bezugswert lässt sich ein Pegel wieder in ein Verhältnis Zurückrechnen. Beispiele:

⁹ vgl. Rumsey, 1991, Seite 127

Relativer Leistungspegel

$$L = 10 \lg \frac{P_2}{P_1}$$

$$\text{Umkehrung} \rightarrow \frac{P_2}{P_1} = 10^{\frac{L}{10}} \quad (\text{Formel 8.24})$$

Relativer Spannungspegel

$$L_U = 20 \lg \frac{U_2}{U_1} \quad \text{bzw.} \quad L_U = 10 \lg \frac{U_2^2}{U_1^2}$$

$$\text{Umkehrung} \rightarrow \frac{U_2^2}{U_1^2} = 10^{\frac{L_U}{10}} \quad (\text{Formel 8.25})$$

Absoluter Schalldruckpegel

$$L_p = 20 \lg \frac{p}{p_0} \quad \text{bzw.} \quad L_p = 10 \lg \frac{p^2}{p_0^2}$$

$$\text{Umkehrung} \rightarrow \frac{p^2}{p_0^2} = 10^{\frac{L_p}{10}} \quad (\text{Formel 8.26})$$

8.5.2. Pegeladdition

A: Addition nicht kohärenter Signale

Zur Addition von Schalldruckpegeln mehrerer nicht kohärenter Signale wird folgende Formel verwendet:¹⁰

$$L_{P_{\text{ges}}} = 10 \lg \sum_{i=1}^N 10^{\frac{L_{P_i}}{10}} = 10 \lg \left(10^{\frac{L_{P_1}}{10}} + 10^{\frac{L_{P_2}}{10}} + 10^{\frac{L_{P_3}}{10}} + \dots \right) \quad (\text{Formel 8.27})$$

Beispiel:

Addition von drei Schalldruckpegeln mit $L_{P_1}=70 \text{ dB}_{\text{SPL}}$, $L_{P_2}=73 \text{ dB}_{\text{SPL}}$ und $L_{P_3}=80 \text{ dB}_{\text{SPL}}$

Lösung:

$$L_{P_{\text{ges}}} = 10 \lg (10^{7,0} + 10^{7,3} + 10^{8,0}) = 81 \text{ dB}_{\text{SPL}}$$

¹⁰ vgl. Cremer und Möser, 2003, Seite 283

B: Addition kohärenter Signale

Die Addition von *Schalldrücken* kohärenter Signale erfolgt mit dieser Formel:¹¹

$$L_{p_{\text{ges}}} = 20 \lg \frac{p}{p_0} = 10 \lg \frac{p^2}{p_0^2} = 10 \lg \frac{(p_1 + p_2 + p_3 + \dots)^2}{p_0^2} \quad (\text{Formel 8.28})$$

p_0 : Bezugsschalldruck mit 0,00002 Pa

Beispiel: Bei den im vorherigen Beispiel genannten Schalldruckpegeln handelt es sich jetzt um kohärente Signale. Zuerst müssen die Pegel in Schalldrücke umgerechnet werden:¹² $p_1 = 0,0632$ Pa, $p_2 = 0,0893$ Pa und $p_3 = 0,2$ Pa.

Anschließend erfolgt die Addition der Schalldrücke und die Umrechnung in einen Schalldruckpegel:

$$L_{p_{\text{ges}}} = 10 \lg \frac{(0,0632 + 0,0893 + 0,2)^2}{0,00002^2} = 85 \text{ dB}$$

Die aufgezeigten Formeln lassen sich auch für Spannungspegel anwenden:

Addition von Spannungspegeln bei nicht kohärenten Signalen

$$p_{U_{\text{ges}}} = 10 \lg \sum_{i=1}^N 10^{\frac{p_{U_i}}{10}} = 10 \lg \left(10^{\frac{p_{U_1}}{10}} + 10^{\frac{p_{U_2}}{10}} + 10^{\frac{p_{U_3}}{10}} + \dots \right) \quad (\text{Formel 8.29})$$

Beispiel:

Für $p_{U_1} = p_{U_2} = 0$ dB_U gilt:

$$p_{U_{\text{ges}}} = 10 \lg(10^0 + 10^0) = 10 \lg(1 + 1) = 10 \lg 2 = +3 \text{ dB}_U \quad (\text{Formel 8.30})$$

Addition von Spannungen bei kohärenten Signalen

$$p_{U_{\text{ges}}} = 10 \lg \frac{(U_1 + U_2)^2}{U_0^2} \quad (\text{Formel 8.31})$$

Beispiel:

Für $p_{U_1} = p_{U_2} = 0$ dB_U gilt:

$$p_{U_{\text{ges}}} = 10 \lg \frac{(0,775 + 0,775)^2}{0,775^2} = 10 \lg 4 = +6 \text{ dB}_U \quad (\text{Formel 8.32})$$

Die Frage „Was ergibt 0 dB + 0 dB?“ ist also nur eindeutig zu beantworten, wenn bekannt ist, ob es sich um kohärente oder nicht kohärente Signale handelt.

¹¹ s. Kap. 1.2.3. „Überlagerung von Schwingungen“

¹² s. Kap. 2.1.1. „Absoluter Schalldruckpegel L_p “

8.6. Übungsaufgaben

Aufgabe 1:

Ein Tonpult arbeitet mit Rundfunknormpegel. Welche Ausgangsspannung liefert es bei 100% Aussteuerung?

Aufgabe 2: (Frage bei der Abschlussprüfung Sommer 2001 der IHK Erfurt)

Eine Verstärkung um 6 dB_U entspricht ziemlich genau der Verdopplung einer Wechselspannung. Beweise das anhand der gegebenen Formel:

$$p_U = 20 \lg \frac{U}{U_0}$$

$[\text{dB}_U]$

Aufgabe 3:

Zwei nicht kohärente Signale mit einem absoluten Spannungspegel von 0 dB_U werden in einem Mischpult zusammengemischt. Wie groß ist der resultierende Gesamtpegel?

Aufgabe 4:

Gleiche Aufgabenstellung wie in Aufgabe 3, aber mit kohärenten Signalen.

Aufgabe 5:

Ein Audiosignal, welches auf 0 dB_U angesteuert ist, passiert in einer Signalkette zwei Verstärker, die auf 0 dB eingesellt sind. Wie groß ist der Ausgangspegel am Ende der Signalkette?

Aufgabe 6:

- Wie groß ist die jeweilige Bezugsspannung von $[\text{dB}_U]$ und $[\text{dB}_V]$?
- Um wie viel dB_R ist bei gleicher Spannung das $[\text{dB}_U]$ größer als das $[\text{dB}_V]$?



Literaturtipps:

Brixen, Eddy Bøgh: Audio Metering.
Broadcast Publishing & DK Audio A/S, Dänemark

Friesecke, Andreas: Metering.
Bergkirchen: PPV Medien.

9. Mikrofone



Die theoretischen Grundlagen über Mikrofone sind ein Thema im ersten Lehrjahr. Spätestens im zweiten Lehrjahr ist dann der praktische Einsatz von Mikrofonen vorgesehen.

9.1. Empfängerprinzipien und Richtcharakteristiken

Empfängerprinzip = Auf welche Schallkenngröße reagiert das Mikrofon?

Richtcharakteristiken = Mikrofone sind für Schall aus verschiedenen Richtungen unterschiedlich empfindlich. Zur Veranschaulichung wird die Richtcharakteristik graphisch zweidimensional in einem Polardiagramm dargestellt. In Wirklichkeit muss man sich die Darstellung dreidimensional und rotations-symmetrisch vorstellen. Die Änderung der Empfindlichkeit des Mikrofons für einfallenden Schall ist bezogen auf die Einsprechrichtung bei 0° .

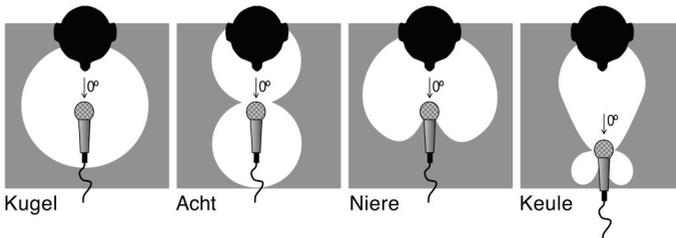


Abb. 9.1: Richtcharakteristiken

Wie wir in Abb. 9.1 sehen können, gibt es verschiedene Richtcharakteristiken. Die Richtwirkung ist abhängig davon, nach welchem Empfängerprinzip ein Mikrofon funktioniert (siehe auch Tabelle 9.1).

Tabelle 9.1: Empfängerprinzipien und deren Richtwirkung

Empfängerprinzip	Richtwirkung	Richtcharakteristik
Druckempfänger	Ungerichtet	Kugel
Druckgradientenempfänger	Gerichtet	Acht und Niere
Interferenzempfänger	Gerichtet	Keule

9.1.1. Druckempfänger

Bei einem Druckempfänger ist nur eine Seite der Membran dem Schallfeld ausgesetzt. Die Rückseite ist dicht abgeschlossen. Zum Ausgleich des Atmosphärendrucks hat die Mikrofonkapsel eine kleine Kapillarbohrung. Die Membran spricht auf alle Schalldruckänderungen an, egal aus welcher Richtung die Schallwellen eintreffen. Ein Druckempfänger besitzt daher keine Richtwirkung und hat eine kugelförmige Richtcharakteristik (Abb. 9.2).

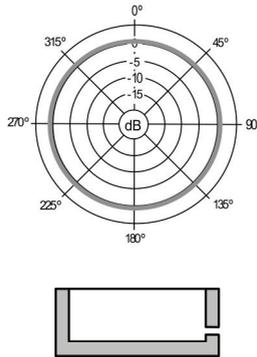


Abb. 9.2: Druckempfänger

Diese Kugelcharakteristik erfährt allerdings durch drei Phänomene eine Abweichung von ihrer idealen Form und nähert sich mit zunehmender Frequenz einer Nierencharakteristik:

1. Abschattung. Der rückwärtige oder von der Seite auf die Membran treffende Schall wird nur dann um die Mikrofonkapsel gebeugt, wenn die Wellenlänge groß im Verhältnis zur Kapselgröße ist. Umgekehrt bedeutet dies, dass Schall hoher Frequenzen abgeschattet werden. Schall direkt von Vorne trifft dagegen immer ungehindert auf die Membran, unabhängig von der Wellenlänge.
2. Druckstau. Trifft Schall frontal auf die Mikrofonkapsel, so kommt es zum Druckstau für Wellenlängen, die kleiner sind als der Membrandurchmesser. Der einfallende und reflektierte Schall hoher Frequenz überlagert sich gleichphasig. Vor der Membran eines Druckempfängers kommt es daher zu einer natürlichen Höhenanhebung von +6 dB.¹
3. Interferenzen. Ist die Wellenlänge des Schalls in der Größenordnung des Membrandurchmessers, so treffen senkrecht von vorne kommende Schallwellen gleichphasig auf. Schräg ankommende Schallwellen treffen allerdings nicht gleichzeitig, sondern mit unterschiedlichen Phasenlagen auf. Dadurch resultiert eine Aufhebung der Membranauslenkung durch Phasenauslöschungen.²

¹ vgl. Görne, 2007, Seite 19 und Sengpiel, 2008b, PDF-Dokument: Mikrofone im Kugelschallfeld

² vgl. Dickreiter, 1995, Seite 82

Freifeld- und Diffusfeldentzerrung

Wenn Druckempfänger nahe einer Schallquelle im Direktschall, d.h. im Freifeld positioniert werden sollen, dann können Mikrofone mit einer Freifeldentzerrung zur Anwendung kommen. Das bedeutet, dass hier der Druckstau-Effekt durch akustische oder elektronische Filter ausgeglichen wird. Druckempfänger ohne entsprechende Vorrichtungen heißen diffusfeldentzerrte Mikrofone und werden demnach in einiger Entfernung zur Schallquelle aufgestellt.³ Gegen diese „Regel“ kann allerdings auch verstoßen werden, und so werden manchmal diffusfeldentzerrte Mikrofone im Nahbereich einer Schallquelle eingesetzt. Die sich ergebende Höhenanhebung wird dann als Mittel der Klanggestaltung genutzt.⁴

9.1.2. Druckgradientenempfänger

Druckgradientenempfänger werden manchmal auch als Druckdifferenzempfänger bezeichnet, was gut deren Funktionsprinzip beschreibt. Die Membran ist dem Schallwellenfeld mit beiden Seiten ausgesetzt und das Druckgefälle zwischen Vorder- und Rückseite lenkt die Membran aus.⁵ Die Richtcharakteristik eines idealen Druckgradientenempfängers hat die Form einer Acht (Abb. 9.3).

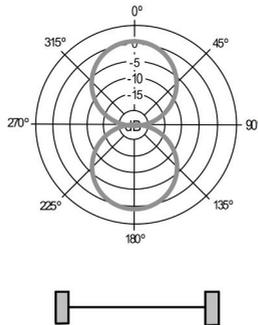


Abb. 9.3: Druckgradientenempfänger

Durch akustische Laufzeitglieder, also zusätzliche Umwege für den Schall innerhalb des Mikrofons, lässt sich die Richtwirkungen einer Niere konstruieren (Abb. 9.4).⁶

³ vgl. Görne, 2007, Seite 39

⁴ vgl. Görne, 2007, Seite 71

⁵ vgl. Görne, 2007, Seite 35

⁶ Laufzeitglieder sind phasendrehende akustische Filter; vgl. Görne, 2007, Seite 36

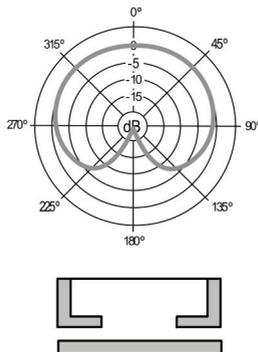


Abb. 9.4: Druckgradientenempfänger mit Laufzeitglied

Frequenzabhängigkeit der Membranauslenkung

Der Umweg von der Vorder- zur Rückseite der Membran kann nicht unendlich klein sein. Maximal ausgelenkt wird die Membran dann, wenn der Weg zwischen Membranvorderseite und -rückseite eine halbe Wellenlänge beträgt bzw. die Phasendifferenz 180° ist. Bei größeren Phasendifferenzen wird die Auslenkung wieder geringer. Ist die Wegstrecke für den Schall in der Größenordnung einer Wellenlänge, dann kann es sein, dass die Phasen- und Druckdifferenz gleich Null ist.

Um eine Membranauslenkung zu erhalten, die von der tiefsten bis zur höchsten zu übertragenden Frequenz stetig zunimmt, wird die mittlere Wegstrecke durch die Konstruktion der Mikrofonkapsel so festgelegt, dass sie etwa der halben Wellenlänge der höchsten zu übertragenden Frequenz entspricht. Die obere Grenzfrequenz von Druckgradienten liegt in der Praxis bei ca. 8 bis 16 kHz.⁷

Frequenzabhängigkeit der Richtcharakteristik

Durch Abschattung und Interferenzen, wie sie schon für den Druckempfänger beschrieben wurden, tendiert die Richtcharakteristik einer Niere zu hohen Frequenzen hin mehr zu einer Acht, zu tiefen Frequenzen zu einer Kugel. Der Druckstau spielt bei Druckgradientenempfängern keine Rolle.⁸

Nahbesprechungseffekt bei Druckgradientenempfängern

Befindet sich ein Druckgradientenempfänger in einem geringen Abstand zu einer Schallquelle (z.B. weniger als 30 cm), dann werden die tiefen Frequenzanteile des Schalls mit einem größerem Pegel erfasst. Diese Erscheinung heißt Nahbesprechungseffekt.

⁷ vgl. Henle, 1993, Seite 119 und Görne, 2007, Seite 55

⁸ vgl. Görne, 2007, Seite 38 und 39

Ein oft geäußelter Erklärungsansatz für das Zustandekommen des Nahbesprechungseffektes zielt darauf ab, einen Druckgradientenempfänger als Schallschnelleempfänger zu sehen. Die Schnelle steigt im Nahfeld einer Schallquelle im Vergleich zum Schalldruck überproportional an, und das frequenzabhängig, d.h. das Nahfeld ist bei tiefen Frequenzen weiter um die Schallquelle herum ausgedehnt als bei höheren Frequenzen.⁹ Wie dieser Zusammenhang aber letztlich den Nahbesprechungseffekt erklären kann, erschließt sich allerdings aus keiner Audio-Fachpublikation im Detail. Es finden sich zum Teil widersprüchliche Angaben, daher sind im Anhang einige Aussagen zum Nahbesprechungseffekt aufgeführt.

Für ein Nierenmikrofon lässt sich die Anhebung der tiefen Frequenzen im Vergleich zu einem Mikrofon mit Kugelcharakteristik mit folgender Formel berechnen:¹⁰

$$\frac{U_{\text{Niere}}}{U_{\text{Kugel}}} = \sqrt{1 + \frac{\lambda^2}{16\pi^2 r^2}} \quad (\text{Formel 9.1})$$

U_{Niere} : Ausgangsspannung des Nierenmikrofons bei 0° Einsprechrichtung [V]

U_{Kugel} : Ausgangsspannung des Kugelmikrofons bei 0° Einsprechrichtung [V]

r : Abstand von einer Punktschallquelle [m]

λ : Wellenlänge [m]

Bei Mikrofonen mit Achtercharakteristik setzt der Nahbesprechungseffekt ungefähr eine Oktave höher ein, wie die Abb. 9.5 zeigt.¹¹

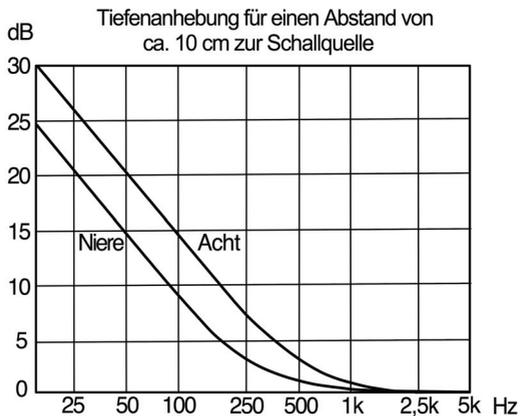


Abb. 9.5: Nahbesprechungseffekt bei Niere und Acht¹²

⁹ s. Kap. 2.2. „Schallschnelle v“

¹⁰ vgl. Boré und Peus, 1999, Seite 18

¹¹ vgl. Boré und Peus, 1999, Seite 18

Sänger und Sängerinnen machen sich wenig Gedanken darüber, wie der Nahbesprechungseffekt physikalisch zustande kommt, sondern nutzen ihn intuitiv als Mittel der Klanggestaltung. Das Volumen der Stimme kann durch die Variation des Mikrofonabstandes gezielt beeinflusst werden.

Vergleich von Druckgradienten-Charakteristiken

In Tabelle 9.2 sind von verschiedenen idealen Richtcharakteristiken die Pegelabschwächungen für die Schalleinfallswinkel 0° , 90° und 180° aufgeführt (siehe auch Abb. 9.6).

Tabelle 9.2: Pegelabschwächung bei Nieren- und Acht-Charakteristiken¹³

Schalleinfallswinkel	Breite Niere	Niere	Superniere	Hypernieren	Acht
0°	0 dB	0 dB	0 dB	0 dB	0 dB
90°	-2,5 bis -3,5 dB	-6 dB	-8,7 dB	-12 dB	$-\infty$ dB
180°	-6 bis -10 dB	$-\infty$ dB	-11,5 dB	-6 dB	0 dB

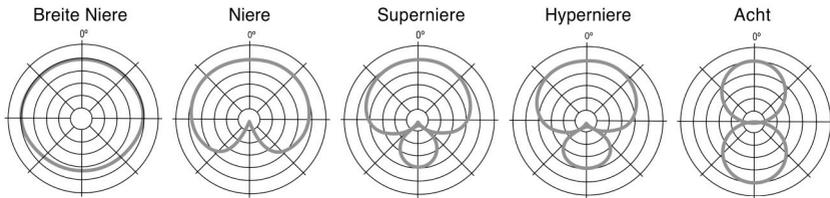


Abb. 9.6: Druckgradienten-Charakteristiken

9.1.3. Interferenzempfänger

Zur weiteren Verbesserung der Richtwirkung können Mikrofone mit einem Richtrohr versehen werden. Durch die Bauweise des Richtrohrs überlagern sich Schallwellen, die von der Seite eintreffen, ganz oder teilweise gegenphasig und löschen sich aus. Diese Erscheinung nennt man destruktive Interferenz. Schallwellen, die direkt von Vorne kommt, überlagern sich dagegen gleichphasig und erfahren aufgrund einer konstruktiven Interferenz eine Verstärkung. Die Charakteristik des Interferenzempfängers entspricht einer Keule (Abb. 9.7), ist aber wie alle anderen Richtcharakteristiken frequenzabhängig. Die Wellenlänge der tiefsten Frequenz, die noch gebündelt wird, entspricht etwa der Länge des Rohres, und dieses kann zwischen 10 bis 40 cm lang sein. Eine Länge von 10 cm entspräche einer Grenzfrequenz von ca. 3440 Hz, bei 40 cm reicht die Richtwirkung schon bis ca. 860 Hz herunter. Unterhalb der Grenzfrequenz hat das

¹² vgl. Boré und Peus, 1999, Seite 16 und Zollner und Zwicker, 2003, Seite 69

¹³ vgl. Boré und Peus, 1999, Seite 18

Mikrofon dann die Richtwirkung des jeweiligen verwendeten Empfängerprinzips (z.B. Kugel bei Druckempfänger oder Niere bei Druckgradientenempfänger).¹⁴

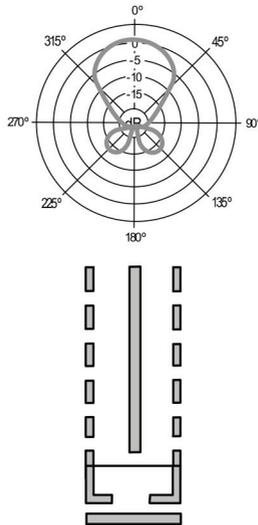


Abb. 9.7: Interferenzempfänger

Druckgradienten- und Interferenzempfänger reagieren empfindlich auf Wind und Luftbewegungen, wie sie durch das Sprechen oder Singen hervorgerufen werden. Die Folge sind tieffrequente Störgeräusche: Ein tiefes Rumpeln bei Wind bzw. Plosivlauten der menschlichen Stimme, vor allem „p“ und „t“. Eine mit Gaze ausgekleidete Draht- oder Blechkonstruktion schützt daher die Mikrofonkapsel vor Wind- und Popgeräuschen.¹⁵ Weitere Hilfsmittel, wenn dies nicht ausreichen sollte: Ein Popschutz-Schirm, Schaumstoff-Windschutz oder Windschutzkorb, letzterer eventuell auch mit Fellüberzug. Meist muss auch ein Hochpassfilter verwendet werden, der das tieffrequente Rumpeln bedämpft.¹⁶

9.2. Wandlerprinzipien

Wandlerprinzip = Wie wird die Schwingung der Luftteilchen in eine elektrische Schwingung umgewandelt?

¹⁴ vgl. Görne, 2007, Seite 84

¹⁵ vgl. Görne, 2007, Seite 42

¹⁶ vgl. Görne, 2007, Seite 144ff

9.2.1. Kohlemikrofon

Das Kohlemikrofon ist das älteste Wandlerprinzip. Die Kapsel des Kohlemikrofons steht unter Gleichspannung. Wird die Membran durch Schall in Schwingung versetzt, dann werden die Kohlekörner in der Kapsel mehr oder weniger fest aneinander gedrückt und dadurch ändert sich der Innenwiderstand. Analog zu den sich ständig wechselnden Widerstandsänderungen wird damit dem Gleichstrom ein Sprechwechselstrom überlagert. Ein Übertrager trennt schließlich die Gleichspannung und Wechselspannung (Abb. 9.8).¹⁷

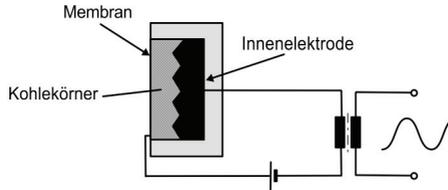


Abb. 9.8: Kohlemikrofon

$$\Delta U \sim \Delta R \quad (\text{Formel 9.2})$$

ΔU : Spannungsänderung

ΔR : Änderung des ohmschen Widerstandes

Die Proportionalität der Ausgangsspannung zum ohmschen Widerstand gilt allerdings nicht für den ganzen Frequenzbereich. Zudem erzeugen die Körner des Kohlegranulats bei der Verschiebung kleine Pegelspitzen im Ausgangssignal. Deswegen haben Kohlemikrofone einen sehr hohen Klirrfaktor von ca. 10 bis 40%.¹⁸ Ein weiterer Nachteil ist das große Eigenrauschen. Allerdings ist der prinzipielle Aufbau und damit die Herstellung eines Kohlemikrofons sehr einfach und damit kostengünstig. Abb. 9.9 zeigt ein Kohlemikrofon aus der Anfangszeit der elektronischen Tonübertragung, als es noch keine anderen Wandlerprinzipien gab (vor ca. 1924).¹⁹

¹⁷ vgl. Zastrow, 1984, Seite 55

¹⁸ vgl. Görne, 2007, Seite 51

¹⁹ vgl. Görne, 2007, Seite 45;

Im Jahr 1924 gab es die ersten Bändchenmikrofone und ab 1928 Kondensatormikrofone

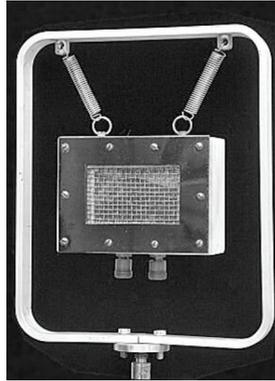


Abb. 9.9: Kohlemikrofon

Bildquelle: Dieter Schöpf, <http://www.ds-audioservice.de>

9.2.2. Dynamische Mikrofone

Die Funktionsweise eines dynamischen Mikrofons beruht auf dem Induktionsgesetz. Demnach wird in einem elektrischen Leiter, der sich in einem Magnetfeld bewegt, eine Spannung induziert (Elektrodynamisches Prinzip). Dieser Leiter kann die Mikrofonmembran selber sein wie beim Bändchenmikrofon, oder aber eine Schwingspule, welche an einer Membran befestigt ist wie beim Tauchspulenmikrofon.

9.2.2.1. Bändchenmikrofon

Das Bändchen im Magnetfeld ist nur wenige Millimeter breit und einige Zentimeter lang. Abb. 9.10: Das geriffelte Bändchen befindet sich hier unter einer durchsichtigen Schutzabdeckung.

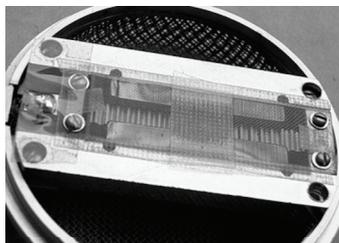


Abb. 9.10: Kapsel eines Bändchenmikrofons

Bildquelle: Musikhaus Thomann, <http://www.thomann.de>

Als relativ kurzer elektrischer Leiter hat das Bändchen eine geringe Impedanz und daher ist ein Ausgangsübertrager notwendig, der die Impedanz auf die geforderten 200 Ω herauftransformiert (Abb. 9.11).²⁰

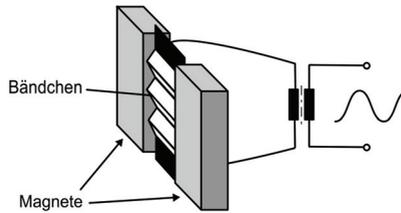


Abb. 9.11: Bändchenmikrofon

Ableitung der Ausgangsspannung:

$$U_q = B \cdot l \cdot v \quad (\text{Formel 9.3})$$

U_q : Induzierte Wechselspannung [V]

B : Magnetische Flussdichte in [T]

l : Länge des Bändchens in [m]

v : Geschwindigkeit in [m/s]

Bändchenmikrofone besitzen allgemein einen sehr linearen Frequenzgang, daneben sorgt die leichte Membran für ein gutes Impulsverhalten. Allerdings reagiert das Bändchen empfindlich auf Wind (daher die Schutzabdeckung), Erschütterungen und schnelle Bewegungen.

9.2.2.2. Tauchspulenmikrofon

Eine Spule ist aufgrund der vielen Wicklungen ein sehr viel längerer Leiter im Vergleich zu einem Bändchen. Und je länger der Leiter in einem Magnetfeld ist, bzw. je mehr Windungen die Spule hat, desto größer ist die Ausgangsspannung:

$$U_q = -N \cdot \frac{\Delta\Phi}{\Delta t} \quad (\text{Formel 9.4})$$

U_q : Induzierte Wechselspannung [V]

N : Windungen der Spule

$\Delta\Phi$: Magnetische Flussänderung [Wb]

Δt : Zeit [s]

²⁰ vgl. Boré und Peus, 1999, Seite 28; s. Kap. 11., „Anpassung und Audioleitungen“

Die Schwingspule eines Tauchspulenmikrofons ist an eine Kunststoffmembran geklebt und kann sich frei im Magnetfeld eines Permanentmagneten bewegen (Abb. 9.12 und 9.13).

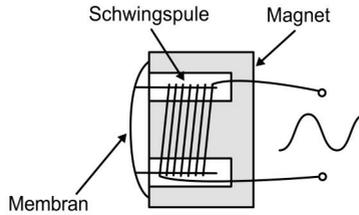


Abb. 9.12: Tauchspulenmikrofon



Abb. 9.13: Kapsel eines Tauchspulenmikrofons (Shure SM57)

Im Vergleich zu einem Bändchen- oder Kondensatormikrofon ist der Frequenzgang eines Tauchspulenmikrofons nicht besonders linear. Auch das Impulsverhalten ist nicht so gut (Abb.9.14). Im Gegensatz zum Bändchenmikrofon wird kein Übertrager für die richtige Ausgangsimpedanz benötigt.

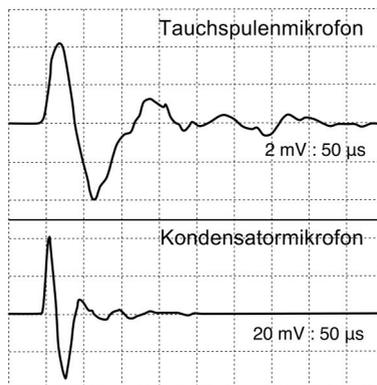


Abb. 9.14: Impulsverhalten von Tauchspulen- und Kondensatormikrofonen
Bildquelle: Borè und Peus, 1999, Seite 66

Aufwendig sind beim Tauchspulenmikrofon die Maßnahmen, den Frequenzgang im gesamten Übertragungsbereich einigermaßen linear zu halten. Dazu muss der Einfluss der Membranmasse auf das Übertragungsverhalten durch zusätzliche Resonanzräume im Mikrofongehäuse kompensiert werden. Die Schwingspule ist anfällig für elektromagnetische Störfelder, wie sie z.B. von Lichtdimmern verursacht werden. Zur Brummkompensation kann eine zweite unbewegte Spule in der Kapsel eingebaut sein, deren Ausgangssignal in der Phase gedreht ist. Störgeräusche löschen sich dann beim Zusammenmischen der Signale der bewegten und unbewegten Spule aus.²¹

Trotz aller messtechnischen Nachteile sind auf der Bühne fast ausschließlich Tauchspulenmikrofone im Einsatz. Denn sie sind robust und arbeiten auch bei extrem hohen Schalldruckpegeln ohne Verzerrungen.

9.2.3. Piezoelektrischer Wandler

Piezoelektrische Wandler nutzen die Eigenschaft bestimmter Kristalle, auf mechanischen Druck mit einer elektrischen Ladungsverschiebung zu reagieren. Die Ladung und damit auch die Ausgangsspannung ist dabei proportional zu der Kraft, die auf die Piezofläche wirkt:²²

$$U \sim Q \sim \frac{F}{A} \quad (\text{Formel 9.5})$$

Q : Elektrische Ladung [C]

F : Kraft [N]

A : Fläche des Piezowandlers [m²]

Ein Nachteil von Piezowandlern ist die Abhängigkeit der Empfindlichkeit und des Frequenzgangs von der Temperatur.²³ Die Anwendung bleibt daher meist auf spezielle Aufgaben beschränkt, z.B. als Tonabnehmer bei Akustikgitarren und Kontrabässen (Abb. 9.15). Es werden auch Mikrofone in Piezotechnik gebaut, die sehr preiswert sind, aber leider schlechte Übertragungseigenschaften haben. Sie werden z.B. als Triggermikrofone zur Ansteuerung von MIDI-Klangerzeugern eingesetzt.²⁴

²¹ vgl. Görne, 2007, Seite 62

²² vgl. Veit, 2005, Seite 97

²³ vgl. Zastrow, 1984, Seite 63

²⁴ s. Kap. 13. „MIDI“



Abb. 9.15: Piezotonabnehmer unter dem Steg eines Kontrabasses

9.2.4. Kondensatormikrofon

Die Membran ist hier die Platte eines Kondensators. Ändert sich durch die Schwingung der Membran der Abstand zur Gegenelektrode, so ändert sich proportional die Kapazität des Kondensators (Elektrostatistisches Prinzip).

Als die Halbleitertechnik noch nicht so weit fortgeschritten war, bzw. es noch keine rauscharmen Feldeffekt-Transistoren (FET) gab, wurden Kondensatormikrofone mit normalen Transistoren in Hochfrequenzschaltungen gebaut. Dabei steuert die Mikrofonmembran die Frequenz oder die Phase eines HF-Oszillators. Eine zusätzliche Demodulatorschaltung liefert dann die Niederfrequenzspannung am Mikrofonausgang. Kondensatormikrofone werden heutzutage hauptsächlich in Niederfrequenzschaltung gebaut, die im Prinzip so aussieht wie in Abb. 9.16 gezeigt. Der Anwender kann von außen nicht erkennen, ob das Kondensatormikrofon in NF- oder HF-Technik gebaut ist.²⁵

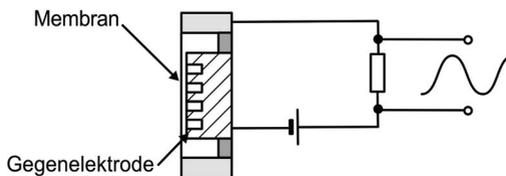


Abb. 9.16: Kondensatormikrofon in Niederfrequenzschaltung

Eine Änderung der Kapazität ruft an einem parallel geschalteten Widerstand eine Spannungsänderung hervor. Herleitung der Ausgangsspannung:

$$U = \frac{Q}{C} \quad (\text{Formel 9.6})$$

²⁵ vgl. Boré und Peus, 1999, Seite 43

und:

$$C = \epsilon_0 * \epsilon_r * \frac{A}{d} \quad (\text{Formel 9.7})$$

U : Ausgangsspannung

Q : Elektrische Ladung

C : Kapazität [pF]

ϵ_0 : Dielektrizitätskonstante (=0,0885 As/Vm)

ϵ_r : Dielektrizitätszahl (in Luft bei 20° C = 1)

A : Plattenfläche [cm²]

d : Plattenabstand [cm]

Die derart erzeugte Spannung kann jedoch nicht auf eine Mikrofonleitung gegeben werden, da der Ausgangswiderstand dieser Schaltung viel zu hoch ist. Ein in das Mikrofongehäuse integrierter Trennverstärker sorgt für die notwendige Impedanzwandlung.²⁶ In Abb. 9.17 sieht man die Elektronik eines geöffneten Kondensatormikrofons.

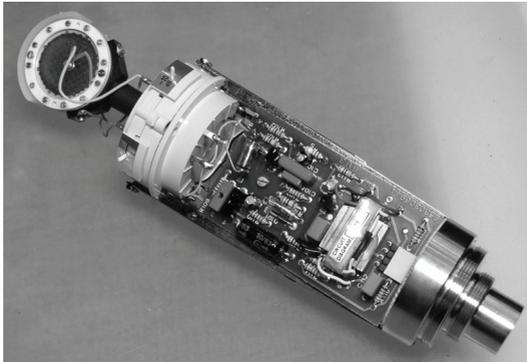


Abb. 9.17: Kondensatormikrofon (Neumann U87)

Ein Kondensatormikrofon benötigt eine Versorgungsspannung, und zwar für die Kapselvorspannung und zum Betrieb des Trennverstärkers. Diese Spannung kann eine eingebaute Batterie liefern oder über eine separate Leitung zugeführt werden. Beides ist jedoch wenig praktikabel. Sind Mikrofonleitungen symmetrisch ausgeführt, so bietet sich die Möglichkeit, über diese Leitung gleichzeitig das Mikrofon mit einer Gleichspannung zu versorgen.

Die heute gebräuchliche Speisart ist daher die Phantomspeisung mit einer Spannung von +48 V auf beiden Adern bezogen auf die Masse (Abb. 9.18). Das

²⁶ Spannungsanpassung: s. Kap. 11. „Anpassung und Audioleitungen“

Wechselstrom-Audiosignal wird durch die Phantomspeisung nicht beeinträchtigt.

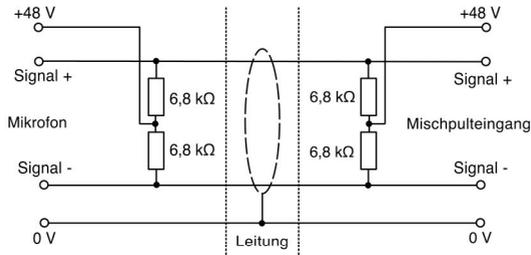


Abb. 9.18: Phantomspeisung (P48)

Die beiden Speisewiderstände haben einen genormten Wert von jeweils $6,8\text{ k}\Omega$ mit einer sehr engen Toleranz von max. $0,4\%$. Der Versorgungsstrom beträgt max. 10 mA , die Versorgungsspannung von 48 V darf um $\pm 4\text{ V}$ schwanken.²⁷

9.2.4.1. Kondensatormikrofon in Elektretbauweise

Durch spezielle Verfahren und geeignete Materialien ist es möglich, die Mikrofonmembran dauerhaft zu polarisieren. Damit kann auf eine externe Vorspannung verzichtet werden. Es ist nur eine Batterie mit niedriger Gleichspannung notwendig, um den Trennverstärker mehrere hundert Stunden lang zu betreiben. Elektretmikrofone sind somit eine Alternative, wenn keine Phantomspeisung zur Verfügung steht. Elektretmikrofone werden industriell in hohen Stückzahlen hergestellt, denn in fast jedem Mobiltelefon ist eines eingebaut.²⁸

9.2.4.2. Kondensatormikrofone mit Doppelmembran

Bei Kondensatormikrofonen mit zwei Mikrofonkapseln hat jede Kapsel für sich gesehen eine Nierencharakteristik. Je nach Beschaltung können verschiedene Charakteristiken daraus abgeleitet werden (Abb.9.19 und 9.20).

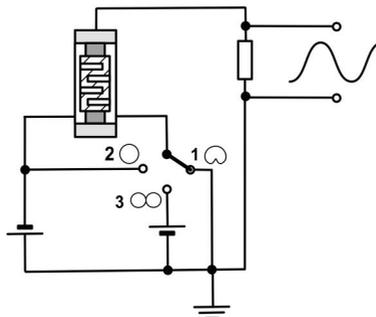


Abb. 9.19: Doppelmembranmikrofon mit schaltbarer Charakteristik

²⁷ Gemäß DIN 45596; vgl. Dickreiter, 1987, Seite 178

²⁸ vgl. Görne, 2007, Seite 68

- In Schalterstellung 1 liegt nur an einer Membran eine Gleichspannung an und das Mikrofon hat insgesamt eine Nierencharakteristik.
- Ist die Kapselvorspannung beider Kapseln identisch und mit gleicher Polarität wie bei Schalterstellung 2, so addieren sich die Ausgangssignale, insgesamt ergibt sich die Charakteristik einer Kugel.
- Ist die Polarität der beiden Kapseln entgegengesetzt, dann hat das Mikrofon eine Achtercharakteristik (Schalterstellung 3).

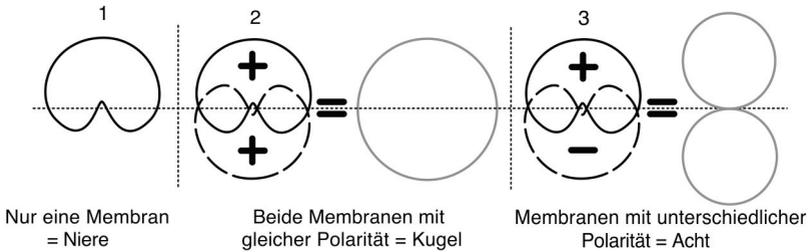


Abb. 9.20: Verschiedene Charakteristiken durch Kombination zweier Nieren

Variabel einstellbare Charakteristiken

Beim Doppelmembranmikrofon MKH 800 TWIN von Sennheiser werden die Signale der beiden Kapseln über zwei getrennte Leitungen zum Mischpult geführt. Der Kanal der vorderen Kapsel wird auf einen festen Pegel eingestellt, während der Pegelsteller und Verpolungsschalter²⁹ des Kanals für die hintere Kapsel variiert wird, um die gewünschte Richtcharakteristik zu erhalten (Abb. 9.21).

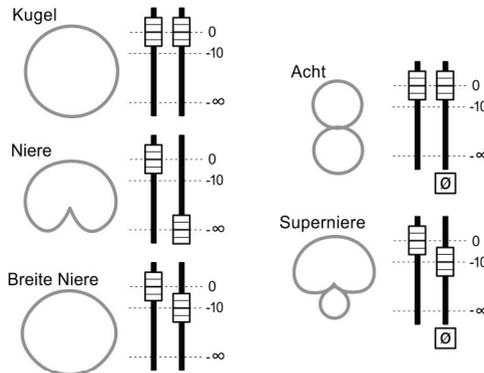


Abb. 9.21: Variable Richtcharakteristiken³⁰

²⁹ s. Kap. 14.2.1.1. „Mikrofonvorverstärker“

³⁰ vgl. VDT Magazin, 03/2008, Seite 33

9.2.4.3. Mechanisch veränderbare Richtcharakteristik

Bei einer mechanischen Umschaltung der Richtcharakteristik wird durch Klappen die Schallführung in der Kapsel geändert. Sind alle Klappen geschlossen, so funktioniert das Mikrofon als Druckempfänger und hat damit eine Kugelcharakteristik. Werden die Klappen beiseite geschoben, so wird das Mikrofon zu einem Druckgradientenempfänger mit der Richtcharakteristik einer Niere oder Acht.³¹ Beispiel hierfür: Schoeps MK6.

9.3. Bauarten

9.3.1. Kleinmembranmikrofone

Bei Kleinmembranmikrofonen ist der Membrandurchmesser kleiner als 1“. Mit der zunehmenden Verkleinerung sinkt allerdings die Empfindlichkeit, dagegen werden der Übertragungsfaktor und die Eigenstörspannung größer. Damit ergibt sich ein schlechterer Signal-Rausch-Abstand. Kleinmembranmikrofone haben meist sehr lineare Frequenzverläufe und sind oft als Modul-System mit austauschbaren Kapseln und verschiedenen Richtcharakteristiken erhältlich.

Beispiele: Neumann KM184, AKG C1000, Rode NT-5, Sennheiser MKH40.

9.3.2. Großmembranmikrofone

Bei Großmembranmikrofonen ist der Membrandurchmesser 1“ und größer. Sie haben eine höhere Empfindlichkeit im Vergleich zu Kleinmembranmikrofonen und einen besseren Störabstand. Je größer die Membran ist, desto schlechter wird allerdings die Übertragung hoher Frequenzen. Harmonische Verzerrungen und der nichtlineare Frequenzgang führen zu deutlich hörbaren Klangfärbungen. Dadurch ergibt sich ein warmer, präsenter Klang, der vom Anwender durchaus gewünscht sein kann.³² Großmembranmikrofone werden auch als Doppelmembransysteme mit umschaltbarer Richtcharakteristik angeboten.

Beispiele: Neumann U87, AKG C414, Rode NT-1, Shure KSM27.

9.3.3. Miniaturmikrofone

Bei Miniaturmikrofonen handelt es sich um Kondensatorkapseln mit Kugel- oder Nierencharakteristik.

Abb. 9.22 zeigt unten ein Sennheiser MKE 2 Gold und oben ein DPA 4060. Auf den Mikrofonkapseln stecken jeweils die dazugehörigen kurzen Schutzkappen, daneben liegen zum Vergleich die in der langen Ausführung. Durch die verschiedenen Schutzkappen kann der Frequenzgang der

³¹ vgl. Görne, 2007, Seite 77

³² vgl. Görne, 2007, Seite 176

Miniaturmikrofone gezielt verändert werden. So bewirkt die kurze Kappe des DPA eine Anhebung von +3 dB zwischen 8 und 20 kHz. Durch die lange Kappe wird eine eher schmalbandige Anhebung von +10 dB bei 12 kHz erzielt.

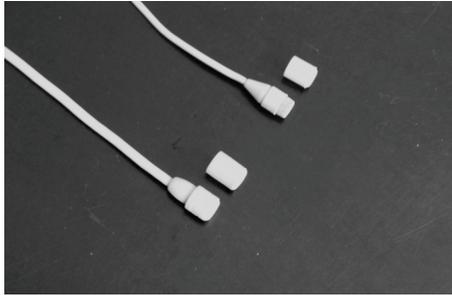


Abb. 9.22: Miniaturmikrofone

Miniaturmikrofone können mit Klammern an die Kleidung geheftet (Anwendung Rundfunk/TV) oder mit einem speziellen Kleber am Haaransatz auf der Stirn bzw. der Wange befestigt werden (Anwendung Theater/Musical). Einfacher in der Handhabung sind Kopfbügelmikrofone.

9.3.4. Grenzflächenmikrofon

Abhängig von der Größe der Fläche hat ein Grenzflächenmikrofon (Abb. 9.23) oberhalb einer Grenzfrequenz f_g einen um 6 dB höheren Pegel verglichen mit einem baugleichen Mikrofon, welches nicht als Grenzfläche genutzt wird.³³ Dies wird erklärt durch eine kohärente Überlagerung des Diffus- mit dem Direktschall dicht an der Grenzfläche und tritt nur auf, wenn die Fläche groß gegenüber der Wellenlänge ist.³⁴

Berechnung der Grenzfrequenz:

$$f_g = \frac{c}{d} \quad (\text{Formel 9.8})$$

c : Schallgeschwindigkeit

d: Durchmesser der Fläche

³³ vgl. Dickreiter, 1995, Seite 97

³⁴ vgl. Sengpiel, 2008d und 2008e, PDF-Dokumente: Untere Grenzfrequenz beim Grenzflächenmikrofon & Zwei verschiedene Grenzflächenmikrofon-Bauarten

Beispiel: Fläche mit einem Durchmesser von 20 cm:

$$f_g = \frac{344 \text{ m/s}}{0,20 \text{ m}} = 1720 \text{ Hz}$$

Weiterhin sind beim Grenzflächenmikrofon die Raumsignale gegenüber dem Direktschall bedämpft. Erklärung hierfür: Bei einem Mikrofon mit Kugelcharakteristik trifft der Diffusschall aus allen Richtungen mit gleicher Intensität ein:

$$I_1 = \frac{P}{4\pi r^2} \quad (\text{Formel 9.9})$$

Wird dieses Mikrofon nun auf den Boden gelegt, so verteilt sich die Schallintensität des Diffusschalls nur noch auf die halbe Kugeloberfläche:

$$I_2 = \frac{P}{2\pi r^2} \quad (\text{Formel 9.10})$$

Dies entspricht einem Schalldruckpegel von -3 dB gegenüber dem Direktsignal.³⁵



Abb. 9.23: Grenzflächenmikrofon (Shure SM91)

³⁵ s. Kap. 17. „Lautsprecher“ (Aufstellung von Lautsprechern im Raum)

9.3.5. Digitale Mikrofone

Ein Analog-Digital-Wandler im Mikrofongehäuse wird direkt hinter die Kapsel geschaltet und das Signal des Mikrofons ohne Verluste und Störungen zu einem digitalen Mischpult geleitet. Über das Anschlusskabel wird ein digitales Signal nach dem AES42-Standard übertragen.³⁶

Besonderheiten von digitalen Mikrofonen:

- Die Stromversorgung des Vorverstärkers und A/D-Wandlers erfolgt über eine besondere Phantomspeisung, der Digital Phantom Power (DPP) mit einer Versorgungsspannung von 10 V (+0,5 / -0,1 V) bei 250 bis max. 300 mA
- Die Fernsteuerung von Mikrofonparametern ist über eine Modulation der DPP mit +2V-Pulsen möglich.³⁷ Dämpfung (PAD), Vorverstärkung (Gain), Hochpassfilter (HP), Signalbegrenzung (Limiter), Stummschalten des Mikrofons (Mute) und eine Umschaltung der Richtcharakteristik sind machbar
- Eine Synchronisierung (ebenfalls über die DPP) ist bei mehreren parallel betriebenen Mikrofonen notwendig
- Die Auflösung des digitalen Signals geht bis zu 24 Bit bei 192 kHz. Die Datenrate beträgt dabei bis zu 750 Bit/s

9.3.6. Messmikrofone

Ein Messmikrofon hat immer eine Kondensatorkapsel und funktioniert als Druckempfänger. Manche Messmikrofone brauchen ein spezielles Speisegerät mit 200 V Versorgungsspannung für eine höhere Polarisation der Membran. Aber es sind auch (günstigere) Elektret-Messmikrofone erhältlich, die mit der üblichen 48 V-Phantomspeisung für den Betrieb des Trennverstärkers auskommen. Es gibt bei Messmikrofonen einheitliche Kapseldurchmesser: 1“, 1/2“, 1/4“ und 1/8“. Messmikrofone werden als Freifeld- oder Diffusfeldentzert angeboten und haben einen sehr linearen Frequenzgang. Allerdings weisen sie ein hohes Eigenrauschen auf, was die Verwendung für Tonaufnahmen meist ausschließt, aber für diesen Zweck werden Messmikrofone auch nicht gebaut.³⁸

³⁶ Das eigentliche digitale Audiosignal entspricht einem AES/EBU-Datenstrom (AES3-Norm); s. Kap. 12.6. „Digitale Audioprotokolle“

³⁷ vgl. Görne, 2007, Seite 137

³⁸ vgl. Görne, 2007, Seite 152

9.4. Technische Daten von Mikrofonen

Exemplarisch werden in Tabelle 9.3 die in der Bedienungsanleitung eines Mikrofons genannten Daten aufgezeigt und anschließend erläutert.

Tabelle 9.3: Technische Daten eines Mikrofons (Sennheiser MD421)³⁹

Übertragungsbereich	30 – 17 000 Hz
Akustische Arbeitsweise	Druckgradientenempfänger
Richtcharakteristik	Niere
Maximale Auslöschung bei 180°	18 dB - 2 dB
Übertragungsfaktor	2 mV/Pa (= -54 dB _V) ± 2,5 dB
Elektrische Impedanz	200 Ω
Minimale Abschlussimpedanz	200 Ω
Magnetfeldstörfaktor 50 Hz	< 5 μV / 5 μT

Übertragungsbereich

Mit Übertragungsbereich ist der zur Schallaufnahme nutzbare Frequenzbereich gemeint. Ein typischer Übertragungsbereich für Kondensatormikrofone geht z.B. von 30 bis 20 000 Hz mit einer Abweichung von ±3 dB. Graphisch wird der Übertragungsbereich als Frequenzgang dargestellt; Dieser zeigt die Abhängigkeit der Mikrofonempfindlichkeit von der Frequenz bei der 0°-Einsprechrichtung. In Abb. 9.24 ist als Beispiel der gemessene Frequenzgang eines dynamischen Mikrofons zu sehen (Sennheiser MD421, Filter am Mikrofon auf Stellung „M“).

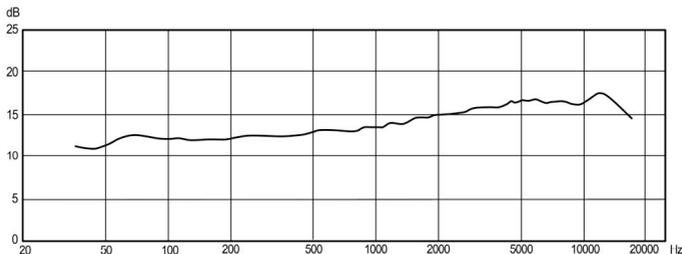


Abb. 9.24: Frequenzgang eines Mikrofons (Sennheiser MD421)

Manche Mikrofonhersteller geben auch einen sog. Rückwärtsfrequenzgang an (z.B. Schoeps). Hier wird zusätzlich die frequenzabhängige Empfindlichkeit für die 180°-Richtung in das Diagramm eingezeichnet.

Richtcharakteristik im Polardiagramm

Aus dem Polardiagramm lässt sich die Richtcharakteristik des Mikrofons für verschiedene Frequenzen ablesen. In Abb. 9.25 ist schön zu sehen, dass ein

³⁹ vgl. MD421, 1998, Seite 2

Nierenmikrofon zu tiefen Frequenzen hin fast eine Kugelcharakteristik hat und zu hohen Frequenzen den Schall zunehmend gerichtet aufnimmt. Nur bei 1 kHz ist eine echte Nierencharakteristik zu erwarten.

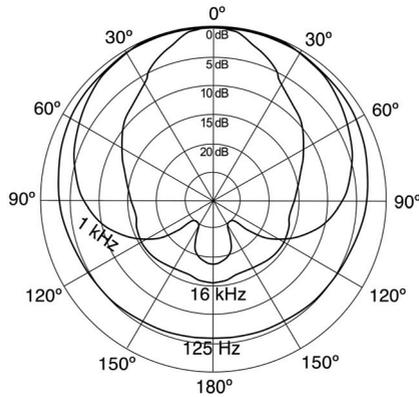


Abb. 9.25: Polardiagramm (Sennheiser MD 421)⁴⁰

Freifeld-Übertragungsfaktor [mV/Pa]

Der Freifeld-Übertragungsfaktor gibt an, wie groß die Ausgangsspannung ist, wenn das Mikrofon einen Pegelton von 1 kHz mit einem Schalldruck von 1 Pa (= 94 dB_{SPL}) aufnimmt.

Bei dynamischen Mikrofonen liegt dieser Wert bei ca. 1 bis 3 mV/Pa, bei Kondensatormikrofonen bei ca. 5 bis 25 mV/Pa. Diese geben daher einen rund 10 bis 20 dB_R höheren Pegel ab. Der Ausgangspegel eines Mikrofons liegt bei ca. -50 bis -30 dB_U, das ist der sog. Mikrofonpegel, den Mikrofonvorverstärker weiterverarbeiten.

Nennimpedanz [Ω]

Unter Nennimpedanz versteht man den frequenzabhängigen Ausgangswiderstand des Mikrofons, der in Datenblättern für eine Frequenz von 1 kHz angegeben wird. Die meisten Mikrofone haben eine Nennimpedanz zwischen 40 und 200 Ω und sind damit niederohmig. Daneben finden sich noch selten mittelohmige und hochohmige Mikrofone mit 1 kΩ bzw. 100 kΩ Nennimpedanz.⁴¹

⁴⁰ vgl. MD421, 1998, Seite 11

⁴¹ vgl. Görne, 2007, Seite 164

Nennabschlussimpedanz [Ω]

Die Nennabschlussimpedanz ist die minimale Eingangsimpedanz des Mikrofonverstärkers, an welchen das Mikrofon angeschlossen wird. Da in der Audiotechnik mit Spannungsanpassung gearbeitet wird, muss die Eingangsimpedanz höher sein als die Nennimpedanz des Mikrofons.⁴² Je nach Mikrofontyp und Hersteller sind verschiedene Werte üblich, meist liegt dieser Wert jedoch bei $\geq 1 \text{ k}\Omega$ für niederohmige Mikrofone. Für mittelohmige und hochohmige Mikrofone werden noch höhere Werte gefordert: $\geq 5 \text{ k}\Omega$ und $\geq 1 \text{ M}\Omega$.⁴³

Eigenstörspannung [mV]

Die an der Nennabschlussimpedanz gemessene Spannung, wenn kein Schall auf das Mikrofon trifft, heißt auch Eigenstörspannung.

Wenn kein Schallsignal aufgenommen wird, ist das Eigenrauschen des Mikrofons hör- und messbar. Letztlich rauscht jedes elektronische Bauteil aufgrund der temperaturabhängigen Teilchenbewegungen. Bei Mikrofonen sollte das Rauschen aber möglichst gering sein, da das Signal durch nachfolgende Schaltungen eine große Verstärkung erfährt. Dynamische Mikrofone haben eine Eigenstörspannung von ca. $0,20 \mu\text{V}$.⁴⁴

Geräuschspannung [mV]

Die Eigenstörspannung ist als Rauschen hörbar. Da ein Rauschen im mittleren Frequenzbereich, z.B. bei 1 kHz , lauter wahrgenommen wird als ein Rauschen mit gleich großer Störspannung im tiefen bzw. hohen Frequenzen, z.B. bei 50 Hz oder 15 kHz , wird ein Bewertungsfiter bei der Messung eingesetzt.⁴⁵ Die Geräuschspannung ist somit die bewertete Eigenstörspannung.

In Datenblättern wird oft anstatt einer Geräuschspannung in [mV] der umgerechnete Ersatzgeräuschpegel in $[\text{dB}_A]$ angegeben. Der Ersatzgeräuschpegel von dynamischen Mikrofonen liegt zwischen ca. 15 und 30 dB_A , bei Kondensatormikrofonen sind es ca. 10 bis 20 dB_A .⁴⁶

⁴² s. Kap. 11.1. „Anpassung“

⁴³ vgl. Görne, 2007, Seite 165

⁴⁴ vgl. Görne, 2007, Seite 167

⁴⁵ s. Kap. 2.1.2. „Der bewertete Schalldruckpegel“

⁴⁶ vgl. Görne, 2007, Seite 168

Grenzschalldruckpegel [dB_{SPL}]

Der Grenzschalldruckpegel ist der maximale Schalldruck, bei dem ein bestimmter Klirrfaktor noch nicht überschritten wird. Den höchsten erlaubten Klirrfaktor definiert der Hersteller, bei Studiomikrofonen kann der Klirrfaktor z.B. max. 0,5% betragen. Die Messung erfolgt bei einer Frequenz von 1 kHz.⁴⁷

Magnetfeldstörfaktor [$\mu\text{V}/\mu\text{T}$]

Der Magnetfeldstörfaktor ist ein Maß für die Empfindlichkeit eines Mikrofons für magnetische Einstreuungen, besonders für Brummeinstreuungen bei der Netzfrequenz von 50 Hz. Bei dynamischen Mikrofonen mit Brummkompensation⁴⁸ werden Werte von 3 $\mu\text{V}/5\mu\text{T}$ erreicht, ohne nur 30 $\mu\text{V}/5\mu\text{T}$. Kondensatormikrofone haben meist Werte unter 10 $\mu\text{V}/5\mu\text{T}$.

⁴⁷ vgl. Görne, 2007, Seite 171

⁴⁸ z.B. mit einer gegenläufig gewickelten Kompensationsspule; die Störsignale löschen sich dadurch aus

9.5. Übungsaufgaben

Aufgabe 1:

Nenne die drei im Tonstudio und in der Beschallung gebräuchlichsten akustisch-elektrische Wandlerprinzipien und gebe in Stichworten deren Vor- und Nachteile an.

Aufgabe 2:

Skizziere jeweils ein Polardiagramm mit der Richtcharakteristik eines Druckempfängers, Druckgradientenempfängers und Interferenzempfängers.

Aufgabe 3: (Frage bei der Abschlussprüfung Sommer 2001 der IHK Erfurt)

Nenne eine Richtcharakteristik eines Mikrofons, bei welcher der Nahbesprechungseffekt auftritt.

Aufgabe 4:

Warum kann man ein Mikrofon nicht beliebig klein bauen?

Aufgabe 5:

Wie groß ist der durch den Nahbesprechungseffekt hervorgerufene Pegelanstieg in dB_R bei einem Mikrofon mit Nierencharakteristik bei einer Frequenz von 100 Hz in einer Entfernung von 10 cm zur Schallquelle?



Literaturtipps:

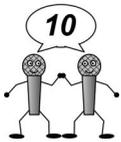
Boré, Gerhart und Peus, Stephan: Mikrophone.
 Berlin: Georg Neumann GmbH.
 (Download: <http://www.neumann.com>)

Pawera, Norbert: Mikrofonpraxis.
 München: Franzis Verlag.

Görne, Thomas: Mikrofone in Theorie und Praxis.
 Aachen: Elektor Verlag.

Wuttke, Jörg: Mikrofonaufsätze.
 Karlsruhe: Schoeps GmbH.
 (Download: <http://www.schoeps.de>)

10. Verfahren zur Mikrofonierung



„Mikrofone Auswählen und Positionieren“ steht für das zweite Lehrjahr auf dem Lehrplan. Hierzu sollte ein theoretisches Wissen vorhanden sein, welches in diesem Kapitel vermittelt wird.

10.1. Einzelmikrofonierung

Beim Einzelmikrofonverfahren wird im Nahbereich jeder Schallquelle je ein Mikrofon aufgestellt. Die Zusammenmischung der Einzelsignale erfolgt über ein Mischpult. Dort kann dann jedes Signal mittels des Panorama-Reglers in das Stereobild eingeordnet werden. Dies ist heute die gebräuchlichste Mikrofonierungstechnik bei Veranstaltungen. Balance und räumliche Wirkung können beinahe ohne Rücksicht auf die tatsächlichen Verhältnisse gestaltet werden. Allerdings ergeben sich Klangfarbenänderungen aufgrund der Positionierung im Nahfeld, welche unter Umständen aber künstlerisch gewollt sind, bzw. andernfalls durch eine entsprechende Klangregelung kompensiert werden können.

Es gibt kein allgemeingültiges „Kochrezept“ für die Auswahl und Positionierung von Mikrofonen und daher können die folgenden Tipps nur Anhaltspunkte sein.¹ Oft muss man einfach Ausprobieren, um eine Mikrofonaufstellung zu finden, die klanglich den eigenen Vorstellungen am ehesten entspricht.

10.1.1. Schlagzeugmikrofonierung

Kickdrum

Für die Kickdrum werden dynamische Mikrofone oder Kondensatormikrofone mit Nierencharakteristik verwendet. Hat das Resonanzfell ein ausgeschnittenes Loch, so wird das Mikrofon im Kessel positioniert: Je näher am Schlagfell, desto mehr „Kick“ ist im Klang zu erwarten (Abb. 10.1). Hat das Resonanzfell kein Loch, dann kann das Mikrofon nur direkt vor das Resonanzfell positioniert werden. Der Klang ist dann wuchtiger, hat mehr Tiefenanteil und es gibt nur wenig oder gar kein „Kick“. Hat man zwei Mikrofone zur Hand, dann kann eines für die tiefen Frequenzen nahe dem Resonanzfell und das andere für die perkussiven Anteile in der Kickdrum verwendet werden. Meist muss die -20 dB Dämpfung eingeschaltet werden.

¹ Anmerkung: Bei Tonaufnahmen z.B. in einem Tonstudio oder Konzertsaal sind z.T. abweichende Mikrofonpositionen besser geeignet

Beispiele für oft verwendete Mikrofone: AKG D112, Shure Beta52, ElectroVoice RE20, Shure SM91.

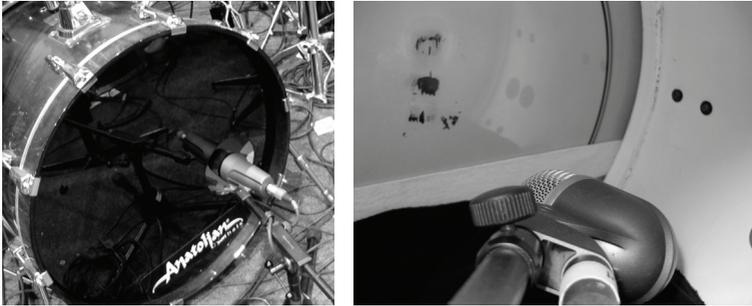


Abb. 10.1: Mikrofonierung einer Kickdrum

Snare

Auch für die Snare werden dynamische Mikrofone oder Kondensatormikrofone mit Nierencharakteristik eingesetzt. Das Mikrofon zeigt schräg von oben auf das Schlagfell wie in Abb. 10.2. Je mehr das Mikrofon in Richtung Rand zeigt, desto härter und obertonreicher wird der aufgenommene Klang.² Das Übersprechen der HiHat ist durch eine entsprechende Ausrichtung des Mikrofons reduzierbar. Ein zusätzliches Mikrofon kann von unten auf den Snare-Teppich zeigen, eventuell muss für dieses Signal der Verpolungsschalter am Mischpultkanal betätigt werden.

Beispiele für Snare-Mikrofone: Shure SM57 und Beta57, AKG C414, Beyerdynamic M201, Sennheiser MD421 und e905.



Abb. 10.2: Mikrofonierung einer Snare

TomToms

TomToms werden bei der Beschallung eher selten mit Kondensatormikrofonen abgenommen, zumeist kommen dynamische Mikrofone mit Nierencharakteristik zum Einsatz. Die Mikrofonierung von oben bietet sich an bei TomToms mit

² vgl. Görne, 2007, Seite 218

Resonanzfell (Abb. 10.3), ohne Resonanzfell kann es eventuell auch von unten abgenommen werden. Bei zu wenig Mischpultkanälen bzw. Mikrofonen ist eine paarweise Abnahme der Trommeln möglich.

Oft verwendete Mikrofone: Shure SM57, Sennheiser MD421, Audix D2 und D4, ElectroVoice ND408 oder Clipmikrofone wie z.B. das AKG C518 oder Opus88 von Beyerdynamic.



Abb. 10.3: Mikrofonierung von TomToms

HiHat und Ride:

Für HiHat und Ride wird je ein Kondensatormikrofon mit Nierencharakteristik verwendet. Die Abnahme erfolgt von oben (Abb. 10.4), aber möglich ist auch eine Mikrofonierung von unten. Eine Position mehr am Rand ergibt einen eher satten und dunklen Klang, in Richtung Mitte wird der Sound zunehmend heller und metallisch („Glocke“).³

Geeignete Mikrofone: Sennheiser MKH40, Neumann KM140 und KM184, AKG C391 und C461.



Abb. 10.4: Mikrofonierung einer HiHat

³ vgl. Görne, 2007, Seite 218

Overhead (OH)

Overheads sind meist hochwertige Kondensatormikrofone mit Nierencharakteristik, die in einem größeren Abstand zu den Becken positioniert werden. Es bietet sich ein Stereo-Mikrofonverfahren wie z.B. XY- oder AB-Stereo an.⁴ Alternativ kann auch nur ein einzelnes Mikrofon mit Achtercharakteristik zwischen zwei Becken aufgestellt werden.⁵ Zur Kompensation der Laufzeit von den Einzelmikrofonen der Trommeln zu den Overhead-Mikrofonen kann eine elektronische Verzögerung sinnvoll sein.

Mögliche OH-Mikrofone: z.B. Sennheiser MKH40, Neumann KM 184, AKG C1000, Shure SM81.

10.1.2. Percussion

Bei der Vielzahl von verschiedenen Perkussionsinstrumenten ist es schwierig, allgemeingültige Tipps für die Mikrofonierung zu geben. Kleine Instrumente werden meist mit nur einem Mikrofon, größere wie z.B. Xylophon oder Marimba oft stereophon, d.h. mit zwei oder manchmal auch mehr Mikrofonen abgenommen.⁶

Beispiele für die Mikrofonierung von Perkussionsinstrumenten:

- Ein Gong kann von vorne oder hinten abgenommen werden, ebenso die Chimes. Mikrofonabstand: ca. 30 cm
- Xylophone und Glockenspiele: z.B. eine AB-Stereomikrofonierung mit einem Abstand von ca. 50 cm zum Instrument
- Große Trommel: Mikrofonierung von hinten; Beste Klangergebnisse ohne Resonanzfell⁷. Abstand ca. 30 bis 50 cm
- Pauken klingen oft voluminöser, wenn der Mikrofonabstand etwas größer gewählt wird (ca. 50 cm bis 1 m). Allerdings ist dann das Übersprechen anderer Instrumente in die Paukenmikrofone sehr groß
- Congas und Bongos können auch paarweise mit einem Mikrofon abgenommen werden

⁴ s. Kap. 10.2. „Stereo-Aufnahmeverfahren“

⁵ vgl. Pawera, 1993, Seite 110

⁶ vgl. Görne, 2007, Seite 220

⁷ vgl. Dickreiter, 1995, Seite 153



Abb. 10.5: Mikrofon über zwei Pauken und in einem Cajón



Abb. 10.6: Mikrofon am großen Gong und für Chimes

10.1.3. Mikrofonierung einer Gitarre

E-Gitarre

Für die Abnahme von E-Gitarren nimmt man am besten ein dynamisches Mikrofonen mit Nierencharakteristik und positioniert es vor dem Gitarrenlautsprecher. Die Mikrofonierung erfolgt sehr nahe an der Lautsprechermembran mit einem Abstand bis max. 10 cm (Abb. 10.7). Ein harter, höhenbetonter Klang ist bei der Ausrichtung auf die Mitte der Lautsprechermembran zu erwarten. In einem Bereich zwischen Mitte und Rand klingt es druckvoller und ausgewogener, ganz am Rand der Membran schließlich weich und obertonarm.⁸

Übliche Mikrofone für Gitarrenboxen: Shure SM57, Sennheiser e606 oder Sennheiser MD421.

⁸ vgl. Pawera, 1993, Seite 93 und Görne, 2007, Seite 204

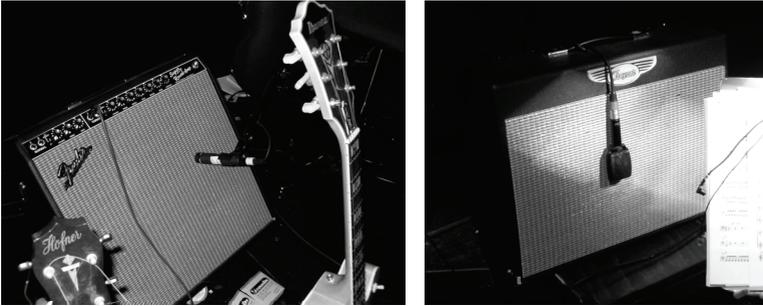


Abb. 10.7: Mikrofonierung von Gitarrencombos

Akustik-Gitarre

Je näher das Mikrofon am Schallloch der Gitarre positioniert ist, desto voller ist der Klang.⁹ Eine Ausrichtung des Mikrofons zwischen Steg und Schallloch bringt aber meist die besten Ergebnisse für die Live-Beschallung.¹⁰ Der Abstand zum Instrument sollte nicht mehr als 50 cm betragen. Häufig ist auch eine Kombination aus Piezo-Tonabnehmer plus Kondensatormikrofon. Einige Gitarristen lassen sich dazu spezielle Tonabnehmer und Mikrofone fest in das Instrument einbauen.

10.1.4. Bass

E-Bass

Ein E-Bass wird fast immer mit einer DI-Box ans Mischpult angeschlossen (Abb. 10.8), eher selten wird auch der Basslautsprecher mikrofoniert. Die Positionierung des Mikrofons vor der Lautsprechermembran erfolgt dann wie bei E-Gitarren; Allerdings werden abweichende Mikrofontypen eingesetzt, von denen man eine bessere Übertragung tiefer Frequenzen erwartet, z.B. das ElectroVoice RE20 oder Shure Beta52.

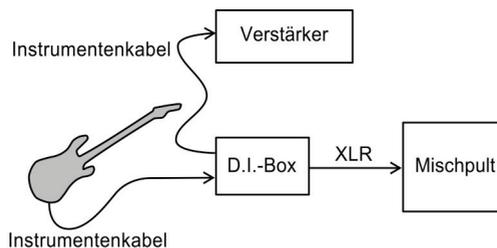


Abb. 10.8: Signalfluss E-Bass mit DI-Box

⁹ vgl. Görne, 2007, Seite 201

¹⁰ vgl. Dickreiter, 1995, Seite 154

Kontrabass

Viele Kontrabässe sind mit Tonabnehmern bestückt (meist ein Piezo-Tonabnehmer). Zusätzlich kann ein Kondensatormikrofon in den Steg geklemmt werden (Abb. 10.9). Gut eignet sich ein Mikrofon mit Achtercharakteristik, welches so ausgerichtet ist, dass sowohl der Klang der Decke als auch Saitengeräusche aufgenommen werden.

Ein geeignetes Kondensatormikrofon mit Achtercharakteristik ist z.B. das Sennheiser MKH80.



Abb. 10.9: Tonabnehmer und Mikrofon an Kontrabass

10.1.5. Keyboards

Die Signale der Line-Ausgänge eines Keyboards werden über DI-Boxen an das Mischpult geleitet. Zusätzlich ist manchmal auch die Mikrofonierung eines Keyboard-Combos möglich.

Mikrofonierung eines Leslies: Zwei Mikrofone für den oberen Rotor (z.B. Shure SM57) und eines für den Bassrotor (z.B. Sennheiser MD421). Dabei einen Windschutz für die Mikrofone vorsehen.¹¹

10.1.6. Flügel und Klavier

Konzertflügel

Der Klang entfaltet sich erst richtig in einigen Metern Abstand zum Flügel, aber auf der Bühne ist dennoch eine Nahabnahme sinnvoller, um ein Übersprechen anderer Instrumente in die Klaviermikrofone zu minimieren.

Es sind verschiedene Varianten sind denkbar:

- Je ein gerichtetes Kondensatormikrofon über den Bass- und Diskantsaiten (Achtung: Nah bei den Hämmern ist viel Anschlaggeräusch zu hören). Klein- oder Großmembran-Kondensatormikrofone sind hier möglich z.B. Neumann

¹¹ vgl. Görne, 2007, Seite 209

KM184, U87, M149 oder auch hochwertige dynamische Mikrofone wie z.B. das Sennheiser MD441

- Eine Stereomikrofonierung im Nahbereich: z.B. MS- oder AB-Stereo ¹²
- Bei geschlossenem Deckel: Grenzflächenmikrofon(e) mit doppelseitigen Klebeband an die Deckelunterseite geklebt (z.B. Sennheiser E912 und AKG C542)
- PianoMic-System von Earthworks Precision Audio: Miniaturmikrofone mit einer Kugelcharakteristik werden mit speziellen Haltevorrichtungen im Innern des Flügels am Rahmen befestigt. Dieses System ist bei offenen oder geschlossenen Deckel anwendbar

Klavier

- Bei geöffnetem Deckel: Mikrofon(e) von oben auf die Saiten zeigend
- Alternativ: Mikrofon(e) von Hinten, die auf die Rückwand des Pianos zeigen

10.1.7. Mikrofonierung von Bläsern

Die Positionierung des Mikrofons ist abhängig von der Schallabstrahlung und Richtwirkung des Blasinstrumentes.

- Bei Holzbläsern erfolgt die Schallabstrahlung über die Schalllöcher und den Trichter (Abb. 10.10)
- Bei Blechbläsern ist die hauptsächliche Schallabstrahlung frontal aus dem Trichter (Abb. 10.11)
- Spezialfall Flöte und Querflöte: Hier kann eine Mikrofonierung im Bereich des Mundstücks angebracht sein, da die Anblasgeräusche charakteristisch für diese Instrumente sind

In Frage kommen Kondensatormikrofone wie z.B. das Sennheiser MKH40 und Neumann U89 oder dynamische Mikrofone wie z.B. das Sennheiser MD421 und ElectroVoice RE20. Weiterhin gibt es spezielle Mikrofone mit Klemmvorrichtungen zur Anbringung am Schalltrichter wie z.B. das AKG C419.

¹² s. Kap. 10.2. „Stereo-Aufnahmeverfahren“



Abb. 10.10: Mikrofonierung von Saxophon und Oboe



Abb. 10.11: Mikrofonierung eines Horns

10.1.8. Streicher

Für die Abnahme von Streichinstrumenten werden verschiedene Kondensator-Ansteckmikrofone verwendet. Diese werden an den Steg oder Korpus geklemmt, und haben manchmal auch einen kleinen Schwanenhals zur Ausrichtung des Mikrofons auf die F-Löcher. Mögliche Mikrofone: z.B. Sennheiser MKE2, DPA 4060 oder spezielle Streichermikrofone von Accusound.

Die Firma Schoeps bietet einen Adapter für Streichinstrumente an: Hier wird ein Kleinmembran-Kondensatormikrofon wie z.B. das Schoeps MK4 oder CCM4 mit einer Klemmvorrichtung am Korpus befestigt. Es gibt verschiedene Ausführungen speziell für Violinen, Bratschen, Celli und Kontrabässe.

Zusätzlich zu den Einzelmikrofonen an den Instrumenten werden oft Overheads für Streichergruppen eingesetzt. In Frage kommen hierfür Kondensatormikrofone mit Nierencharakteristik wie z.B. das Sennheiser MHK40.

10.1.9. Gesang und Sprache

10.1.9.1. Handmikrofone für Gesang

Neben der guten Sprachverständlichkeit ist ein vorrangiges Ziel bei der Gesangsmikrofonierung die Rückkopplungssicherheit bei hohen Schallpegeln. Für Sänger und Sängerinnen werden bei Konzerten deshalb vorwiegend dynamische Handmikrofone mit Nieren- oder Hypernierencharakteristik eingesetzt. Eine robuste Bauweise und zusätzliche innere Konstruktionen zur Handgeräuschkompensation zeichnen ein gutes Gesangsmikrofon aus. Drahtlose Handmikrofone bieten mehr Bewegungsfreiheit. Die rückwärtigen Schalleintrittsöffnungen dürfen nicht durch die Hand verdeckt werden, da sich dabei die Richtcharakteristik zur Kugel ändert und damit eher Rückkoppelungen auftreten. Oft verwendete Gesangsmikrofone sind z.B. das Shure SM58, Beta58 oder Beta87.

10.1.9.2. Drahtlose Miniaturmikrofone im Theater und Musical

Die Mikrofone werden möglichst unauffällig am Haaransatz auf der Stirn oder auf dem Wangenknochen befestigt (Abb. 10.12). Mit einem Kopfbügel ist auch eine Positionierung näher am Mund möglich (Abb. 10.13).

Oft eingesetzte Miniaturmikrofone: z.B. Sennheiser MKE 2, DPA 4060 oder Countryman B 3 und B 6.



Abb. 10.12: Miniaturmikrofone auf der Stirn bzw. dem Wangenknochen (Oliver Heim und Axel Weidemann)



Abb. 10.13: Kopfbügelmikrofon (Carsten Lepper)

10.1.9.3. Mikrofonierung bei einer Sprachbeschallung

Bei einer Sprachbeschallung ist der Abstand des Redners zum Mikrofon meist recht groß. Handmikrofone sind daher nicht so sehr geeignet (Nur dann, wenn der Redner in der Handhabung geübt ist). Besser sind also Kleinmembran-Kondensatormikrofone, angebracht auf einem Stativ.¹³

Redner an einem Pult

Hier entsteht oft durch eine schallreflektierende Skriptauflage ein Kammfiltereffekt. Vermindert werden kann dies zum Beispiel durch eine Optimierung der Mikrofonposition. Je nach Neigung der Skriptauflage muss ein größerer Abstand zum Pult gewählt werden oder das Mikrofon muss näher an den Redner heran. Es gibt auch schalldurchlässige Skriptauflagen, zusätzlich können diese mit Stoff oder Filz überzogen sein.¹⁴ Generell sollte ein gerichtetes Mikrofon verwendet werden. Eventuell eignet sich auch ein Grenzflächenmikrofon, welches auf der Skriptauflage gelegt wird.¹⁵ Allerdings wird hier oftmals das Mikrofon von den Unterlagen des Redners verdeckt und unerwünschtes Papierrascheln übertragen (Abb. 10.14).

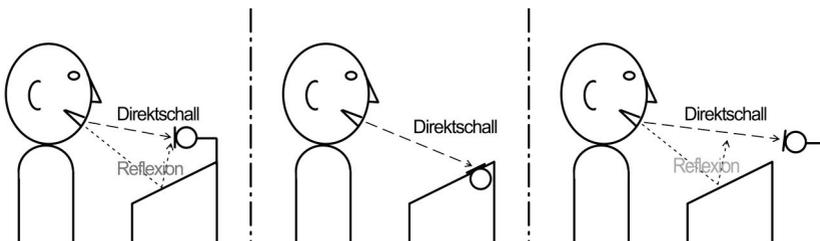


Abb. 10.14: Mikrofone an einem Rednerpult

Links: Mikrofon über der Skriptablage

Mitte: Grenzflächenmikrofon

Rechts: Mikrofon in größerer Entfernung zum Pult

Redner bewegt sich

Hier wird meist ein drahtloses Ansteckmikrofon verwendet, das an der Kleidung befestigt wird. Auch wenn Mikrofonkapseln mit Kugelcharakteristik verwendet werden, sollten diese aufgrund der Richtwirkung zu hohen Frequenzen hin so ausgerichtet sein, dass diese in Richtung Mund zeigen. Problematisch sind bei Ansteckmikrofonen immer starke Kopfbewegungen, die dann zu

¹³ vgl. Görne, 2007, Seite 236

¹⁴ vgl. Görne, 2007, Seite 199

¹⁵ s. Kap. 9. „Mikrofone“ die Ausführungen zu Grenzflächenmikrofonen

Tonschwankungen führen.¹⁶ Der Techniker am Mischpult muss hierbei entsprechend schnell aber feinfühlig nachregeln.

Podiumsdiskussion oder Gesprächsrunde

Sitzen die Gesprächsteilnehmer an einem Tisch, so bieten sich manchmal Kleinmembranmikrofone auf Tischstativen an, wenn der Einsprechabstand nicht zu groß ist. Ansonsten sind auch hier Ansteckmikrofone eine gute Alternative. Bei einer festgelegten Sitzordnung weiß man schon vorher die Blickrichtungen der Gesprächsteilnehmer und das Ansteckmikrofon auf der richtigen Seite an der Kleidung anbringen.

10.2. Stereo-Aufnahmeverfahren

Es gibt verschiedene Herangehensweisen für die Stereoaufnahme mit Hauptmikrofonen:¹⁷

- Intensitätsstereofonie für eine gute Lokalisation der Schallquellen im Stereoklangbild bei der Wiedergabe
- Laufzeitstereofonie mit einer guten Abbildung der räumlichen Tiefe
- Gemischte Aufnahmeverfahren als Kompromisslösung zwischen guter Lokalisation und räumlicher Tiefe
- Aufnahmetechniken mit Trennkörpern sollen das Prinzip des menschlichen Hörens nachbilden

10.2.1. Intensitätsstereofonie

Um ausschließlich Intensitätsunterschiede, d.h. Pegeldifferenzen, zwischen den beiden Stereokanälen zu erhalten, werden zwei Mikrofone sehr dicht beieinander platziert. Es treten dann praktisch keine Laufzeitunterschiede des Schalls von der Schallquelle zu den einzelnen Mikrofonen auf. Betreffend der Anordnung und der Richtcharakteristik der Mikrofone unterscheidet man zwei Verfahren der Intensitätsstereofonie: MS und XY.

¹⁶ vgl. Görne, 2007, Seite 252

¹⁷ vgl. Görne, 2007, Seite 31

10.2.1.1. MS-Mikrofonierung

Beim MS-Verfahren wird ein Mikrofon mit der Charakteristik einer Niere oder Kugel wie bei einer Monoaufnahme direkt auf die Schallquelle ausgerichtet. Dieses ergibt das Mitten-Signal (M). Die zweite Kapsel hat eine Achtercharakteristik und wird um 90° zur M-Kapsel gedreht. Sie liefert die Seiteninformation -S und +S. Die 0°-Richtung der Acht muss nach links zeigen, andernfalls werden bei der Wiedergabe die Seiten vertauscht (Abb. 10.15).¹⁸

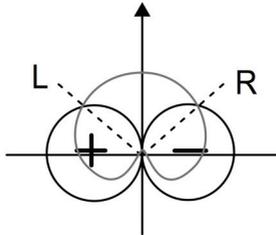


Abb. 10.15: MS-Technik

Eine solche Mikrofonanordnung erzeugt die Signale für die beiden Stereokanäle nicht unmittelbar, sondern diese werden erst durch die Summen- und Differenzbildung aus den Signalen M und S gewonnen:

- Linker Kanal = $M + S$
- Rechter Kanal = $M - S$

Diese Summen- und Differenzbildung kann durch Summierverstärker gelöst werden, MS-Signale lassen sich aber auch mit einem Mischpult verarbeiten. Dazu sind drei Kanäle notwendig:

- Kanal 1 = M-Signal, Panoramaregler in der Mittelstellung
- Kanal 2 = S-Signal, Panoramaregler Links
- Kanal 3 = S-Signal, Panoramaregler Rechts und Verpolungsschalter betätigt

Bei der Abmischung kann der Anteil des Seitensignals und damit der Stereoeindruck noch variiert werden, indem beiden S-Kanäle gemeinsam im Pegel verändert werden.

¹⁸ vgl. Görne, 2007, Seite 103

10.2.1.2. XY-Mikrofonierung

Beide Mikrofone haben hier eine Nierencharakteristik und werden im gleichen Winkel nach links (= X-System) und nach rechts (= Y-System) ausgerichtet.

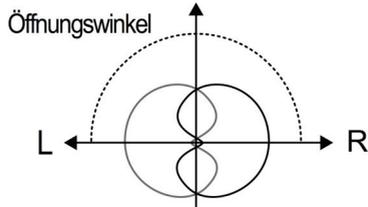


Abb. 10.16: XY-Technik

Der Öffnungswinkel bestimmt den Aufnahmebereich einer solchen Mikrofonanordnung. Manchmal wird auch vom Versatzwinkel geredet, das ist dann der Winkel von der 0° -Richtung heraus betrachtet, also der halbe Öffnungswinkel. Abb. 10.16 zeigt den maximalen Öffnungswinkel von 180° . Der Aufnahmebereich beträgt in diesem Fall 90° . Der Zusammenhang zwischen Öffnungswinkel und Aufnahmebereich bei XY mit Nierenmikrofonen ist in Abb. 10.17 ersichtlich:

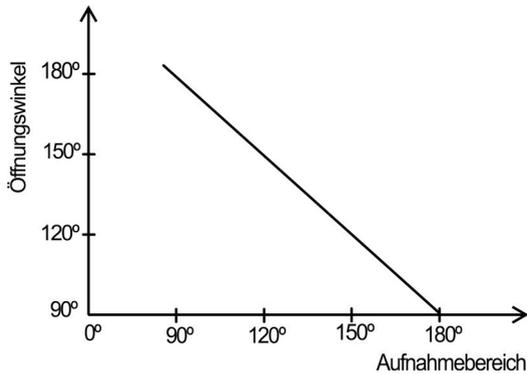


Abb. 10.17: Öffnungswinkel und Aufnahmebereich bei Nieren-XY
Bildquelle: Dickreiter, 1995, Seite 115

Je größer der Aufnahmebereich der XY-Anordnung desto enger wird die Stereo-Abbildung bei der Lautsprecherwiedergabe. Bildlich gesprochen muss z.B. ein großes, breit aufgestelltes Orchester in eine kleine Stereobasis „gepresst“ werden. Ist der Aufnahmebereich dagegen zu klein gewählt, dann zerfällt das Klangbild bei der Wiedergabe. In der Mitte der Stereobasis entsteht ein „Loch“,

die aufgenommenen Schallquellen kommen nur noch aus dem jeweils linken oder rechten Lautsprecher.¹⁹

Beim sog. Blumlein-XY werden zwei Mikrofone mit der Richtcharakteristik einer Acht und einem Öffnungswinkel von 90° verwendet. Aufgrund der Achtercharakteristiken gibt es zwei gleich große Aufnahmebereiche: Vorne und hinten, d.h. Schall von der Seite wird maximal ausgeblendet. Im Vergleich zu einem Nieren-XY wird also auch der rückwärtige Raumanteil mit aufgenommen. Als Sonderanwendung kann ein Blumlein-XY zwischen zwei Instrumenten positioniert werden.²⁰

Für die Intensitätsstereoaufnahmen mit der XY-Technik wurde ein spezieller Typ von Mikrofon entwickelt, das sog. Koinzidenzmikrofon. Dieses Mikrofon hat zwei Kapseln, die zueinander in jedem gewünschten Winkel verdreht werden können.

10.2.2. Laufzeitstereofonie

Die beiden Stereomikrofone sind hier parallel in einen gewissen Abstand zueinander angebracht, man spricht von einer AB-Anordnung. Aus dem Abstand der beiden Mikrofone resultieren unterschiedliche Laufzeiten des Schalls von der Schallquelle zu den einzelnen Mikrofonen (Abb. 10.18).²¹

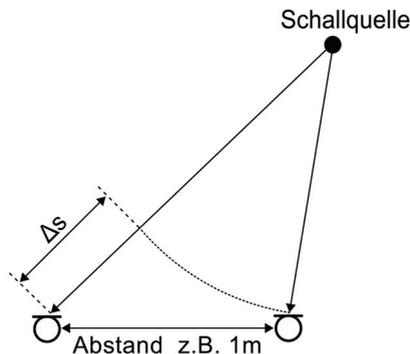


Abb. 10.18: AB-Technik

Um bei stereophoner Wiedergabe eine Lokalisation in nur einem Lautsprecher zu erzielen, ist eine Laufzeitdifferenz von 1,5 ms notwendig. Das entspricht einem Wegunterschied Δs von ca. 52 cm. Bei ca. 38 cm Abstand zwischen den Mikrofonen ist der Aufnahmebereich maximal groß und erstreckt sich über 180° . Bei größeren Mikrofonabständen ergeben sich längere Laufzeiten und dadurch

¹⁹ vgl. Görne, 2007, Seite 96

²⁰ vgl. Görne, 2007, Seite 104

²¹ Daneben gibt es aber auch geringe Pegeldifferenzen

mehr Phasen-Unterschiede. Der Aufnahmebereich wird dann kleiner und dadurch ist die Stereo-Abbildung bei der Lautsprecherwiedergabe größer (akustischer Zoom).²²

In der Praxis arbeitet man bei einer Klein-AB-Aufstellung mit Abständen von ca. 20 bis 40 cm, bei Groß-AB bis zu ca. 100 cm. Üblicherweise werden Mikrofone mit Kugelcharakteristik eingesetzt, manchmal auch breite Nieren. Denkbar ist auch der Einsatz von Grenzflächenmikrofonen auf dem Boden oder an einer Wand. Stark gerichtete Mikrofone sind eher nicht geeignet.²³

10.2.3. Gemischte Aufnahmeverfahren

Gemischte Stereomikrofonverfahren nehmen sowohl Laufzeit- wie auch Pegelunterschiede auf. Die Mikrofonabstände sind deutlich geringer als bei einer AB-Aufstellung.

Ein sehr bekanntes gemischtes Aufnahmeverfahren wurde vom Office de Radiodiffusion-Télévision Française (ORTF) entwickelt. Hier haben die Kapseln mit Nierencharakteristik einen Abstand von 17,5 cm und einen Öffnungswinkel von $\pm 55^\circ$. Der Aufnahmebereich beträgt dabei ca. 95° (Abb. 10.19).

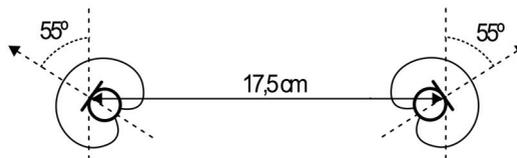


Abb. 10.19: ORTF-Mikrofonierung

Andere gebräuchliche Verfahren sind zum Beispiel die DIN-Anordnung mit einem Öffnungswinkel von $\pm 45^\circ$; der Mikrofonabstand beträgt 20 cm. Die vom niederländischen Rundfunk NOS verwendete Anordnung hat ebenfalls einen Öffnungswinkel von $\pm 45^\circ$, der Mikrofonabstand beträgt aber 30 cm (NOS = Nederlandse Omroep Stichting).

Die Williams-Kurven²⁴ stellen den Zusammenhang von Mikrofonbasis, Öffnungswinkel und Aufnahmebereich bei gemischten Aufnahmeverfahren dar. Die schraffierten Bereiche in der Zeichnung kennzeichnen ungeeignete Anordnungen von Nierenmikrofonen (Abb. 10.20).

²² vgl. Görne, 2007, Seite 111

²³ vgl. Dickreiter, 1995, Seite 129 und Wuttke, 2000, Seite 24

²⁴ Ermittelt von Michael Williams (Audio Engineering Society)

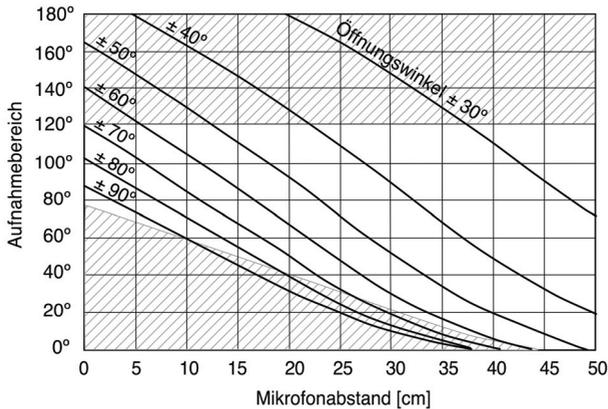


Abb. 10.20: Williams-Kurven für Mikrofone mit Nierencharakteristik
Bildquelle: Dickreiter, 1995, Seite 132

10.2.4. Mikrofonierung mit Trennkörper

Aufnahmeverfahren mit Trennkörper zwischen den Stereomikrofonen sind vom Prinzip des menschlichen Hörens abgeleitet, d.h. hier gibt es:

- Einen konstanten Laufzeitunterschied
- frequenzabhängige Pegel- und Klangfarbenunterschiede
- Druckempfänger als Wandler

Die entsprechenden Verfahren nutzen Mikrofone mit Kugelcharakteristik mit Abständen von 17 bis 20 cm und einem Trennkörper unterschiedlichster Form.

Eigenschaften der Trennkörpermikrofonierung:

- Eine gute Lokalisation der Schallquellen im Stereoklangbild²⁵
- Gute Wiedergabe tiefer Frequenzen durch die Verwendung von Druckempfängern
- Gut geeignet für Kopfhörerwiedergabe²⁶
- Gute Aufnahmeergebnisse auch bei hohem Diffusschallanteil, dies allerdings nur in akustisch guten Räumen
- Nachteil: Der Aufnahmebereich ist bei manchen Trennkörpern nicht variabel

²⁵ vgl. Wuttke, 2000, Seite 37

²⁶ vgl. Görne, 2007, Seite 124

10.2.4.1. OSS bzw. Jecklin-Scheibe (Jürg Jecklin)

Die Abkürzung OSS steht für „Optimales Stereo Signal“. Für dieses Verfahren wird eine schallharte Scheibe mit 30 cm Durchmesser beidseitig mit Schaumstoff versehen und zwischen zwei Mikrofonen angebracht. Geeignet ist z.B. eine 1 cm dicke Holzplatte mit aufgeklebten, offenporigen Polyurethan-Schaumstoff.²⁷ Wie beim ORTF-Verfahren beträgt der Kapselabstand 17,5 cm. Allerdings werden Druckempfänger mit Kugelcharakteristik verwendet (Abb. 10.21).

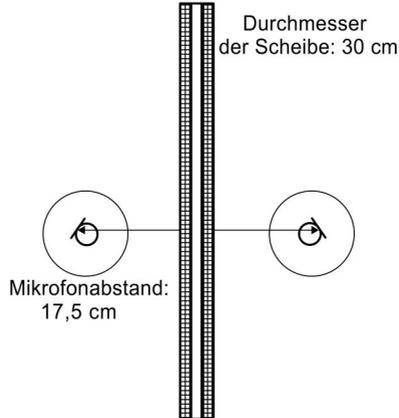


Abb. 10.21: Jecklin-Scheibe

10.2.4.2. Kugelflächenmikrofon (Schoeps)

Zwei Druckempfänger sind bündig eingelassen in einen Kugelkörper mit einem Durchmesser von ca. 20 cm (Abb. 10.22).

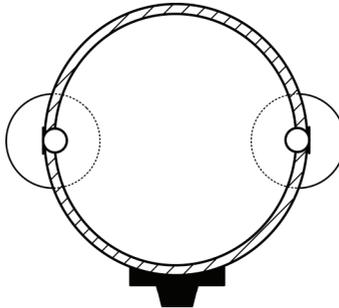


Abb. 10.22: Kugelflächenmikrofon

Die Laufzeiten beim Kugelflächenmikrofon sind denen des natürlichen Hörens des Menschen ähnlich. Der Frequenzgang des direkten Schalls von vorne und des diffusen Schalls sind linear und es treten keine Kammfiltereffekte auf. Es gibt

²⁷ vgl. Görne, 2007, Seite 126

aber auch einige Nachteile des Kugelflächenmikrofons: Der Aufnahmebereich beträgt konstant 90° und es gibt Klangfärbungen durch Abschattung bzw. Druckstau von seitlich eintreffenden Schall. Beim jeweils einer Schallquelle zugewandten Mikrofon ist also eine deutliche Höhenanhebung hörbar.²⁸

10.2.4.3. Kunstkopf (Neumann)

Der Kunstkopf ist eine Nachbildung des menschlichen Kopfes mit Außenohren, Gehörgängen und Mikrofonen an der Position der Trommelfelle (Abb. 10.23). Grundsätzlich ist dieses Aufnahmeverfahren für die binaurale Wiedergabe mit Kopfhörern vorgesehen.²⁹ Und nur da zeigt sich ein natürliches Klangbild mit guter Lokalisation aus allen Richtungen. Eine Lautsprecherwiedergabe ist zwar möglich, verfälscht aber das Klangbild.

Ursprünglich wurde der Kunstkopf für raumakustische Untersuchungen entwickelt, zum Beispiel um verschiedene Räume messtechnisch vergleichen zu können. Bei Hörspielproduktionen wird der Kunstkopf als dramaturgisches Stilmittel eingesetzt, seltener wird er auch für Musikaufnahmen verwendet.

Die Schallablenkung durch die Form des Kopfes, der Ohrmuscheln und Gehörgänge kann man sich auch als ein akustisches Filter vorstellen. Diese Filterwirkung kann elektronisch nachgebildet werden, das Verfahren dazu nennt sich (engl.:) Head Related Transfer Function (HRTF).³⁰ Mit Hilfe einer HRTF kann ein Computer binaurale Signale synthetisch erzeugen, z.B. für Spieleanwendungen.

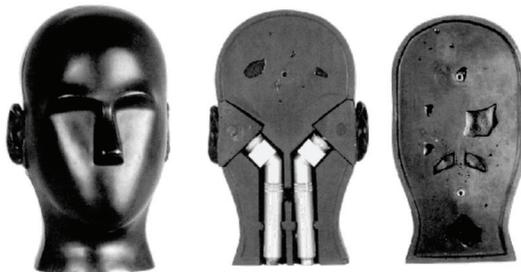


Abb. 10.23: Kunstkopf (Neumann KU 80 aus dem Jahr 1975)
Bildquelle: Deutsches Rundfunk-Museum, <http://www.drmm-berlin.de>

²⁸ vgl. Görne, 2007, Seite 125

²⁹ Binaural = mit beiden Ohren

³⁰ vg. Görne, 2007, Seite 28

10.3. Surround-Aufnahmeverfahren

Mikrofonaufnahmeverfahren für Surround wurden entwickelt, nachdem die DVD als Distributionsmedium für Video und Audio mit der Möglichkeit der Wiedergabe von mehreren Tonkanälen auf den Markt kam. Oft wurden bereits vorhandene Stereo-Aufnahmetechniken für Surround erweitert, aber es gibt auch einige Neuentwicklungen. Exemplarisch sollen im Folgenden einige Verfahren aufgezeigt werden.

10.3.1. Doppelt-MS (Schoeps)

Doppelt-MS ist eine Erweiterung der normalen MS-Anordnung um eine weitere Niere, die nach hinten gerichtet ist. Da alle Kapseln nahe zusammen angeordnet sind, erfolgt eine Erfassung von Schallintensitätsunterschieden. Der Vorteil von Doppelt-MS liegt darin, dass nur drei Spuren bei der Aufzeichnung benötigt werden. Die Ausgangssignale L/C/R/SL/SR (5.0) werden erst nach einer Dematrixierung gewonnen (Abb. 10.24).

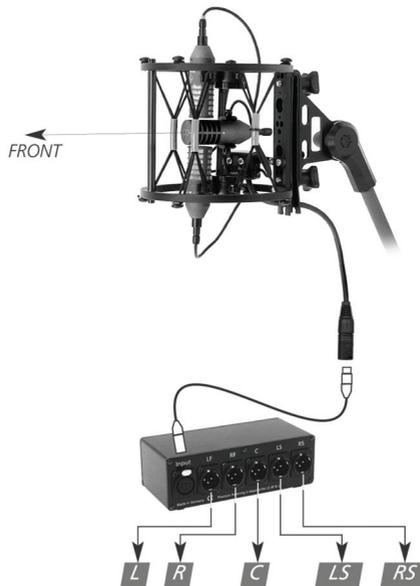


Abb. 10.24: Doppelt-MS von Schoeps
Bildquelle: Schoeps Mikrofone, <http://www.schoeps.de>

10.3.2. Soundfield (Ambisonics)

Beim Soundfield-Mikrofon sind alle Kapseln als Tetraeder nahe zusammen angeordnet und liefern die drei Dimensionen X (vorne/hinten), Y (links/rechts) und Z (oben/unten). Zusätzlich den summierten Gesamtschalldruck W, entsprechend einem Mikrofon mit Kugelcharakteristik (Abb. 10.25).



Abb. 10.25: Die Kapseln des Soundfield-Mikrofons
Bildquelle: SoundField, <http://www.soundfield.com>

Erst der Surround-Prozessor SP451 konvertiert das sog. B-Format des Soundfield-Mikrofons in 5.1-Signale (Abb. 10.26).

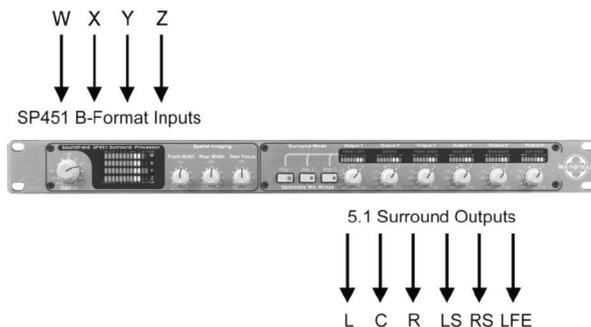


Abb. 10.26: Soundfield-Prozessor
Bildquelle: SoundField, <http://www.soundfield.com>

Die Aufnahmen im B-Format können als Audiodateien (vier einzelne .wav mit jeweils 24 Bit und 48 kHz) gespeichert und in digitalen Audio Workstations wie zum Beispiel ProTools oder Cubase weiterverarbeitet werden. Zur Decodierung wird hier dann das sog. Surround Zone Plug-In benutzt.

10.3.3. INA-5 (Sound Performance Lab)

Die Abkürzung INA-5 steht für „Ideale Nieren-Anordnung“ mit 5 Nierenmikrofonen. Dieses Surroundmikrofonverfahren wurde im Rahmen einer Diplomarbeit an der FH Düsseldorf von Ulf Herrmann und Volker Henkels entwickelt und wird inzwischen von der Firma SPL unter dem Namen Atmos 5.1 vertrieben (Abb. 10.27).³¹

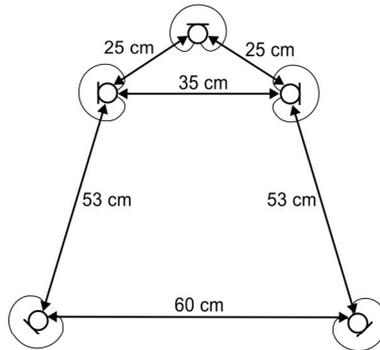


Abb. 10.27: INA-5

Vorteil von INA-5: Es ist ein einfach aufgebautes System, das aufgrund seiner Kompaktheit schnell einsetzbar ist.

Nachteil: Die Mikrofone für die Surroundkanäle sind mit einem Abstand von 53 cm zu den Hauptmikrofonen bei Aufnahmen in geschlossenen Räumen in den meisten Fällen innerhalb des Hallradius. Die Entwickler setzen INA-5 allerdings hauptsächlich für Atmo- und Geräuschaufnahmen an Drehorten für Film und Fernsehen ein und für diese Anwendung ist das System trotz dieser vermeintlichen Schwäche gut geeignet.

10.3.4. OCT mit Surroundweiterung

OCT steht für „Optimal Cardoid Triangle“ (Ideales Nierendreieck). Beim OCT-Frontsystem wird eine Niere für den Center-Kanal verwendet und zwei Supernieren für den linken und rechten Kanal wie in Abb. 10.28 gezeigt wird:

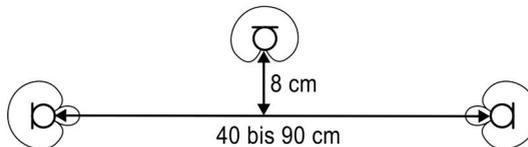


Abb. 10.28: OCT-Frontsystem

³¹ vgl. <http://www.hhton.de/html/surround-theorie.html> (Letzter Seitenaufruf Okt. 2008)

Für die OCT-Anordnung gibt es verschiedene Surround-Erweiterungen:

- In der einfachen Version zwei Kugeln oder Nieren für SL und SR
- Das IRT-Kreuz
- Der Hamasaki-Square

Die Surround-Erweiterungen stehen weit außerhalb des Hallradius, bei großen Hallen 10 bis 15 m von den Hauptmikrofonen entfernt. Um bei der Abmischung Echos zu vermeiden, müssen die Hauptmikrofone entsprechend verzögert werden.³²

10.3.4.1. IRT-Kreuz

Diese Mikrofonanordnung wurde definiert vom Institut für Rundfunktechnik (IRT). Es handelt sich um eine vierkanalige (Quadrophonie-)Aufnahmetechnik mit Nierenmikrofonen für L/R und SL/SR. Die L/R-Signale werden zum Frontsystem dazugemischt, SL und SR sind eigenständige Kanäle.

- Klein-IRT: Abstände 20 bis 25 cm (Abb. 10.29). Anwendung z.B. für Atmo-Aufnahmen für TV und Film
- Groß-IRT: Abstände bis 1 m. Anwendung: Aufnahme von Raumreflexionen und Nachhall z.B. bei Orchesteraufnahmen³³

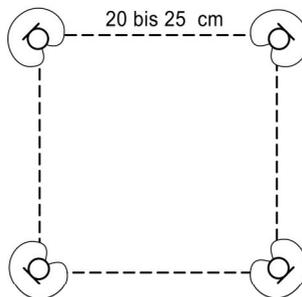


Abb. 10.29: IRT-Kreuz

³² vgl. Görne, 2007, Seite 124

³³ vgl. Görne, 2007, Seite 123

10.3.4.2. Hamasaki-Square

Diese Surround-Mikrofonierung wurde erdacht von Kimio Hamasaki vom NHK Science and Research Laboratory in Japan. Vier Mikrofone mit Achtercharakteristik sind in einem Abstand von ca. 2 bis 3 m angeordnet. Die positiven Hälften der Achten sind nach außen gerichtet (Abb. 10.30). Der Direktschall von Vorne bzw. Reflexionen von der Rückwand des Aufnahme-raums werden dadurch maximal bedämpft.

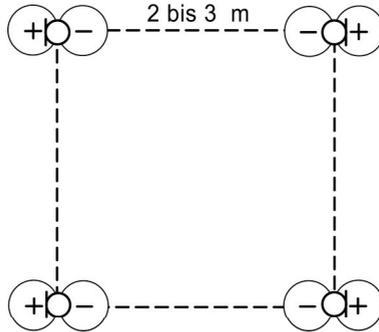


Abb. 10.30: Hamasaki-Square

10.3.5. Kugelflächenmikrofon mit Erweiterung (Schoeps)

Ein Kugelflächenmikrofon wird mit zusätzlichen Achten an den Seiten erweitert, damit sind es insgesamt vier Mikrofone (Abb. 10.31). Die Vorne- / Hinten-Information erhält man erst nach einer MS-Dekodierung.



Abb. 10.31: Surround-Kugelflächenmikrofon (Schoeps KFM360)

Bildquelle: Schoeps Mikrofone, <http://www.schoeps.de>

10.3.6. Holophone (Rising Sun Productions)

Das Holophone ist im Prinzip ein Kugelflächenmikrofon mit einem eiförmigen Körper (Abb. 10.32). Es hat fünf Kapseln für die Richtungskanäle und eine LFE-Kapsel (5.1 Surround).³⁴ Als Zielgruppe sind vorwiegend Film- und Fernsehproduktionen aversiert. So gibt es z.B. ein Holophone in sehr kleiner Ausführung, welches auf einer Videokamera angebracht werden kann.



Abb. 10.32: Holophone

Bildquelle: Rising Sun Productions Limited, <http://www.holophone.com>

³⁴ LFE steht für „Low Frequency Effects“, d.h. für eine spezielles Wiedergabeverfahren für tieffrequente Soundeffekte

10.4. Stützmikrofone

Sowohl bei Stereo- wie auch bei Surround-Aufnahmen werden oftmals zusätzlich zu den Hauptmikrofonen Stützen aufgestellt. Von den Stützmikrofonen erwartet man eine bessere Lokalisation einzelner Instrumente in der Mischung und eine Verbesserung der Klangbalance zwischen Instrumentengruppen.

Verzögerung der Stützsingnale

Die Stützmikrofone sind näher an den Schallquellen als die Hauptmikrofone. Stützsingnale eilen deshalb den Singnalen der Hauptmikrofone voraus. Wenn die Stützen um den richtigen Wert verzögert werden, gewinnt der gesamte Klingeindruck an Natürlichkeit. Berechnung der Verzögerungszeit:

$$\text{Verzögerung } \Delta t = \frac{\text{Abstand Stütze zum Hauptmikrofon } \Delta s}{\text{Schallgeschwindigkeit } c}$$

$$\Delta t = \frac{\Delta s}{c} \quad (\text{Formel 10.1})$$

Einheit [s]

Unter Berücksichtigung des Gesetzes der ersten Welle müssen noch ca. 1 bis 30 ms aufaddiert werden.

Einfügen von Stützmikrofonen bei der Mischung

Es sollte auf die richtige Positionierung der Stützen im Panorama geachtet und der Pegel der Stützmikrofone darf nicht zu hoch angesetzt werden.

Weiterhin ist zu beachten, dass es bei Druckgradientenempfängern und sehr geringem Mikrofonabstand zum Instrument zum Nahbesprechungseffekt kommt, d.h. tiefe Frequenzen werden angehoben. Eventuell muss daher das Klangbild der Stützen mit einem Filter oder EQ angeglichen werden.

Stützen nehmen weniger oder gar kein Raumanteil auf und kommen in der Mischung dadurch „nach Vorne“. Eine Zumischung von künstlichem Hall, der dem natürlichen Nachhall des Aufnahme-raums möglichst ähnlich sein sollte, kann hier Abhilfe schaffen.³⁵

³⁵ vgl. Görne, 2007, Seite 223

10.5. Übungsaufgaben

Aufgabe 1:

Nach welchen Grundlegenden Prinzipien können Stereo-Aufnahmeverfahren unterschieden werden?

Aufgabe 2:

Nenne drei Surround-Aufnahmeverfahren.

Aufgabe 3:

Zeichne in das Diagramm mit den Williams-Kurven die drei genannten gemischten Aufnahmeverfahren ein: ORTF, DIN und NOS. Welchen Aufnahmebereich haben die jeweiligen Mikrofonanordnungen?

Aufgabe 4:

Wo wird der Kunstkopf hauptsächlich eingesetzt?

Aufgabe 5: (Frage bei der Abschlussprüfung Sommer 2001 der IHK Erfurt)

Auf einem Rednerpult mit reflektierender Oberfläche befindet sich ein Rednermikrofon.

- a) Wie nennt man den Effekt, der auf Grund der reflektierenden Oberfläche auftreten kann?
- b) Nenne eine Möglichkeit, um diesen Effekt zu minimieren.



Literaturtipp:

Dickreiter, Michael: Mikrofonaufnahmetechnik.
Stuttgart, Leipzig: Hirzel Verlag.

11. Anpassung und Audioleitungen



Bereits im ersten Lehrjahr sollte der Begriff der elektrischen Anpassung erklärt werden. Daneben auch, welche speziellen Audiosteckverbindungen und -Leitungen zum Einsatz kommen.

11.1. Anpassung

11.1.1. Was ist Anpassung?

Unter Anpassung versteht man das Verhältnis von der Ausgangsimpedanz eines Gerätes zu der Eingangsimpedanz des nachfolgenden Gerätes (Abb. 11.1).¹

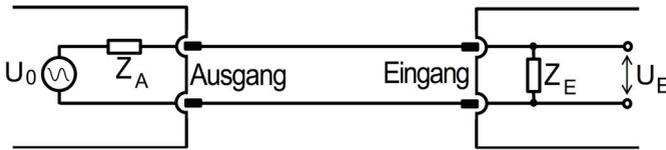


Abb. 11.1: Prinzipschaltbild Anpassung

U_0 : Ausgangswechselspannung [V]

Z_A : Ausgangsimpedanz [Ω]

Z_E : Eingangsimpedanz [Ω]

U_E : Wechselspannung, die an Z_E abfällt [V]

11.1.2. Leistungsanpassung

Sind die Ausgangsimpedanz Z_A und die Eingangsimpedanz Z_E gleich groß, so spricht man von einer Leistungsanpassung:

$$Z_A = Z_E \quad (\text{Formel 11.1})$$

Die übertragene Leistung ist maximal, der Wirkungsgrad η beträgt jedoch höchstens 50%:

$$\eta = \frac{Z_E}{Z_A + Z_E} \quad (\text{Formel 11.2})$$

Beispiel: $Z_A = Z_E = 600 \Omega$

$$\eta = \frac{600 \Omega}{600 \Omega + 600 \Omega} = 0,5$$

¹ Impedanz Z = frequenzabhängiger Wechselstromwiderstand [Ω]

HF-Leitungen und Antennen werden nach dem Prinzip der Leistungsanpassung angeschlossen. Der Nachteil der Leistungsanpassung besteht darin, dass ein linearer Frequenzgang nur mit großem Schaltungsaufwand, d.h. mit hochwertigen und teuren Bauteilen, zu realisieren ist. In der Tontechnik kommt seit der Entwicklung von Transistorschaltungen daher fast ausschließlich das Prinzip Spannungsanpassung zur Anwendung.

11.1.3. Spannungsanpassung

Hierbei ist die Eingangsimpedanz wesentlich größer als die Ausgangsimpedanz:

$$Z_A \gg Z_E \quad (\text{Formel 11.3})$$

Die meisten Audiogeräte haben eine Eingangsimpedanz von ca. 10 k Ω und eine Ausgangsimpedanz von ungefähr 100 Ω , was einem Verhältnis von 100:1 entspricht. Man bezeichnet diesen Fall auch als Überanpassung. Der Vorteil der Überanpassung liegt darin, dass an einen Ausgang auch mehrere Eingänge angeschlossen werden können. Das Ausgangssignal wird in seinem Pegel oder Frequenzgang nicht beeinflusst. Der parallele Anschluss von zehn Geräten an einen Ausgang ist normalerweise kein Problem. Werden allerdings zu viele Geräte parallel zusammengeschaltet, wird irgendwann $Z_E = Z_A$. Die Folge sind lineare und nichtlineare Verzerrungen des Signals.² Der Wirkungsgrad η liegt bei der Spannungsanpassung zwischen 0,5 und 1 (1 = Leerlauf).

11.1.4. Stromanpassung

Bei der Stromanpassung ist die Eingangsimpedanz wesentlich kleiner als Ausgangsimpedanz, man spricht von Unteranpassung:

$$Z_A \ll Z_E \quad (\text{Formel 11.4})$$

Der Wirkungsgrad η liegt hier zwischen 0,5 und 0 (0 = Kurzschluss).

Die Stromanpassung wird zum Beispiel in der Mess- und Regeltechnik angewandt.

² Weniger tiefe Frequenzen; „Der Pegel bricht zusammen“

11.2. Audioleitungen

11.2.1. Leitungsbeläge

11.2.1.1. Widerstandsbelag R'

$$R' = \frac{R}{l} \quad (\text{Formel 11.5})$$

Einheit [$\text{m}\Omega/\text{m}$]

Der Widerstand hängt ab vom Material, dem Querschnitt und der Länge des Leiters. Der Widerstandsbelag beschreibt den ohmschen Widerstand einer Ader im Kabel pro Meter. Beispiel: Der Widerstandsbelag eines üblichen Mikrofonkabels³ beträgt 53Ω auf $1000 \text{ m} = 0,053 \text{ m}\Omega/\text{m}$.

Der Widerstandsbelag erhöht sich mit steigender Frequenz aufgrund der Stromverdrängung im Innern des Leiters, welche durch Induktivität zustande kommt. Bei sehr hohen Frequenzen findet der Stromfluss mehr am Rand des Leiters statt (Skin-Effekt).⁴ Es ist fraglich, ob dies bei einem analogen Audiosignal und handelsüblichen NF-Kabeln zu hörbaren Auswirkungen führt, auch wenn das oft behauptet wird. Bei digitalen Signalen im MHz-Bereich (z.B. bei AES/EBU) kann die Stromverdrängung eine Rolle spielen, aber die für diesen Zweck konzipierte Leitungen und Verbindungen so optimiert, dass die Verluste auch hier vernachlässigbar sind.⁵

11.2.1.2. Kapazitätsbelag C'

$$C' = \frac{C}{l} \quad (\text{Formel 11.6})$$

Einheit [pF/m]

Zwei parallel verlaufende Kabeladern wirken zusammen wie die Platten eines Kondensators, und dieser hat zu hohen Frequenzen hin eine abnehmende Impedanz. Folglich wirkt ein Audiokabel wie ein passiver Tiefpass, und je länger die Leitung, desto mehr Höhenanteile werden aus dem Signal herausgefiltert.⁶

³ Quelle: <http://www.sommercable.com> → Produkte → Meterware → Mikrofonkabel (Seitenaufwurf Oktober 2008)

⁴ vgl. Schiller, 2008, Seite 67

⁵ s. auch: <http://www.sommercable.com> → Wir... → FAQ

⁶ vgl. Schiller, 2008, Seite 68

Beispiel: Der Kapazitätsbelag eines normalen Mikrofonkabels⁷ liegt bei 58 pF/m von Ader zu Ader und von Ader zu Schirm bei 115 pF/m.

Berechnung der Grenzfrequenz f_g der Höhendämpfung:⁸

$$f_g = \frac{1}{2\pi * Z_A * C' * 10^{-12} * \ell}$$

Z_A : Ausgangsimpedanz der Signalquelle

ℓ : Länge des Kabels

10^{-12} : Umrechnungsfaktor [pF] in [F]

11.2.1.3. Induktivitätsbelag L' und Ableitungsbelag G'

Eine Leitung kann als eine in die Länge gezogene Spule betrachtet werden, d.h. bei einem Wechselstrom wird eine Spannung induziert. Dies führt zu einem frequenzabhängigen Widerstand (Impedanz) des Leiters. Der Induktivitätsbelag beschreibt die Induktivität eines Leiters pro Längeneinheit:

$$L' = \frac{H}{l} \quad (\text{Formel 11.7})$$

Einheit [H/m]

Der Ableitungsbelag schließlich beschreibt den Isolationsverlust pro Längeneinheit:

$$G' = \frac{S}{l} \quad (\text{Formel 11.8})$$

Einheit [S/m]

⁷ Quelle: <http://www.sommercable.com> → Produkte → Meterware → Mikrofonkabel

⁸ Quelle für die Formel: <http://www.sengpielaudio.com/Rechner-kabel.htm>
(Seitenaufwurf Oktober 2008)

11.2.2. Pegelverluste bei Lautsprecherkabel

Pegelverluste bei Lautsprecherkabeln sind abhängig vom Leiterquerschnitt, der Kabellänge und der Nennimpedanz des angeschlossenen Lautsprechers. Wie in den Abb. 11.2 bis 11.4 zu erkennen ist, treten weniger Pegelverluste auf bei größerem Leiterquerschnitt, mit kürzeren Kabelstrecken und bei einer höheren Nennimpedanz.

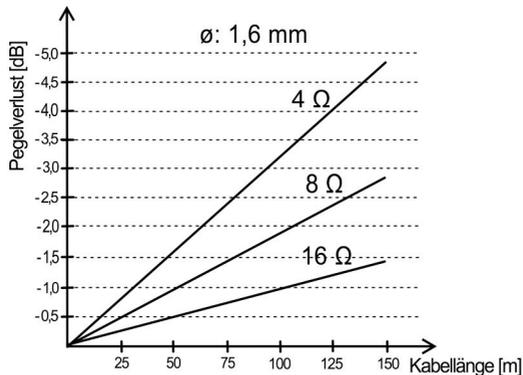


Abb. 11.2: Pegelverluste bei einem Kabel mit 1,6 mm Durchmesser

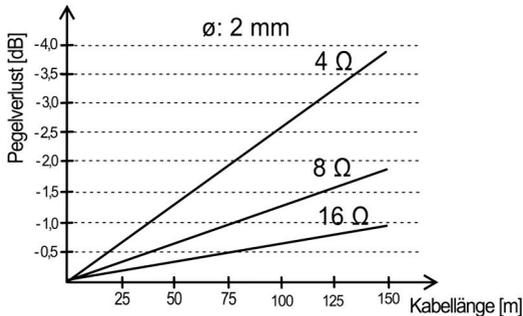


Abb. 11.3: Pegelverluste bei einem Kabel mit 2 mm Durchmesser

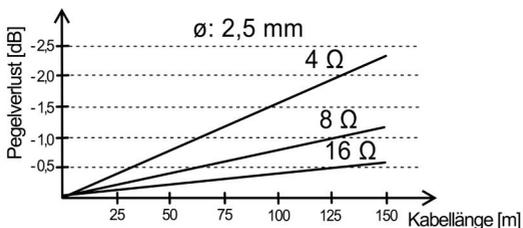


Abb. 11.4: Pegelverluste bei einem Kabel mit 2,5 mm Durchmesser

Bildquellen Abb. 11.2 bis 11.4: McCarthy, 2001, Seite 54

11.2.3. Unsymmetrische Signalführung

Unsymmetrischen Leitungen haben angelötete Cinch-Stecker oder Mono-Klinken. Unsymmetrische Verbindungen sind anfällig für Einstreuungen auf die Leitung, daher sind nur kurze Kabelwege möglich (Abb. 11.5).

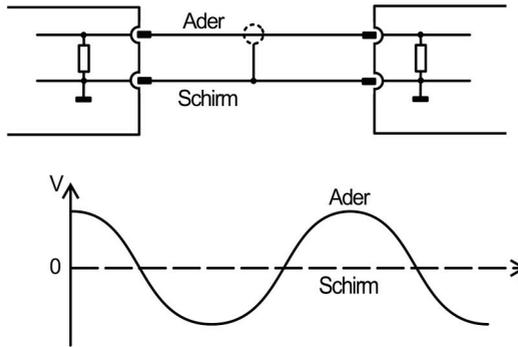


Abb. 11.5: Unsymmetrische Audioleitung
Bildquelle: Dickreiter, 1990, Seite 91

11.2.4. Symmetrische Signalführung

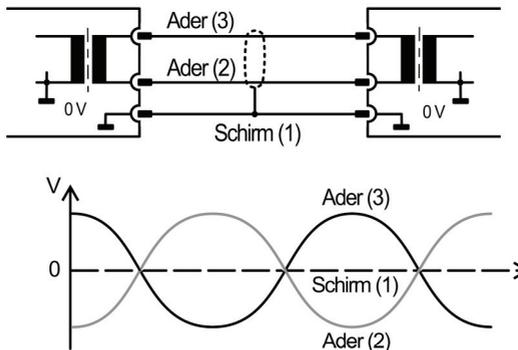


Abb. 11.6: Symmetrische Audioleitung
Bildquelle: Dickreiter, 1990, Seite 91

An unsymmetrischen Kabeln finden sich XLR-Stecker oder Stereoklinken. Abb. 11.6 zeigt eine trafosymmetrische Schaltung mit Aus- und Eingangsübertragern. Daneben gibt es noch die elektronische Symmetrierung, welche mit Operationsverstärkern aufgebaut wird (Abb. 11.7).

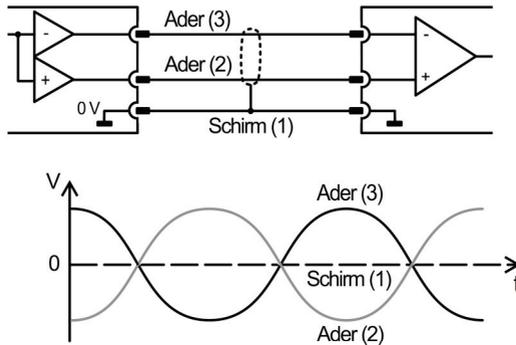


Abb. 11.7: Elektronische Symmetrierung

Tabelle 11.1: Trafo- vs. elektronische Symmetrierung bei Mikrofonen⁹

Trafosymmetrisch	Elektronische Symmetrierung
+ Kaum Probleme mit HF-Einstreuungen	- Nur bis ca. 50 kHz wirklich symmetrisch, daher empfindlich für HF-Störungen (Die Hersteller bauen deswegen HF-Filter ein)
- Teuer, da Trafos nur in geringen Stückzahlen hergestellt werden	+ Kostengünstiger als Trafos
	+ geringere Stromaufnahme; Phantomspannung wird weniger belastet

Andreas Grosser zu Mikrofonen mit elektronischer Symmetrierung:

Viele der neuen [Mikrofon-] Modelle sind impedanzsymmetrisch aber nicht spannungssymmetrisch. Und damit hat man hin und wieder ein Problem. Ein impedanzsymmetrisches Mikrofon sendet auf einem Pin ein negatives oder positives Signal und der andere Pin ist über ein RC-Glied, also eine Widerstand-Kondensator-Kombination, gegen Masse angeschlossen. Der Widerstand wird so gewählt, dass beide Ausgänge den gleichen sendenden Widerstand haben. Das Pult „denkt“ also, es wäre ein symmetrisches Gerät angeschlossen, bekommt aber das Signal nur über einen Pin. Nutze ich aber nur einen Pin, habe ich auf diesem auch einen doppelt so hohen Pegel. Mikrofonvorverstärker, die einen Trafo am Eingang haben, können damit problemlos umgehen. Habe ich aber einen elektronisch symmetrierten Eingang, so erhalte ich einen höheren Klirrfaktor, der sich bei hohen Pegeln noch stärker bemerkbar macht.

(Studio Magazin, Ausgabe 04/2008, Seite 38)

⁹ vgl. Studio Magazin, 04/2008, Seite 38 und 42

Störungen auf symmetrischen Leitungen

Einstreuungen werden bei unsymmetrischen Leitungen an das empfangene Gerät weitergeleitet und sind dort als Störsignal hörbar. Bei symmetrischen Leitungen wirken Einstreuungen auf beide Tonadern gleich ein. Im Eingang des Empfängergerätes wird jedoch die Polarität des Signals einer Ader gedreht. Das Störsignal löscht sich gegenphasig aus, wogegen der Pegel des Nutzsignals durch kohärente Addition sogar um 6 dB angehoben wird (Abb. 11.8).

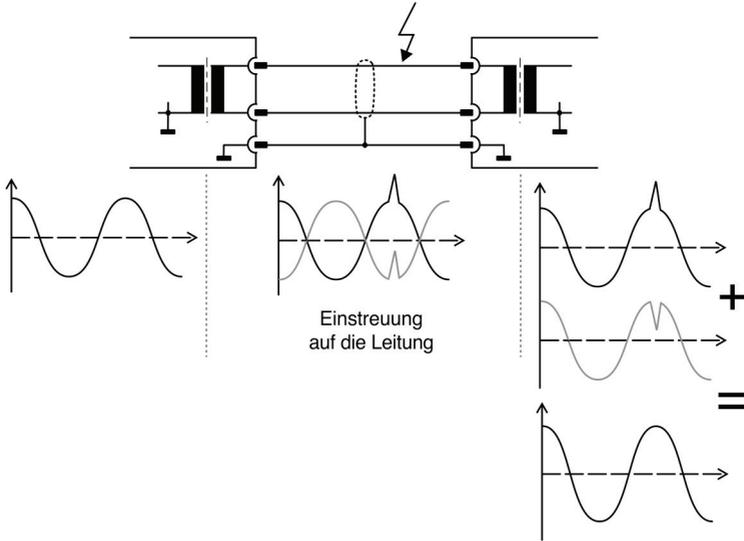


Abb. 11.8: Störung (Einstreuung) bei einer symmetrischen Leitung

11.2.5. DI-Box

Die Abkürzung DI steht für „Direct Injection“. In einer DI-Box wird über einen Trafo ein unsymmetrisches Signal in ein symmetrisches gewandelt (Abb. 11.9).

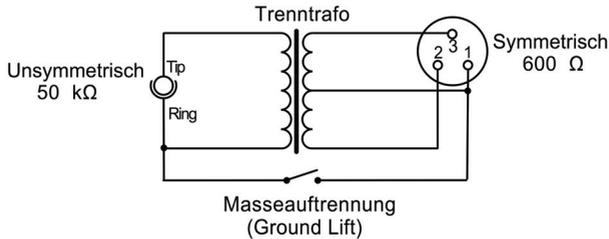


Abb. 11.9: Passive DI-Box

Passive DI-Boxen können in beide Richtungen betrieben werden, aktive DI-Boxen allerdings nicht. Diese haben neben dem Trenntrafo eine Verstärkerschaltung, welche die Betriebsspannung über eine Phantomspeisung vom Mischpult oder durch eine Batterie erhält.



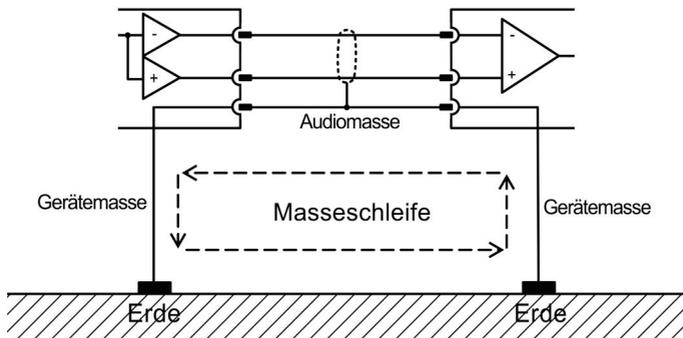
Abb. 11.10: Verschiedene DI-Boxen

11.2.6. Brummschleifen

Wie entsteht eine Brummschleife?

- Die Schutzleiter bilden mit der Abschirmung der Audioleitung eine Masseschleife (Abb. 11.11)
- Durch unterschiedliche ohmsche Widerstände der Netzkabel und Übergangswiderstände der Steckverbindungen resultiert ein ungleiches Erdpotential an den Gehäusen
- Dadurch fließen geringe Ausgleichsströme über den Kabelschirm und den Erdleiter. Folge: Hörbare Brummgeräusche, das sog. „Netzbrummen“

Abhilfe: Auftrennen der Masse der Audioverbindung (z.B. mit Ground-Lift-Schalter oder -Adapter). Niemals den Schutzleiter im Stromkabel auftrennen oder gar am Netzstecker abkleben, da dann bei einem Fehlerstrom im Gerät der FI-Schutzschalter nicht mehr anspricht. Lebensgefahr!

Abb. 11.11: Brummschleife¹⁰

¹⁰ vgl. Pieper, 1996, Seite 272

11.2.7. Steckverbinder und Pinbelegungen



Abb. 11.12: Cinch

Unsymmetrisch Cinch:

Pin = Hot

Sleeve = GND



Abb. 11.13: Unsymmetrische (Mono-) Klinke

Unsymmetrische Klinke:

Tip = Hot

Sleeve = GND



Abb. 11.14: Symmetrische (Stereo-) Klinke

Symmetrische Klinke:

Tip = Hot

Ring = Cold

Sleeve = GND

Stereoklinke:

Tip = L

Ring = R

Sleeve = GND

Insertklinke:

Tip = Send

Ring = Return

Sleeve = GND

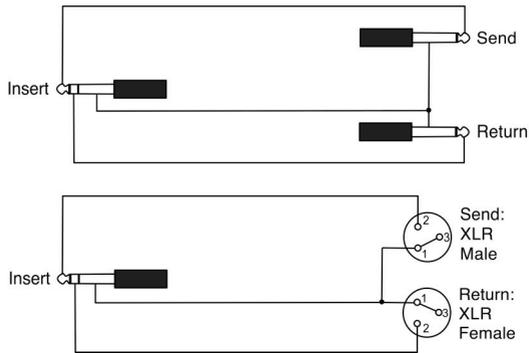


Abb. 11.15: Insertkabel



Abb. 11.16: XLR

XLR für NF-Kabel:

- 1 = GND
- 2 = Hot
- 3 = Cold

XLR für Lautsprecherkabel:

- 1 = -
- 2 = +
- 3 = n.c.



Abb. 11.17: Speakon

NL-4 / Speakon:

- 1+ = Lautsprecher A + (Top)
- 1- = Lautsprecher A - (Top)
- 2+ = Lautsprecher B + (Sub)
- 2- = Lautsprecher B - (Sub)



Abb. 11.18: EP5 (Links) und CA-COM (Rechts)

Beispiel Zweiweglautsprecher UPA-1 und UM-1 von Meyer Sound:

EP4 (USA) und EP5 (Europa):

- 1 = Low +
- 2 = Low -
- 3 = High -
- 4 = High +
- 5 = n.c. (bei EP4 nicht vorhanden)

Cannon CA-COM:

- A = Low -
- B = Low +
- C = n.c.
- D = n.c.
- E = n.c.
- F = n.c.
- G = High -
- H = High +

Bei anderen Lautsprechern sind eventuell abweichende Belegungen gefordert, bitte in den entsprechenden Datenblättern nachschauen!



Abb. 11.19: Lautsprecher-Steckfeld mit XLR und CA-COM

Multicore-Steckverbinder

Beispiel: verriegelbarer Multicore-Stecker von Harting (Abb. 11.20).

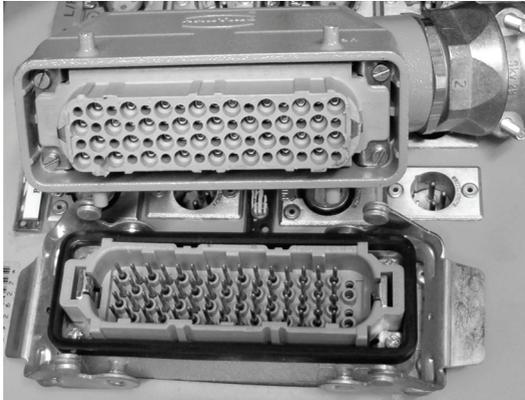


Abb. 11.20: Harting HAN 64

Tabelle 11.2: Belegung HAN 64 mit 20 symmetrischen Wegen

	A	B	C	D
1	1 Hot	2 Hot	3 Hot	4 Hot
2	1 Cold	2 Cold	3 Cold	4 Cold
3	1 GND	2 GND	3 GND	4 GND
4	5 Hot	6 Hot	7 Hot	8 Hot
5	5 Cold	6 Cold	7 Cold	8 Cold
6	5 GND	6 GND	7 GND	8 GND
7	9 Hot	10 Hot	11 Hot	12 Hot
8	9 Cold	10 Cold	11 Cold	12 Cold
9	9 GND	10 GND	11 GND	12 GND
10	13 Hot	14 Hot	15 Hot	16 Hot
11	13 Cold	14 Cold	15 Cold	16 Cold
12	13 GND	14 GND	15 GND	16 GND
13	17 Hot	18 Hot	19 Hot	20 Hot
14	17 Cold	18 Cold	19 Cold	20 Cold
15	17 GND	18 GND	19 GND	20 GND
16	n.c.	n.c.	n.c.	n.c.

Die in Tabelle 11.2 aufgeführte Pin-Belegung für 20 Kanäle mit Einzelmasse wird in vielen deutschen Theatern verwendet, hat aber keine allgemeine Gültigkeit. Bei anderen Anwendungen werden auch abweichende Belegungen verwendet, zum Beispiel für 32 Kanäle mit gemeinsamer Masse.

Beispiel: Amphenol Socapex (Abb. 11.21).

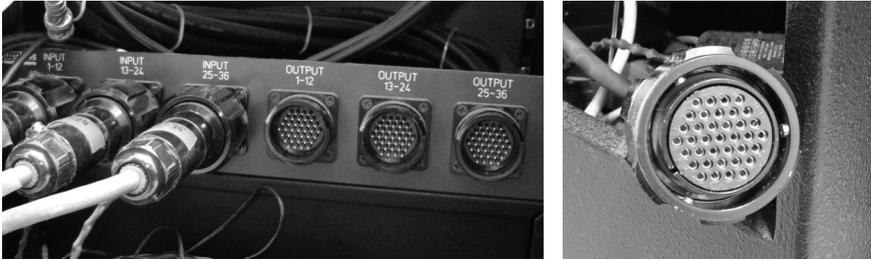


Abb. 11.21: Amphenol Socapex 337P (37-Pin)

Tabelle 11.3: Belegung Socapex 37-Pin mit 12 symmetrischen Wegen

Pin Nr.		Pin Nr.		Pin Nr.		Pin Nr.	
1	1 Hot	10	4 Hot	19	7 Hot	28	10 Hot
2	1 Cold	11	4 Cold	20	7 Cold	29	10 Cold
3	1 GND	12	4 GND	21	7 GND	30	10 GND
4	2 Hot	13	5 Hot	22	8 Hot	31	11 Hot
5	2 Cold	14	5 Cold	23	8 Cold	32	11 Cold
6	2 GND	15	5 GND	24	8 GND	33	11 GND
7	3 Hot	16	6 Hot	25	9 Hot	34	12 Hot
8	3 Cold	17	6 Cold	26	9 Cold	35	12 Cold
9	3 GND	18	6 GND	27	9 GND	36	12 GND
-	-	-	-	-	-	37	n.c.

Auch hier gilt wieder: Es kann je nach Verwendung des Multicores verschiedene Belegungen geben.

11.3. Digitale Signalübertragung

11.3.1. Besondere Anforderungen an digitale Leitungen

Digitale Signale haben hohe Frequenzen im MHz-Bereich, so beträgt z.B. die Bandbreite bei AES/EBU 1,4 bis 11,3 MHz. Wird ein Kupferkabel verwendet, so ist auf den richtigen Wellenwiderstand zu achten.

Lichtwellenleiter (LWL) gibt es aus Kunststoff oder Glasfaser. Die Lichtleitung ist in Kunststoff etwas schlechter als bei einer Glasfaser. Das begrenzt die Länge von Kunststoff-LWL auf maximal 15 m. LWL sind sicher gegen elektromagnetische Störungen. Bei der Verlegung ist auf den minimalen Biegeradius zu achten.

Die digitale Signalübertragung erfolgt nach dem Prinzip von Sender und Empfänger, bei langen Strecken ist eventuell auch ein Leitungstreiber notwendig.

Lichtwellenleiter

Der Lichttransport im LWL erfolgt nach dem Prinzip der Totalreflexion (Abb. 11.22).¹¹ Licht trifft unter einem bestimmten Winkel auf die Grenzfläche von einem optisch dichteren Medium mit dem Brechungsindex n_1 (lichtleitender Kern) zu einem optisch dünneren Medium mit dem Brechungsindex n_2 (Mantel) und wird reflektiert.

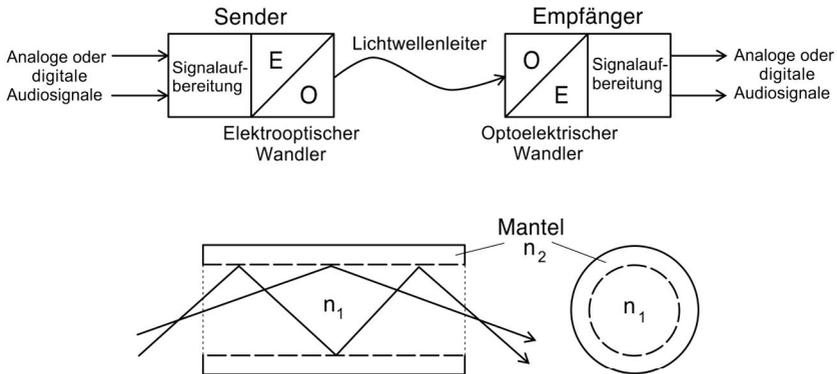


Abb. 11.22: Lichtwellenleiter¹²

Der Reflexionswinkel α berechnet sich nach Snellius:¹³

$$\sin \alpha = \frac{n_2}{n_1} \quad (\text{Formel 11.9})$$

Multi Mode Fiber (MMF)

Die Lichtstrahlen werden an der Grenzschicht zwischen Kern und Mantel häufig und unterschiedlich reflektiert. Die Folge sind verschiedene Laufzeiten der Lichtstrahlen. MMF-Lichtleiter sind daher für die Übertragung über große Distanzen nicht geeignet. Bei einer Gigabit-Verbindung beträgt die maximale Übertragungsstrecke bis zu zwei Kilometern.

Single Mode Fiber (SMF)

SMF-Lichtwellenleiter haben einen sehr kleinen Kerndurchmesser und das Licht wird dadurch parallel zur Achse übertragen. Es sind mit bis zu 80 Kilometern wesentlich längere Übertragungsstrecken möglich.

¹¹ vgl. Wirsum, 1991, Seite 182 und 183

¹² vgl. Wirsum, 1991, Seite 182

¹³ Willebrord van Roijen Snell (1580 – 1626), niederländischer Astronom und Mathematiker; vgl. Mueller, 2004, Seite 47

11.3.2. Digitale Kabel und Stecker

- Symmetrische Leitungen mit XLR-Stecker bei AES/EBU-Signalen
- Unsymmetrische Koaxialkabel mit Cinch-Stecker für S/P-DIF oder mit BNC-Stecker für MADI (Abb. 11.23)

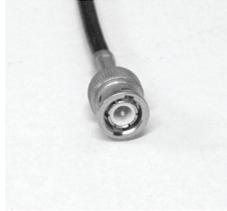


Abb. 11.23: BNC

- Mehradrige Leitungen z.B. bei T-DIF mit 8 Kanälen mit Sub-D 25p-Stecker (Abb. 11.24)



Abb. 11.24: T-DIF

Tabelle 11.4: Belegung T-DIF-Stecker

Pin	Belegung	Pin	Belegung	Pin	Belegung	Pin	Belegung
1	Out 7/8+	7	In //8+	13	GND	19	GND
2	GND	8	GND	14	Out 7/8-	20	In 7/8-
3	Out 5/6-	9	In 5/6-	15	Out 5/6+	21	In 5/6+
4	Out 3/4+	10	In 3/4+	16	GND	22	GND
5	GND	11	GND	17	Out 3/4-	23	In 3/4-
6	Out 1/2-	12	In 1/2-	18	Out 1/2+	24	In 1/2+
-	-	-	-	-	-	25	GND

- Kunststoff-Lichtwellenleiter mit TosLink-Steckverbindern für ADAT-Signale (Abb. 11.25).



Abb. 11.25: TosLink

- Glasfaserkabel mit LC-Duplex Steckverbindern (Abb. 11.26), auch in stabilen Ausführungen mit Metallgehäuse wie zum Beispiel das OpticalCon von Neutrik.



Abb. 11.26: LC-Duplex

Bildquelle: Belkin International, Inc, <http://www.belkin.com>

11.4. Übungsaufgaben

Aufgabe 1:

Wie sind die Kontakte 1 bis 3 in einem XLR-Stecker belegt (europäische Norm, symmetrische Signalführung)?

Aufgabe 2:¹⁴

Wie erreicht man bei zwei zusammen geschalteten Geräten der Elektrotechnik mit einem Ausgangswiderstand R_A und einen Eingangswiderstand R_E ...

... Leistungsanpassung?

... Spannungsanpassung?

... Stromanpassung?

Aufgabe 3:

a) Berechne die Grenzfrequenz f_g der Höhendämpfung eines 10 m langen Instrumentenkabels, welches eine Kapazität zwischen Ader und Schirm von 75pF auf einen Meter hat. Das Kabel wird für eine E-Gitarre verwendet; die Ausgangsimpedanz des Tonabnehmers beträgt 10 k Ω .

b) Stelle dieselbe Berechnung wie bei a) auf, aber jetzt ist das Kabel 20 m Lang. Ist ein Instrumentenkabel mit dieser Länge sinnvoll? Begründe die Antwort.

c) Berechne die Grenzfrequenz f_g für ein symmetrisches Kabel von 100 m Länge (Leitung eines Multicores). Die maximale Kapazität tritt hier zwischen einer Ader und dem Schirm auf und beträgt 130 pF/m. Ein daran angeschlossenen Mikrofon hat eine Ausgangsimpedanz von 200 Ω .

d) Warum ist es sinnvoll, einen E-Bass mit Hilfe einer DI-Box an ein Mischpult anzuschließen?

Aufgabe 4:

Recherchiere (in Literatur und/oder im Internet): Was sind die Vorteile eines Lichtwellenleiters für die Übertragung von digitalen Audiodaten?



Literaturtipp:

Dickreiter, Michael: Handbuch der Tonstudioteknik.
München: Saur Verlag.

¹⁴ vgl. Meyer-Schwarzenberger, 1976, Pegel B, Seite 45

12. Digitale Audiosignale



In diesem Kapitel werden die Grundlagen digitaler Audiosignale behandelt. Der Rahmenlehrplan sieht diese Thematik für das erste Lehrjahr vor.

12.1. Zahlensysteme

Digitale Geräte rechnen mit binären Zahlen, d.h. ausschließlich mit den Ziffern 0 und 1. Als Anwender rechnen wir aber mit Dezimalzahlen von 0 bis 9. Als Einleitung in das Thema Digitaltechnik folgt daher ein kurz gefasster Vergleich von Dezimal- und Dualsystem, bevor digitale Audioschaltungen vorgestellt werden.

12.1.1. Dezimalsystem

- Die Basis ist die Zahl „10“
- Zeichenvorrat $Z = \{0, 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9\}$
- Beispiel einer Zeichenkette: 4 7 1 1
- Stellenwertsystem: 3. 2. 1. 0. Stelle
- Berechnung der Dezimalzahl: $4 \cdot 10^3 + 7 \cdot 10^2 + 1 \cdot 10^1 + 1 \cdot 10^0 = 4711_{10}$

12.1.2. Dualsystem

- Die Basis ist die Zahl „2“
- Zeichenvorrat $Z = \{0, 1\}$
- Beispiel einer Zeichenkette: 1 0 1 1
- Stellenwertsystem: 3. 2. 1. 0. Stelle
- Berechnung der Dezimalzahl: $1 \cdot 2^3 + 0 \cdot 2^2 + 1 \cdot 2^1 + 1 \cdot 2^0 = 11_{10}$

12.1.3. Bitfolgen

Eine Bitfolge ist eine Zeichenkette aus Binärzahlen. Beispiel: 1011 1010 1101.

Bitfolgen werden häufig in Gruppen von 4 Bit aufgeteilt, um sie besser lesbar darstellen zu können. Für eine Bitfolge mit 4 Bit kann alternativ auch ein Zeichen aus dem Zeichensatz $\{0, 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9, A, B, C, D, E, F\}$ verwendet werden, dem sog. Hexadezimalcode (Tabelle 12.1).

Tabelle 12.1: Hexadezimalcode

0000 = 0 _{Hex}	1000 = 8 _{Hex}
0001 = 1 _{Hex}	1001 = 9 _{Hex}
0010 = 2 _{Hex}	1010 = A _{Hex}
0011 = 3 _{Hex}	1011 = B _{Hex}
0100 = 4 _{Hex}	1100 = C _{Hex}
0101 = 5 _{Hex}	1101 = D _{Hex}
0110 = 6 _{Hex}	1110 = E _{Hex}
0111 = 7 _{Hex}	1111 = F _{Hex}

Beispiel einer Zeichenkette in Hexadezimalcode: 4 F 8_{Hex} (= 0100 1111 1000).

Anwendung: MIDI-Befehle können in Hexadezimalcode angegeben werden.

Zeichenketten mit Binärzahlen tragen je nach Anzahl der Bits verschiedene Bezeichnungen (Tabelle 12.2).

Tabelle 12.2: Bezeichnung für Bitfolgen

Anzahl der Stellen	Bezeichnung	Anzahl verschiedener Kombinationen
1	Bit	$2^1 = 2$
4	Halfbyte oder Nibble	$2^4 = 16$
8	Byte	$2^8 = 256$
16	Double Byte	$2^{16} = 65\,536$
24	-	$2^{24} = 16\,777\,216$
32	Word	$2^{32} = 4\,294\,967\,296$
64	Long Word	$2^{64} \approx 2 * 10^{19}$

Anmerkung: In der Datenverarbeitung bezeichnet „kilo“ nicht 1000, sondern $2^{10} = 1024$ und „Mega“ nicht 10^6 , sondern $2^{20} = 1\,048\,576$.

12.2. Pulse Code Modulation (PCM)

Das Prinzip der Pulse Code Modulation eignet sich sehr gut, um den Signalfloss bei der A/D- und D/A-Wandlung darzustellen. Die einzelnen Funktionsblöcke von Abb. 12.1 werden der Reihe nach erklärt.

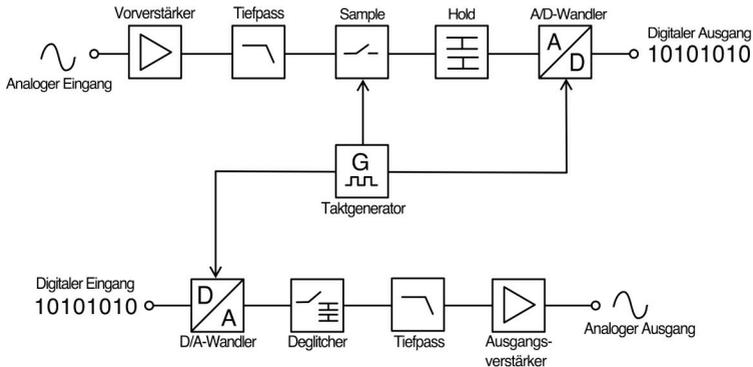


Abb. 12.1: Signalfloss PCM

12.2.1. Vorverstärker



Aufgabe der Vorverstärkers: Verstärkung des analogen Eingangssignals, um die optimale Aussteuerung bei der folgenden Wandlung zu erreichen.

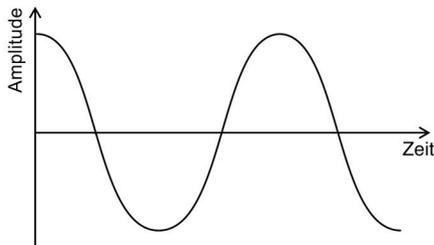


Abb. 12.2: Analoges Eingangssignal

Das analoge Signal wie in Abb. 12.2 ist...

...zeitkontinuierlich

...wertkontinuierlich

12.2.2. Tiefpassfilter im Eingang



Der Tiefpassfilter im Eingang dient dazu, hohe Tonfrequenzen herauszufiltern und wird aufgrund seiner Funktion auch Anti-Aliasing-Filter genannt (s.u.).

12.2.3. Signalabtastung (Sample)



Das gefilterte analoge Eingangssignal wird durch die Signalabtastung in gleichmäßigen Zeitabständen im Takt der Abtastfrequenz „zerhackt“ (Abb. 12.3).

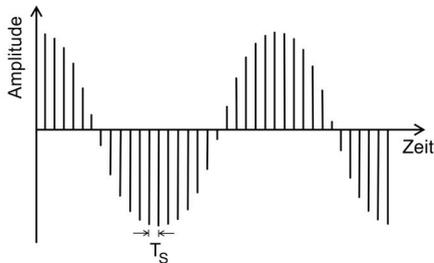


Abb. 12.3: Abtastung

12.2.3.1. Abtastfrequenz f_s

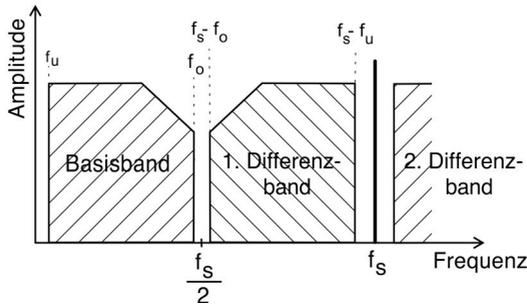
$$f_s = \frac{1}{T_s} \quad (\text{Formel 12.1})$$

T_s : Periodendauer (Zeitdauer zwischen zwei abgetasteten Signalen)

Beispiele:

- Abtastfrequenz Audio-CD = 44,1 kHz $\rightarrow T_s = 1 / 44100 \text{ Hz} = 22,7 \mu\text{s}$
- Abtastfrequenz Audio-DVD = 96 kHz $\rightarrow T_s = 1 / 96000 \text{ Hz} = 10,4 \mu\text{s}$

Das Frequenzspektrum des zu wandelnden Tonsignals nennt man Basisband. Durch Überlagerung von Basisband und Abtastfrequenz f_s entstehen Differenz- und Summenbänder (Abb. 12.4).

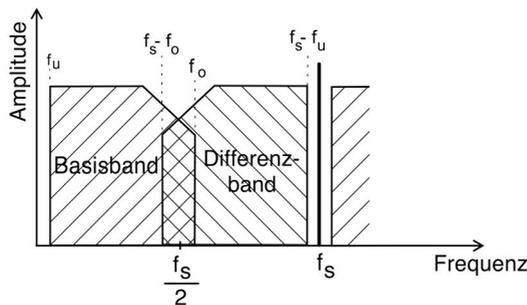
Abb. 12.4: Abtasttheorem erfüllt¹

Für die Abtastfrequenz gilt das Abtasttheorem nach Shannon.² Um ein analoges Signal mit begrenzter Bandbreite exakt digital abbilden zu können, muss die Abtastfrequenz mehr als doppelt so hoch sein wie die höchste zu übertragende Frequenz:

$$f_s \geq f_0 * 2 \quad (\text{Formel 12.2})$$

12.2.3.2. Unterabtastung

Wird f_s zu tief angesetzt, so überlappen sich Basis- und Differenzband. Die Folge sind nichtlineare Verzerrungen im Höhenbereich (=Aliasing-Fehler). Bei einer späteren D/A-Wandlung kann das Signal nicht mehr störungsfrei rekonstruiert werden (Abb. 12.5).

Abb. 12.5: Unterabtastung³

Da z.B. bei der Audio-CD die Abtastfrequenz 44,1 kHz beträgt, darf das Basisband nach dem Abtasttheorem nur bis 22,5 kHz reichen. Um das zu gewährleisten, ist vor dem Wandler ein Tiefpassfilter geschaltet (s.o.).

¹ vgl. SRT, 2000, Band 2, Seite 141

² Claude Elwood Shannon (1916 – 2001)

³ vgl. SRT, 2000, Band 2, Seite 141

12.2.4. Haltestufe (Hold)



Durch die Haltestufe werden die Spannungswerte für die Zeitdauer einer Abtastperiode gehalten (Abb. 12.6).

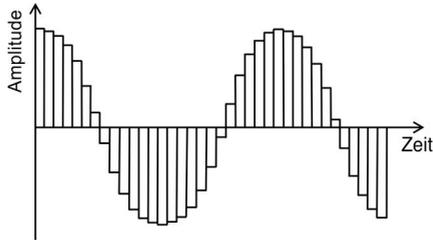


Abb. 12.6: Haltestufe

→ Puls Amplituden Modulation (PAM).

Das PAM-Signal ist...

...zeitdiskret

...wertkontinuierlich

12.2.5. A/D-Wandler



Der eigentliche A/D-Wandler übersetzt schließlich die Spannungswerte in binäre Codes (Abb. 12.7).

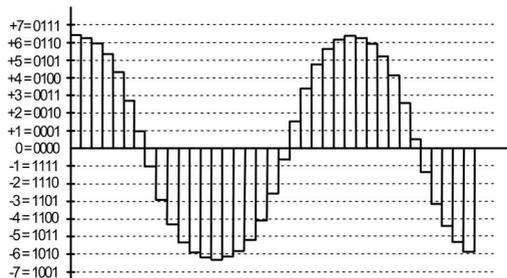


Abb. 12.7: Quantisierung

→ Pulse Code Modulation. Das PCM-Signal ist...

...zeitdiskret

...wertdiskret

12.2.5.1. Quantisierung

Quantisierung ist die Umwandlung der Amplituden- und Zeitwerte des PAM-Signals in digitale Zahlenwerte des Binärsystems. Die Quantisierung erfolgt z.B. für die Audio-CD mit einer Auflösung von 16 Bit und bei der Audio-DVD mit 24 Bit.

Quantisierungsfehler: Fallen zwei unterschiedliche Amplitudenwerte in das gleiche Quantisierungsintervall, so werden beide mit der gleichen Binärzahl gewandelt. Als nichtlineare Verzerrungen sind diese Fehler nicht mehr zu beheben und äußern sich bei der Wiedergabe als hörbares Quantisierungsrauschen.

12.2.5.2. Dither

Durch Hinzufügen eines Zufall-Rauschsignals (engl.: Dither Noise) vor der D/A-Wandlung wird das Quantisierungsrauschen subjektiv verringert. Dither sollte auch beim Requantisieren von Audiodateien verwendet werden, d.h. wenn eine 24-Bit-Datei in eine 16-Bit-Datei gewandelt wird (Abb. 12.8).⁴

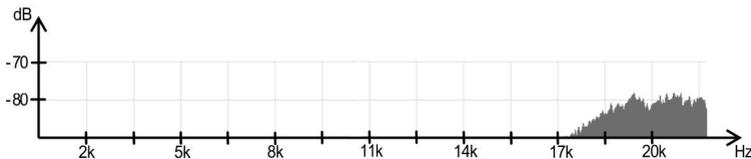


Abb. 12.8: Spektrum Dither Noise (Apogee UV 22)

12.2.5.3. Noise Shaping

Beim Noise Shaping wird die Energie des Quantisierungsrauschens in einen höheren Bereich im Frequenzspektrum verschoben, in welchem das menschliche Gehör weniger empfindlich ist.⁵

12.2.5.4. Signal-Rausch-Abstand (engl.: Signal to Noise Ratio = SNR)

Eine vereinfachte Berechnungsformel für den Signal-Rausch-Abstand bei der Pulse-Code-Modulation lautet:⁶

$$\text{SNR} = N * 6,02 + 1,76 \text{ dB} \quad (\text{Formel 12.3})$$

N : Quantisierungsstufen

Bei einer Quantisierung mit 16 Bit beträgt der theoretische Signal-Rausch-Abstand für ein Sinussignal mit Vollaussteuerung 98,1 dB_R. Mit 24 Bit liegt der theoretische SNR bei 146,26 dB_R.

⁴ vgl. Görne, 2006, Seite 165

⁵ vgl. Görne, 2006, Seite 166

⁶ vgl. Görne, 2006, Seite 166

12.2.5.5. Emphasis

Analoge Signale können vor der Digitalisierung mit einer Pre-Emphase versehen werden, d.h. die Pegel werden zu den hohen Frequenzen hin angehoben. Dadurch erreicht man eine Verbesserung des Signal-Rausch-Abstands in diesem Frequenzbereich. Durch gegenläufige De-Emphase auf der Empfängerseite werden die Pegel wieder in das richtige Verhältnis gebracht (Abb. 12.9).

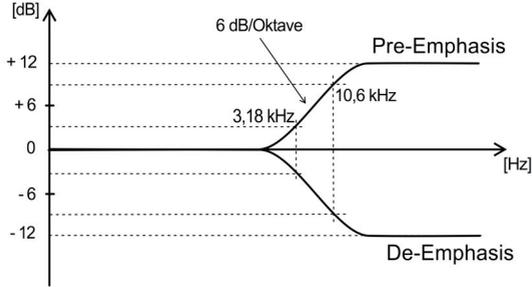


Abb. 12.9: Emphasis (50/15 μ s)

Bildquelle: Rumsey, 1991, Seite 58

Mit der Pre-Emphase werden hohe Frequenzen mit geringen Pegeln vor der Digitalisierung verstärkt und erfahren dadurch das gleiche Quantisierungsrauschen wie höherpegelige tiefe Signale. Durch die De-Emphase auf der Empfängerseite wird das Quantisierungsrauschen aber wieder im gleichen Verhältnis gemindert und stört damit subjektiv nicht mehr.

12.2.6. D/A-Wandler



Der D/A-Wandler überführt die binären Zahlenwerte zurück in Amplitudenwerte einer elektrischen Spannung (Abb. 12.20).

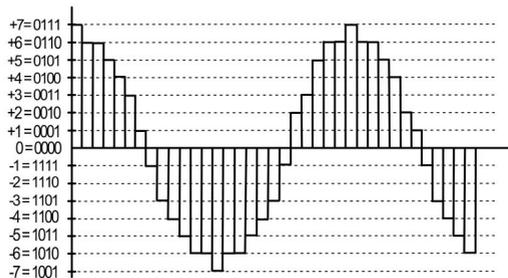


Abb. 12.10: D/A-Wandlung

12.2.7. De-Glitcher , Tiefpass und Ausgangsverstärker



Der De-Glitcher glättet die Schaltflanken, die durch den D/A-Wandler entstehen. Der Tiefpass dient dazu, die Abtastfrequenz und die Summen- und Differenzbänder herauszufiltern. Der Ausgangsverstärker schließlich bringt das Audiosignals auf Normpegel (Abb. 12.11).

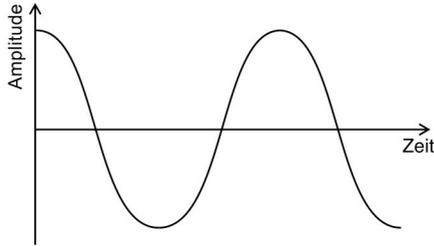


Abb. 12.11: Analoges Ausgangssignal

12.2.8. Taktgenerator



Der Taktgenerator erzeugt die zur Wandlung benötigte Abtastfrequenz f_s (Abb. 12.12).

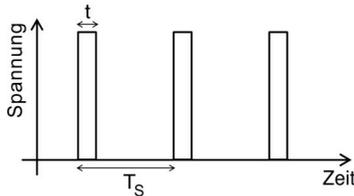


Abb. 12.12: Abtastimpuls

Berechnung des Tastgrades:

$$\text{Tastgrad} = \frac{t}{T_s} = t * f_s \quad (\text{Formel 12.4})$$

Wird in [%] angegeben

t : Impulsdauer

T_s : Periodendauer ($= 1 / \text{Abtastfrequenz } f_s$)

12.3. Pulse Width Modulation (PWM)

Bei der Pulse Code Modulation bleibt der Tastgrad immer konstant. Ein anderes Verfahren, das zur A/D-Wandlung eingesetzt wird, ist die Pulsweitenmodulation (engl.: Pulse Width Modulation) eingesetzt. Hier wird der Tastgrad bei konstanter Frequenz moduliert (Abb. 12.13).

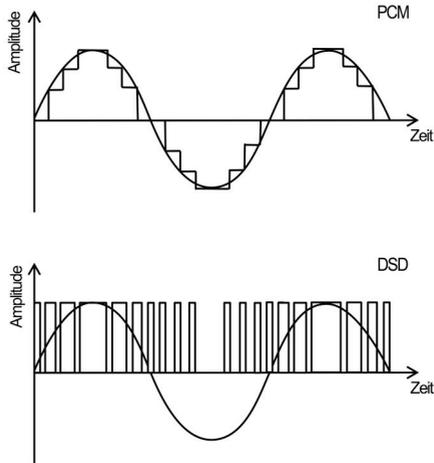


Abb. 12.13: Vergleich PCM und DSD

Das Pulsweiten-Signal wird durch eine Schaltung, die sich 1-Bit-Wandler nennt, erzeugt (Abb. 12.14):

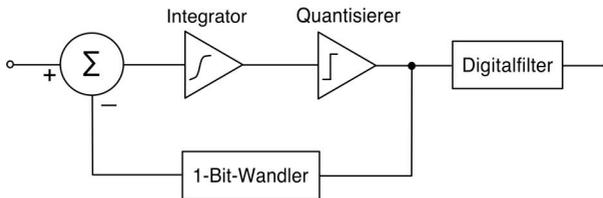


Abb. 12.14: 1-Bit-Wandler⁷

1-Bit-Wandler haben ein hohes Wandlungsrauschen, und daher ist ein anschließendes Noise Shaping absolut notwendig. Das Rauschen liegt danach bei Frequenzen oberhalb von 20 kHz. Der theoretische Signal-Rausch-Abstand beträgt 120 dB_R.

⁷ vgl. <http://de.wikipedia.org/wiki/Delta-Sigma-Modulation> (Seitenaufwurf Oktober 2008)

Eine sehr anschauliche Erklärung des 1-Bit-Wandlers findet sich im Internet auch unter: http://www.beis.de/Elektronik/DeltaSigma/DeltaSigma_D.html (Oktober 2008)

Die Pulsweitenmodulation wird zum Beispiel bei der Super Audio CD (SACD) bzw. bei der Wandlung nach dem Prinzip des Direct Stream Digital (DSD) eingesetzt (Abb. 12.15).



Abb. 12.15: Signalfluss bei DSD

Da immer nur jeweils ein Bit gewandelt werden kann, muss die Abtastfrequenz sehr viel höher sein im Vergleich zur Pulse Code Modulation. Die Abtastfrequenz bei der SACD beträgt 2,8224 MHz, das entspricht 64-mal der CD-Abtastfrequenz mit nur 44,1 kHz (= 64-faches Oversampling). Das Audio-Basisband der SACD reicht hinauf bis 100 kHz.

12.4. Kanal-Codes

12.4.1. Was muss ein Kanal-Code leisten?

Um ein Datensignal verlustfrei übertragen zu können, müssen folgende Punkte beachtet werden:

- Der Kanal muss die volle Bandbreite des digitalen Signals übertragen können
- Auch Gleichspannungsanteile, d.h. lange Folgen von Nullen oder Einsen müssen übertragen werden können
- Die zeitliche Zuordnung der einzelnen Bits muss beim Auslesen wieder hergestellt werden können
- Der Code muss verpolungssicher sein

12.4.2. Beispiele für Kanal-Codes

12.4.2.1. RZ-Code

RZ = Return to Zero

Bei jeder 1 überschreitet das Signal die Nullspannungslinie. Eine binäre 0 entspricht einer Spannung von 0 Volt (Abb. 12.16). Der Gleichspannungsanteil des RZ-Codes ist sehr hoch und es zwingend ein Taktsignal erforderlich.

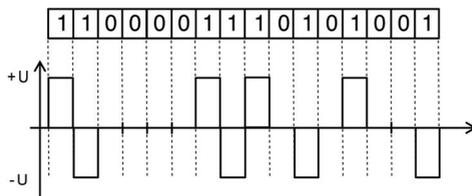


Abb. 12.16: RZ-Code

12.4.2.2. NRZ-Code

NRZ = Non Return to Zero

Bei *keinem* Bitwechsel wird die Nulllinie überschritten. Der NRZ-Code hat einen hohen Gleichspannungsanteil und demnach ist ein Taktsignal erforderlich.

Beispiel: NRZL (Level)

1 = High

0 = Low (0 V)

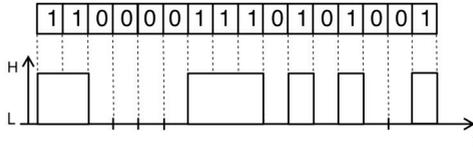


Abb. 12.17: NRZL-Code

Beispiel: NRZI (Invers)

1 = Potentialwechsel am Bitende

0 = Keine Änderung des Potentials

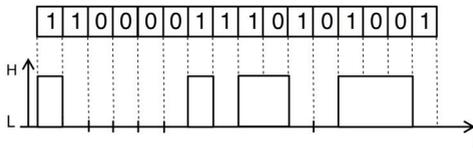


Abb. 12.18: NRZI-Code

12.4.2.3. Biphas-Mark-Code

1 = Potentialwechsel in Bitmitte und am Bitende

0 = Potentialwechsel nur am Bitende

Vorteile: Der Biphas-Mark-Code ist ein selbsttaktendes Signal ohne Gleichspannungsanteil.

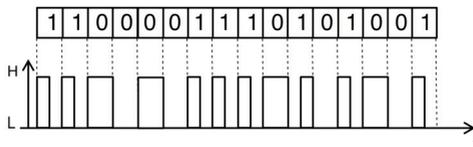


Abb. 12.19: Biphas-Mark-Code

12.5. Maßnahmen zur Verhinderung von Datenverlust

Warum treten Fehler bei der Speicherung oder Übertragung von digitalen Daten auf?

- Bei Magnetbändern: Dropouts durch Abheben des Bandes von der Kopftrommel oder verschmutzte Köpfe
- Bei optischen Speichermedien: Kratzer oder Schmutz auf der Oberfläche
- Bei der drahtlosen Tonübertragung: unzureichende Empfangsstärken

12.5.1. Fehlererkennung

Eine Fehlererkennung kann auf eine bidirektionale Kommunikation beruhen. Der Empfänger erkennt durch zusätzlich übertragene Prüfsummen fehlerhafte Datenpakete. Die Fehler werden aber nicht korrigiert, sondern die Daten erneut angefordert und durch den Sender wiederholt übertragen. Beispiel: Bluetooth-Systeme zur Audioübertragung.

12.5.2. Fehlerverschleierung

Beispiel Digital Audio Broadcast (DAB): Bei gestörter Übertragung ist neben einer Fehlerkorrektur auch eine Fehlerverschleierung vorgesehen. Dies geschieht durch kurzzeitiges Umschalten auf Mono-Wiedergabe oder Ersetzen des gestörten Stereokanals durch das Signal des jeweils anderen Kanals.

12.5.3. Fehlerkorrektur

- Hold / Mute: Bei fehlenden Bits wird der vorhergehende Wert gehalten (Hold) oder der Ausgang stummgeschaltet (Mute)
- Interpolation: Fehlerhafte Bits werden neu berechnet als Durchschnittswert des vorherigen und des nachfolgenden Wertes
- Cyclic Redundancy Check (CRC): Als redundante Daten werden zusätzliche Prüfsummen übertragen. Der fehlerhafte Wert kann mit Hilfe der Prüfsummen wieder voll hergestellt werden. Beispiele: Audio-CD und DVD
- Interleaving: Verschachtelung der Datenbytes. Fehler werden dadurch statistisch gleichmäßig verteilt. Eine anschließende Fehlerkorrektur liefert somit bessere Ergebnisse

12.6. Digitale Audioprotokolle

12.6.1. AES/EBU nach der AES3-Norm

Über eine AES/EBU-Kabelverbindung werden zwei digitale Audiokanäle übertragen. Die Datenübertragung erfolgt Blockweise, dabei ist ein Block in 192 Frames unterteilt. Ein Datenframe besteht wiederum aus zwei Subframes, welche jeweils 32 Bit lang sind. Subframe 1 beinhaltet die Tondaten von Kanal 1 (Links) und Subframe 2 die Daten von Kanal 2 (Rechts):

- AES/EBU-Datenblock = 192 Frames
- 1 Frame = 2 Subframes
- 1 Subframe = 32 Bit

In einem Subframe können Audiosamples mit maximal 24 Bit Wortlänge übertragen werden. Bei kleineren Wortlängen können die nicht genutzten Bits für andere Zwecke verwendet werden, als sog. Auxiliary Sample Bits (Tabelle 12.3 und 12.4).

Tabelle 12.3: AES/EBU Bitverteilung im Subframe mit 24 Bit Audio

0 bis 3:	4 bis 27:	28:	29:	30:	31:
Preamble	Audio Sample Word (24 Bit)	Validity	User Data	Channel Status	Parity

Tabelle 12.4: AES/EBU Bitverteilung im Subframe mit 16 Bit Audio

0 bis 3:	4 bis 11:	12 bis 27:	28:	29:	30:	31:
Preamble	Auxiliary	Audio Sample Word (16 Bit)	Validity	User Data	Channel Status	Parity

AES/EBU Interface

Abb. 12.20 zeigt das Prinzip von AES/EBU-Sender und -Empfänger.

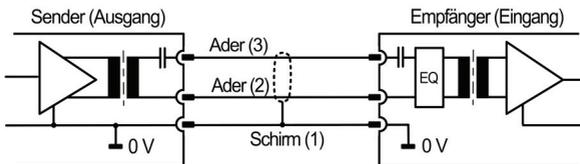


Abb. 12.20: Symmetrisches AES/EBU Interface

Bildquelle: Rumsey, 1991, Seite 147

EQ : Entzerrung des Kabelweges durch einen gegenläufigen Frequenzgang zur Kabeldämpfung.

AES/EBU mit symmetrischen Anschlüssen

Es werden symmetrische Kabel mit 110Ω Impedanz und XLR-Stecker verwendet. Die Signalamplitude beträgt 2 bis $7 V_{SS}$, die Bandbreite 1,4 bis 11,3 MHz. Das AES/EBU-Signal ist ein selbsttaktender Biphase-Mark-Code, aber eine zentrale Taktversorgung ist dennoch möglich.

Unsymmetrische Anschlüsse bei AES/EBU

Das Interface mit unsymmetrischen Anschlüssen wurde eingeführt, damit Rundfunkanstalten die schon vorhandene Videoverkabelungen auch für die digitale Tonübertragung nutzen können. Es werden hier Koaxialkabel mit 75Ω Impedanz und BNC-Stecker verwendet.

12.6.2. S/P-DIF

S/P-DIF wurde für den Consumer-Markt entwickelt. Als zusätzlicher Kopierschutz gibt es hier ein Copy-Bit. Ansonsten wurde das Datenformat ähnlich dem AES/EBU-Standard definiert, aber mit anderen Channel-Status-Bytes. Diese beinhalten die sog. Category Codes:

- General Category = 0000 0000
- Compact Disc (CD) = 1000 0000
- Digital Audio Tape (DAT) = 1100 0000
- PCM-Wandler (z.B. Sony PCM) = 0100 0000

Der Empfänger interpretiert je nach Category Codes einzelne Bits des Channel Status unterschiedlich; Zum Beispiel als Start- und Pausenzeiten bei der Audio-CD. Für die Signalübertragung werden Koaxialkabel mit Cinch-Stecker (75Ω , Signalamplitude $1 V_{SS}$) oder auch Lichtwellenleiter mit TosLink-Stecker verwendet. In Abb. 12.21 sehen wir einen S/P-DIF-Sender und –Empfänger; Beide sind mit einem Koaxialkabel verbunden.

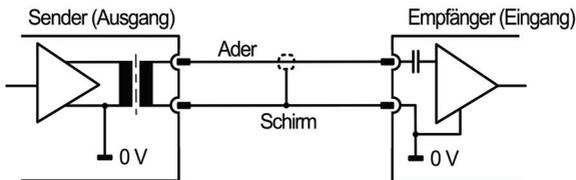


Abb. 12.21: S/P-DIF Interface für unsymmetrisches Koaxialkabel
Bildquelle: Rumsey, 1991, Seite 148

12.6.3. MADI

Die Abkürzung MADI steht für „Multichannel Audio Digital Interface“. Bei MADI werden bis zu 64 Tonkanäle mit jeweils 24 Bit Auflösung über eine Koaxialleitung mit 75 Ω oder einen Lichtwellenleiter übertragen. Die Bandbreite des digitalen Signals beträgt ca. 50 MHz. Das Audio-Datenformat ist vergleichbar mit AES/EBU, mit Ausnahme der ersten 4 Bits (Preamble). MADI ist nicht zwingend selbsttaktend und deshalb wird eine zusätzliche Wordclock-Leitung empfohlen (Abb. 12.22).

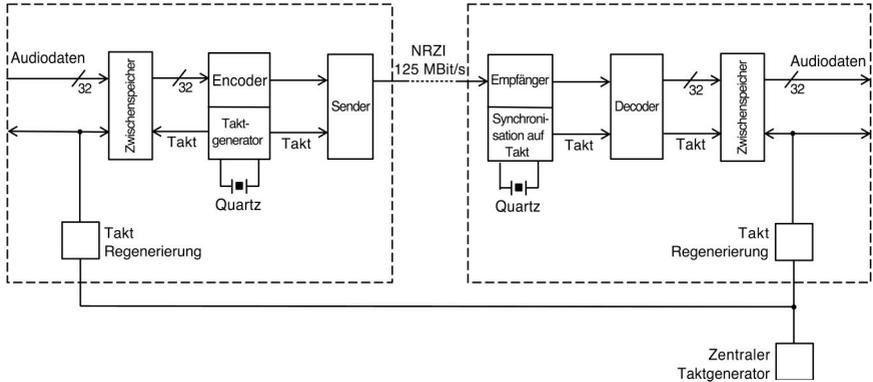


Abb. 12.22: MADI Blockdiagramm⁸

Tabelle 12.5 zeigt die Gliederung eines MADI-Datenframes. Die digitalen Audiosignale der einzelnen Tonkanäle werden sequenziell übertragen. Bei zum Beispiel 56 Kanälen ist ein Frame 20,8 µs lang.

Tabelle 12.5: MADI-Datenframe bei 48 kHz und 56 Kanälen⁹

MADI Subframe	0	1	2	3	4	...	54	55	0
Audio Channel	Ch 0	Ch 1	Ch 2	Ch 3	Ch4	...	Ch 54	Ch 55	Ch 0
Sample Number	n	n	n	n	n	...	n	n	n+1
AES3 Subframe	A	B	A	B	A	...	A	B	A
Time	← 20,8 µs →								

⁸ vgl. AES Standard 10-2003, Seite 6

⁹ vgl. AES Standard 10-2003, Seite 6

12.6.4. ADAT-Lightpipe

Dieses digitale Audioprotokoll hat seinen Ursprung bei den ADAT-Bandrecordern des Herstellers Alesis. Es können acht Kanäle mit bis zu 24 Bit bei einer Abtastrate von 48 kHz übertragen werden. Bei zwei parallelen Leitungen kann die Abtastrate auf 96 kHz erhöht werden. ADAT-Lightpipe sichert eine selbsttaktende Übertragung durch einen NRZI-Code mit zusätzlichen Synchron-Bits. Ein Datenframe hat damit 256 Bit (Tabelle 12.6). An das Interface wird ein Kunststoff-Lichtwellenleiter mit TosLink-Steckverbinder angeschlossen.

Tabelle 12.6: ADAT-Datenframe¹⁰

Bit	Function	Data
0 to 4	Start of Frame	00000
5	Synchronization-Bit	1
6 to 9	User Bits	MIDI & Timecode
10	Synchronization-Bit	1
11 to 14	Channel 1, Bit 0 to 3	Audio
15	Synchronization-Bit	1
16 to 19	Channel 1, Bit 4 to 7	Audio
20	Synchronization-Bit	1
21 to 24	Channel 1, Bit 8 to 11	Audio
25	Synchronization-Bit	1
26 to 29	Channel 1, Bit 12 to 15	Audio
30	Synchronization-Bit	1
31 to 34	Channel 1, Bit 16 to 19	Audio
35	Synchronization-Bit	1
36 to 39	Channel 1, Bit 20 to 23	Audio
40 to 69	Channel 2 (Same Structure as Channel 1)	Audio / Sync.
70 to 99	Channel 3 (Same Structure as Channel 1)	Audio / Sync.
100 to 129	Channel 4 (Same Structure as Channel 1)	Audio / Sync.
130 to 159	Channel 5 (Same Structure as Channel 1)	Audio / Sync.
160 to 189	Channel 6 (Same Structure as Channel 1)	Audio / Sync.
190 to 219	Channel 7 (Same Structure as Channel 1)	Audio / Sync.
220 bis 249	Channel 8 (Same Structure as Channel 1)	Audio / Sync.
250	Synchronization-Bit	1
251 to 255	End of Frame	00000

¹⁰ vgl. <http://www.albert-av.de/hm/adat/interface.htm> (Letzter Aufruf Oktober 2008)

12.7. Synchronisation

12.7.1. Wordclock

Schwankungen oder ein „Zittern“ des digitalen Taktes werden als (engl.:) Jitter bezeichnet (Abb. 12.23).

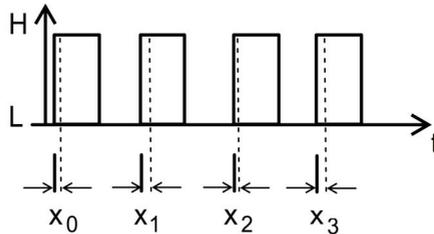


Abb. 12.23: Digitales Taktsignal mit Zeitfehlern (Jitter)¹¹

Auswirkungen von Jitter:

- Zufalls-Jitter → Führt zu zusätzlichem amplitudenmoduliertem Rauschen
- Signalabhängiger Jitter → Das Signal wird in der Phase verzerrt und es entstehen zusätzliche Seitenbänder

Innerhalb eines MADI-Datenstroms kann das Taktsignal stark schwanken. Es gibt spezielle Schaltungen, um einen stabilen Takt zurückzugewinnen. Zum Beispiel SteadyClock des Herstellers RME: Das Oszillatorbild in Abb. 12.24 zeigt oben eine MADI-Wordclock mit einem Jitter von 80 ns, unten ist die regenerierte Clock mit Schwankungen von weniger als 2 ns zu sehen.

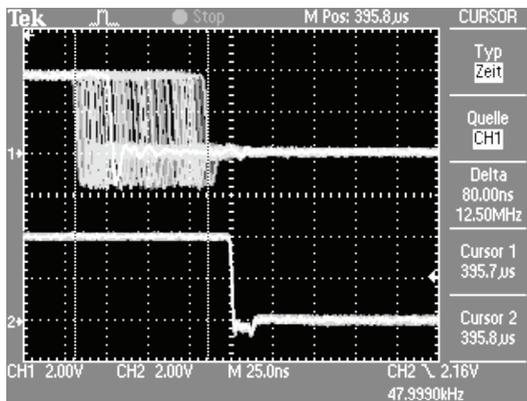


Abb. 12.24: Jitter auf Wordclock (oben) und regeneriertes Signal (unten)

Bildquelle: Audio AG, <http://www.rme-audio.de>

¹¹ vgl. AES Standard 12id-2006, Seite 6

Zur Verminderung von Jitter müssen digitale Geräte synchronisiert werden. Als Taktsignal kann die Samplingfrequenz dienen. Ein Gerät im digitalen Verbund ist die Quelle dieses Taktsignals (Master), die anderen laufen im Gleichtakt dazu (Slaves).

Methoden zur Wordclock-Generierung:¹²

- *Embedded Sample-Rate Clock*: Das digitale Audiosignal am Eingang liefert den Takt. Ein Nachteil ist bei diesem Verfahren der zunehmende Zeitfehler zwischen den Geräten bei einer kaskadierten Anordnung
- Die *zentrale Wordclock-Verteilung* wird empfohlen für eine professionelle Studioumgebungen. Der Takt wird durch einen Wordclock-Generator erzeugt. Die Verteilung an die Slaves kann über einen Wordclock-Verteiler erfolgen (z.B. mit einem Eingang und acht Ausgängen). Das Taktsignal wird über ein Koaxialkabel mit 75Ω übertragen, die Amplitude beträgt zwischen 1 und $5 V_{PP}$
- *Videosignal als Referenz*: Mit Hilfe der Austastlücke eines Videosignals wird die Wordclock generiert¹³
- *Global Positioning System (GPS)*: Das Zeitsignal eines GPS-Empfängers dient als Referenz zur Berechnung einer Wordclock

¹² vgl. AES Standard 11-2003, Seite 5 und 6

¹³ s. Kap. 22. „Videotechnik“

12.7.2. Timecode

Ein Timecode-Signal, wie es in Abb. 12.25 eingeblendet ist, wird zum Beispiel zur Synchronisation von Zuspiel- und Aufnahmemedien benötigt oder für eine dynamischen Mischpultaautomation.¹⁴



Abb. 12.25: Videobild mit eingeblendetem Timecode

12.7.2.1. Datenformat SMPTE Timecode

Der SMPTE Timecode hat das folgende Zeitformat:¹⁵

Stunden (0 bis 23) : Minuten (0 bis 59) : Sekunden (0 bis 59) : Frames (0 bis x)

Eine Sekunde kann je nach Bildzahl in $x = 24, 25, 29,97$ oder 30 Frames unterteilt werden (Tabelle 12.7).

Tabelle 12.7: Timecode Standards und Anzahl der Frames¹⁶

Standard	Frames pro Sekunde
SMPTE 30	30
NTSC 30 (Dropframe)	29,97
PAL 25 EBU	25
Film	24

Inzwischen haben Bildformate in High-Definition 48, 50 oder 60 Frames pro Sekunde. Allerdings gibt es noch keinen konkreten Lösungsvorschlag des SMPTE-Ausschusses, wie diese Bildraten in den Timecode integriert werden sollen. Prinzipiell ist es aber möglich, ein Frame weiter in Subframes zu unterteilen, z.B. in 100 Subframes. Allerdings ist das nur ein Notbehelf für dieses Problem.

¹⁴ s. Kap. 14.4. „Automation von Mischpulten“

¹⁵ SMPTE = Society of Motion Picture and Television Engineers

¹⁶ vgl. Mueller, 2004, Seite 210

Der SMPTE Timecode wird als Biphase-Mark-Code generiert. Die geringe Bitrate mit 80 Bit pro Frame erlaubt dabei eine Übertragung als Audiosignal über symmetrische Leitungen. Zur Synchronisierung analoger Bandmaschinen kann das Timecode-Signal auf eine freie Tonspur aufgezeichnet werden.

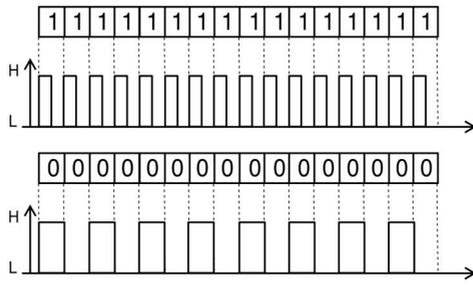


Abb. 12.26: Modulation Biphase-Mark. Oben: logisch 1, unten logisch 0

Bandbreite des SMPTE Timecodes

Die höchste Frequenz f_o tritt auf, wenn alle Bits auf logisch 1 gesetzt sind (Abb. 12.26 oben). Die untere Grenzfrequenz f_u mit genau der halben Frequenz von f_o ist dann gegeben, wenn nur logische 0 übertragen werden (Abb. 12.26 unten).

Berechnung von f_o bei 30 Frames:

$$f_o = 30 \text{ Frames} * 80 \text{ bit} = 2400 \text{ Hz} \quad (\text{Formel 12.5})$$

Berechnung von f_u bei 24 Frames:

$$f_u = \frac{f_o}{2} = \frac{24 \text{ Frames} * 80 \text{ bit}}{2} = 960 \text{ Hz} \quad (\text{Formel 12.6})$$

Die maximale Bandbreite Δf ist dann

$$f_o - f_u = 1440 \text{ Hz} \quad (\text{Formel 12.7})$$

Am Anfang und Ende jedes 80-Bit-Wortes steht ein Synchronwort. Die eigentliche Zeitinformation findet sich in den Bits, wie in Tabelle 12.8 aufgeführt.

Tabelle 12.8: Aufteilung der Bits des SMPTE Timecode¹⁷

Stunden		Minuten		Sekunden		Frames	
Bit 56 und 57	Bit 48 bis 51	Bit 40 bis 42	Bit 2 bis 35	Bit 24 bis 26	Bit 16 bis 19	Bit 8 und 9	Bit 0 bis 3
h	h	m	m	s	s	f	f

¹⁷ vgl. Webers, 2003, Seite 459

Daneben gibt es noch Userbits zur Übertragung beliebiger Daten wie z.B. einer Szenennummer. Für einige Bits gibt es auch bisher keine Festlegung durch den SMPTE-Ausschuss.

12.7.2.2. LTC, VITC und MTC

LTC = Longitudinal Timecode

Der LTC wird bei der Aufzeichnung auf Magnetbändern mit feststehendem Tonkopf in eine Längsspur geschrieben. Bei Audio-Tonbändern muss dazu eine freie Tonspur verwendet werden, bei Videobändern gibt es eine dafür reservierte LTC-Spur. Das Auslesen des Timecode ist nur möglich, wenn das Band bewegt wird.

VITC = Vertical Interval Timecode

Die Aufzeichnung und Wiedergabe des VITC erfolgt über eine schräg stehende, rotierende Kopftrommel wie sie Videorecorder haben. Das Auslesen ist dann auch bei stehendem Band möglich, da sich die Kopftrommel weiter dreht (Abb. 12.27).¹⁸

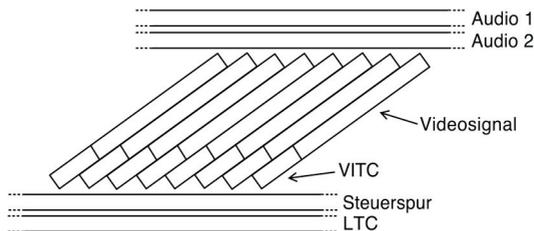


Abb. 12.27: Spurbild eines Videobandes mit LTC und VITC

MTC = MIDI Timecode

Hier wird der SMPTE Timecode als System Common Message in das MIDI-Protokoll eingebettet.¹⁹ MIDI-Timecode-Konverter können die Signale zur Synchronisation verschiedener Geräte entsprechend umwandeln.

- MTC Short Message: Wird kontinuierlich gesendet, wenn das System läuft
- MTC Full Message: Locator-Funktion zur Positionierung von Zuspielern²⁰

¹⁸ s. Kap. 22.4. „Aufzeichnung und Wiedergabe von Videosignalen“

¹⁹ s. Kap. 13. „MIDI“

²⁰ vgl. Roland, 2003, Kapitel 9.2.1 und 9.2.2

12.8. Übungsaufgaben

Aufgabe 1:

Was sind die Vor- und Nachteile der digitalen Audiotechnik? Finde zu Pro und Contra mindestens jeweils drei Argumente.

Aufgabe 2:

Bei AES/EBU-Verbindungen kann auf die Mitübertragung von Synchronwörtern verzichtet werden. Warum?

Aufgabe 3:

Was sind die wesentlichen Merkmale von Steckverbindungen für ein AES/EBU- und ein S/P-DIF-Interface?

Aufgabe 4:

Welche maximale Auflösung für ein Audiosample ist im AES/EBU-Standard definiert?

Aufgabe 5:

Wie viele Tonkanäle können maximal über MADI übertragen werden und mit welcher Auflösung?

Aufgabe 6:

Beim Timecode kann eine Sekunde je nach Bildzahl in unterschiedliche Frame-Raten unterteilt werden. Nenne drei Varianten.

Aufgabe 7:

Warum müssen digitale Audiogeräte mit einer Wordclock synchronisiert werden?

Aufgabe 8:

Welche Art von Wordclock-Synchronisierung wird für eine Studioumgebung empfohlen?



Literaturtipp:

Görne, Thomas: Tontechnik.
(Kapitel „Signale und Systeme“)
Leipzig: Carl Hanser Verlag.

13. MIDI



Das Thema MIDI kann zusammen mit Kapitel 12 „Digitale Audiosignale“ im ersten Lehrjahr unterrichtet werden.

Die Abkürzung MIDI steht für „Musical Instrument Digital Interface“. Die ersten Keyboards und Klangerzeuger mit MIDI-Anschlüssen kamen 1983 auf den Markt. Bereits vor Einführung von MIDI gab es die Möglichkeit, Synthesizer durch eine Control Voltage (CV) zu steuern. Diese Steuerspannung lag zwischen +10 V und -10 V und konnte eine Gleich- oder Wechselspannung sein, je nach Hersteller.¹ Eine Normung des CV-Interfaces gab es also nicht. Erst nachdem einige Hersteller die MIDI Manufacturers Association² gegründet hatten, wurde die MIDI-Spezifikation entwickelt und als Standard etabliert.

13.1. Physikalische MIDI-Schnittstelle

Als Verbindung zwischen zwei MIDI-Geräten wird ein zweiadriges Kabel mit Schirm und einem 5-poligen DIN-Stecker verwendet (Abb. 13.1). Auf Pin 4 und 5 liegt das digitale MIDI-Signal, an Pin 2 ist der Kabelschirm angelötet.



Abb. 13.1: MIDI-Stecker

Die Geräte können prinzipiell drei MIDI Anschlüsse haben (Abb. 13.2):

- MIDI In: Empfang von MIDI-Daten. Durch einen Optokoppler erfolgt eine galvanische Trennung zur Vermeidung von Brummschleifen
- MIDI Out: Hier liegen Daten an, die das Gerät selbst erzeugt hat
- MIDI Thru: Die Daten vom MIDI In werden auf den Thru durchgeschleift

¹ vgl. Bock, 1981, Seite 18

² <http://www.midi.org>

(Mitglieder sind derzeit u.a. Yamaha, Microsoft, Texas Instruments, Kurzweil und Line 6)

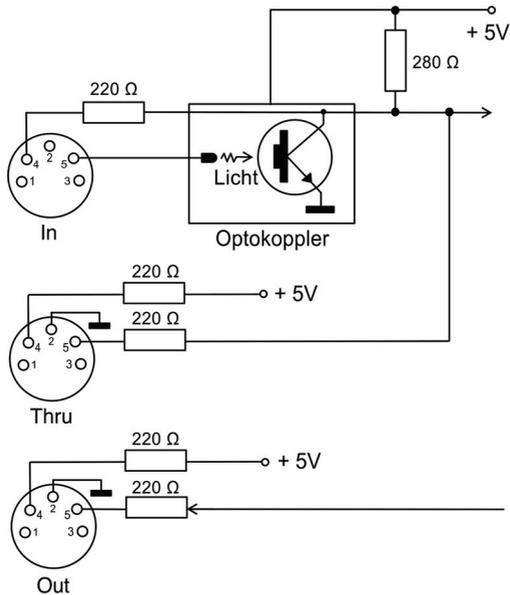


Abb. 13.2: MIDI-Anschlüsse

Technische Parameter

Die Daten werden seriell übertragen. Ein Datenbyte hat 8 Bit. Am Anfang und Ende jedes Bytes steht zusätzlich ein Startbit (0) und Stopbit (1). Es ist mit $320 \mu\text{s}$ eine feste Übertragungszeit definiert für ein Datenwort inklusive Kontrollbits (zusammen 10 Bits). Die daraus resultierende Übertragungsrate beträgt 31250 Bit/s. Durch diese Definitionen zur Datenübertragung kann der Empfänger den Anfang und das Ende des Datenbytes erkennen und sich auf das Signal synchronisieren. Diese Art der Synchronisierung wird auch UART (Universal Asynchronous Receiver Transmitter) genannt.

Über die MIDI-In-Buchse ist eine Gleichstromversorgung des empfangenden Gerätes möglich. Dies funktioniert aber meist nur, wenn der MIDI-Ausgang des Senders der MIDI-Spezifikation entspricht, d.h. bei +5 V über 220Ω an Pin 4 und Masse an Pin 2.

13.2. MIDI-Daten

MIDI-Nachrichten werden systematisch unterteilt in Channel Voice, Channel Mode, System Common, System Realtime und System Exclusive Messages.

Tabelle 13.1: MIDI Message Hierarchie

Message				
Channel		System		
Channel Voice	Channel Mode	System Common	System Realtime	System Exclusive

13.2.1. Channel Voice Messages

Am Anfang steht ein Statusbyte, bei dem das erste Bit (Most Significant Bit = MSB) immer eine 1 ist, gefolgt von ein oder zwei Datenbytes mit MSB = 0.

Da bei den Datenbytes das MSB also immer fest steht, bleiben für die Information nur sieben frei nutzbare Bits, d.h. 128 dezimale Werte.

Tabelle 13.2: Channel Voice Messages

Statusbyte (MSB = 1)		1. Datenbyte (MSB = 0)	2. Datenbyte (MSB = 0)
1. Status-Halfbyte	2. Status-Halfbyte		
Befehlsdefinition	MIDI-Kanalnummer $2^4 = 16$ Kanäle von 0 bis 15	Notennummer $2^7 = 128$ Noten von 0 bis 127	Anschlagsstärke $2^7 = 128$ Velocity-Werte von 0 bis 127
1000 Note Off	xxxx	0xxx xxxx	0xxx xxxx
1001 Note On	xxxx	0xxx xxxx	0xxx xxxx
1010 Key Pressure	xxxx	0xxx xxxx	0xxx xxxx
1011 Control Change	xxxx	0xxx xxxx	0xxx xxxx
1100 Program Change	xxxx	0xxx xxxx	Keine Daten
1101 Channel Pressure	xxxx	0xxx xxxx	Keine Daten
1110 Pitch Bend	xxxx	0xxx xxxx	0xxx xxxx

Erklärungen zu den Befehlen:

- Note On / Off: Eine Taste am Keyboard wird gedrückt bzw. losgelassen
- Polyphonic Key Pressure: Druckänderung beim Anschlag jeder einzelnen Taste, z.B. zur Steuerung eines Vibratos
- Control Change:
 - Erstes Datenbyte = Controller Nummer
 - zweites Datenbyte = Controller Wert
 - Beispiele: Controller Nr. 64_{10} ist für das Dämpferpedal reserviert, Nr. 120_{10} bis 127_{10} sind für Channel Mode Messages vorgesehen
- Program Change: Hier gibt es nur ein Datenbyte, d.h. Werte von 0 bis 127
- Channel Pressure: Daten zur Druckänderung beim Anschlag; Jedoch wird für die ganze Tastatur immer nur ein Wert gesendet. Werden zwei Tasten mit unterschiedlichem Anschlag gleichzeitig gespielt, dann wird ein gemittelter Wert für beide Tasten übertragen
- Pitch Bend: Daten zur Tonhöhenmodulation

Beispiel einer kompletten Channel Voice Message:

Eine Message mit den Daten „1001 0101 0011 1100 0111 1001“ steht für:

Statusbyte: 1001 = Note On / 0101 = MIDI-Kanal 5_{10}

Datenbyte 1: 0011 1100 = Notenummer 60_{10}

Datenbyte 2: 0111 1001 = Anschlagsstärke 121_{10}

13.2.2. Channel Mode Messages

Channel Mode Messages sind, wie oben schon aufgeführt, Control Change Messages mit Controller Nummern von 120 bis 127.

Die Controller-Nummern und ihre Bedeutung im Einzelnen:

- 0111 1000 = 120_{10} All Sound Off
- 0111 1001 = 121_{10} Reset all Controllers
- 0111 1010 = 122_{10} Local Control On/Off: Trennung der Tastatur vom Klangerzeugermodul
- 0111 1011 = 123_{10} All Notes off
- 0111 1100 = 124_{10} Omni Mode Off
- 0111 1101 = 125_{10} Omni Mode On

- 0111 1110 = 126₁₀ Mono Mode On (= Poly Mode Off)
- 0111 1111 = 127₁₀ Poly Mode On (= Mono Mode Off)

Mögliche Modi:

- Omni on = Empfang auf allen MIDI-Kanälen
- Omni off = Kanaltrennung
- Poly on = Mehrstimmig
- Poly off = Einstimmig

13.2.3. System Common Messages

System Common Messages beginnen mit einem Statusbyte, gefolgt von einem, zwei oder auch gar keinem Datenbyte. Die Statusbytes und deren Bedeutung:

- 1111 0000 = Reserviert für System Exclusive Messages (s.u.)
- 1111 0001 = MIDI-Timecode (MTC)
- 1111 0010 = Song Position Pointer
- 1111 0011 = Song Select
- 1111 0110 = Tune Request: Stimmung von Oszillatoren
- 1111 0111 = End of System Exclusive (EOX), d.h. es folgen der Message keine weiteren systemexklusive Daten

13.2.4. System Realtime Messages

Statusbytes:

- 1111 1000 = MIDI Clock
- 1111 1010 = Start (Abspielposition immer am Anfang des MIDI-Songs)
- 1111 1011 = Continue (Abspielposition beim letzten Stop)
- 1111 1100 = Stop
- 1111 1110 = Active Sensing max. 300 ms; Falls kein Active-Sensing-Signal mehr kommt, schaltet der Empfänger wieder in den normalen Betriebsmodus
- 1111 1111 = System Reset: Setzt alle Geräteeinstellungen zurück

13.2.5. System Exclusive Messages

Statusbyte: 1111 0000

Anwendungen:

- Common System Exclusive Messages, z.B. Herstellercodes
- MIDI Sample Dump Standard: Zur Sicherung von digitalen Audiodaten, allerdings mit einer sehr langsamen Datenübertragung. Ein Audiosample von einer Sekunde Länge braucht ca. 40 Sekunden für die Übertragung
- SysEx Data Dump: Zur MIDI-Datensicherung z.B. Archivierung von Geräteeinstellung

Tabelle 13.3: Beispiel einer Nachricht mit SysEx-Daten

1111 0000	„Es folgen systemexklusive Daten“
0xxx xxxx	Hersteller ID z.B. 43 _{Hex} = 0100 0011 für Yamaha
0xxx xxxx	Device ID = eine spezifische Gerätenummer
0xxx xxxx	SysEx-Daten jeglicher Art; Vom Hersteller festgelegt
1111 0111	EOX
Alle Bytes zwischen dem Status und EOX müssen ein MSB = 0 haben	

Tabelle 13.4: MIDI Machine Control (MMC) als erweiterter MIDI-Befehl

1111 0000	„Es folgen systemexklusive Daten“
0111 1111	„Es folgen Real-Time-Daten“
0000 0110	„Es folgen MIDI Machine Control-Befehle“
0000 xxxx	MIDI-Machine-Befehle: 01 _{Hex} Stop 02 _{Hex} Play 04 _{Hex} Fast Forward 05 _{Hex} Rewind 06 _{Hex} Record Strobe 07 _{Hex} Record Exit 08 _{Hex} Record Pause 0C _{Hex} Command Error Reset 0D _{Hex} MMC Reset
1111 0111	EOX
Alle Bytes zwischen dem Status und EOX müssen ein MSB = 0 haben	

13.3. MIDI-Signalverteilung

13.3.1. MIDI-Thru- & Merge-Boxen

MIDI-Thru-Boxen verteilen ein Eingangssignal auf mehrere Ausgänge (z.B. 2, 4 oder 8). MIDI-Merger dagegen „mischen“ mehrere Eingangssignale auf einen Ausgang (Abb. 13.3).



Abb. 13.3: MIDI Thru & Merge

13.3.2. MIDI Router

Ein MIDI-Router ist etwas flexibler in der Signalverteilung als MIDI-Thru und MIDI-Merge. Per Hardware oder Software können in einer Schaltmatrix Ein- und Ausgänge beliebig verknüpft werden.

13.3.3. MIDI Line Driver

Die Datenübertragung über ein normales MIDI-Kabel ist nur bis zu einer gewissen Länge sicher (ca. 15 m). Soll ein MIDI-Signal über längere Wegstrecken gesendet werden, muss man einen Leitungsverstärker (engl.: Line Driver) verwenden. Das verstärkte MIDI-Signal kann dann über ein symmetrisches Audiokabel geleitet werden. Es ist dann eine Übertragung des Signals über mehrere hundert Meter möglich (Abb. 13.4).

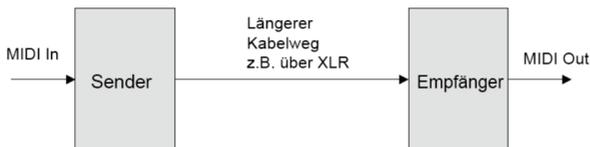


Abb. 13.4: MIDI Line Driver

13.3.4. MIDI-Anwendungsbeispiel

Abb. 13.5 zeigt das Blockschaltbild eines MIDI-Setups bei einer großen Live-Beschallung (Musical). In der Tabelle 13.5 sind die entsprechenden MIDI-Kanäle für dieses Setup aufgelistet.

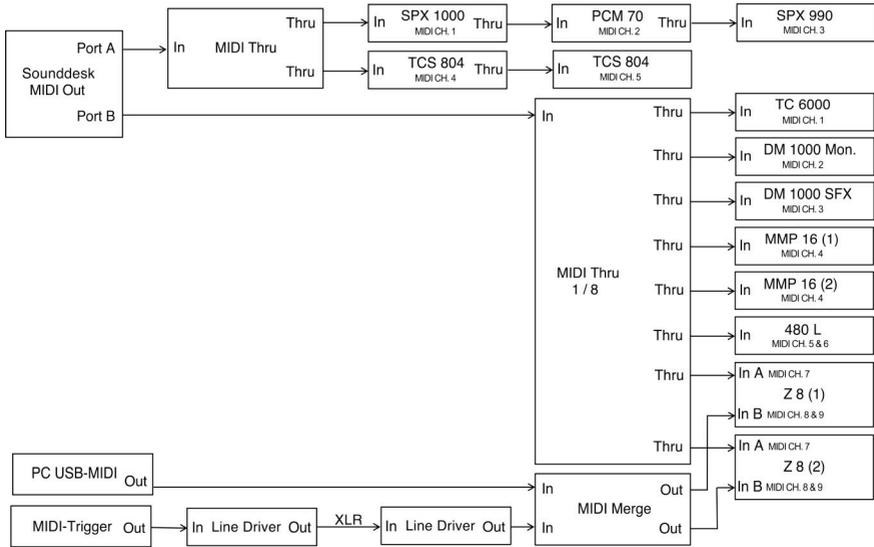


Abb. 13.5: MIDI Beispiel-Setup

Tabelle 13.5: MIDI-Channels Beispiel-Setup

Source	MIDI-Ch.	Device	Use
Sounddesk MIDI Port A	1	SPX 1000	Band Reverb Short
Sounddesk MIDI Port A	2	PCM 70	Strings Reverb
Sounddesk MIDI Port A	3	SPX 990	Tap Delay
Sounddesk MIDI Port A	4	TCS 804	Delay Vocals A + B
Sounddesk MIDI Port A	5	TCS 804	Delay Vocals C
Sounddesk MIDI Port B	1	TC 6000	Surround Reverb
Sounddesk Port MIDI B	2	DM 1000	Monitor-Mixer
Sounddesk Port MIDI B	3	DM 1000	SFX-Submixer
Sounddesk Port MIDI B	4	MMP 16	Playback-Device
Sounddesk Port MIDI B	5	480 Machine A	Vocal Reverb
Sounddesk Port MIDI B	6	480 Machine B	Band Reverb
Sounddesk Port MIDI B	7	Z 8 MIDI In A	Sampler (Atmospheres)
Cuelist on PC USB-MIDI	8	Z 8 MIDI In B	Sampler (SFX)
MIDI Trigger-Switch	9	Z 8 MIDI In B	Sampler (SFX)

13.4. mLAN (Yamaha)

Die Abkürzung mLAN steht für „Music Local Area Network“. Die Entwickler bei der Herstellerfirma Yamaha behaupten, dass die „Schönheit“ dieses Systems in seiner Einfachheit liegt.³ Anstatt eine Vielzahl von Kabeln zu verwenden, werden über mLAN bidirektional Audio-, MIDI-, Takt- und weitere Steuersignale über ein einzelnes Firewire-Kabel übertragen. Es sind dabei bis zu 63 physikalische Geräte anschließbar. Die Datenübertragungsrate beträgt max. 800 Mbit/s, das ist ausreichend genug, um parallel mehrere Audio- und MIDI-Kanäle zu nutzen. Es wird eine Steuersoftware angeboten, die über ein graphisches Interface die virtuelle „Verkabelung“ von angeschlossenen Geräten bzw. der geöffneten MIDI-Anwendungen erlaubt.

Inzwischen haben auch andere Hersteller mLAN-Produkte im Programm, so dass es nicht länger nur eine Insel-Lösung darstellt (z.B. gehören Korg, Kurzweil, Apogee und PreSonus zur sog. mLAN-Alliance). Dennoch ist diese Technik noch nicht sehr verbreitet.

³ vgl. <http://www.yamahasyth.com/products/mlan/index.html> (Oktober 2008)

13.5. Übungsaufgaben

Aufgabe 1: (Frage bei der Abschlussprüfung Sommer 2001 der IHK Erfurt)

Nenne ein übliches digitales Format, mit dem elektronische Musikinstrumente und Peripheriegeräte vom PC aus ferngesteuert werden können.

Aufgabe 2:

Was ist ein MIDI-Line-Driver bzw. zu welchem Zweck wird dieses Gerät eingesetzt?

Aufgabe 3:

Nenne die zwei wichtigsten Channel Voice Messages.

Aufgabe 4:

Wie viele MIDI-Kanäle können über eine physikalische Verbindung übertragen werden?

Aufgabe 5:

Wie lautet ein Note-On-Befehl auf MIDI-Kanal 1 als Binär-, Hexadezimal- und Dezimalzahl?

Aufgabe 6:

Worin liegt der Vorteil eines mLAN gegenüber der herkömmlichen MIDI-Verkabelung?



Literaturtipps:

Conrad, Jan-Friedrich: Recording.

(Kapitel „Der MIDI Standard“)

Bergkirchen: PPV.

Roland: MIDI-Guide.

Norderstedt: Roland Elektronische Musikinstrumente.

(Online-Version: <http://www.midiguide.de/>)

14. Mischpulte



Mischpulte sind ein Thema im zweiten Lehrjahr.

14.1. Prinzipieller Aufbau und Funktionsweise

14.1.1. Was macht ein Mischpult?

Durch die *Vorverstärker* werden die Pegel der Quellsignale angepasst. *Filter und EQ* bieten die Möglichkeit zur Klangbearbeitung und über *Inserts* gibt es Einschleifwege für weitere externe Effekte. Über die *Busse* werden mehrere Signale zusammengefasst, d.h. ein Mischpult ist eine Sammelschiene.

14.1.2. Welche Mischpulte gibt es?

Mischpulte können unterschieden werden aufgrund der Bauweise, dem Einsatzgebiet oder dem Konzept Abmischung im Produktionsablauf.

14.1.2.1. Bauweisen

- Mischpulte in analoger Technik
- Mischpulte in analoger Technik mit digitaler Steuerung
- Digitalpulte

14.1.2.2. Einsatzgebiete

Mischpulte für Mehrspuraufnahmen

- Umfangreiche Schaltmöglichkeiten (Routing) zur Anwahl der gewünschten Aufnahmespur
- Tape-Return-Section für eine Abhörmischung der aufgenommenen Signale
- Dynamische Automation, die synchron zu einem Timecode abläuft

Mischpulte für die Beschallung

- Mehrere übersichtlich gestaltete Ausspielwege für verschiedene Monitormischungen
- Umfangreiche Vorhörschaltungen
- Mischmatrix

Broadcastpulte

- Faderstart für Zuspielgeräte
- Oft sind Regelverstärker in den Kanälen integriert¹
- n-1-Matrix²

Tragbare Mischer für Stereoaufnahmen

Für die direkte Aufzeichnung von zwei Kanälen, z.B. bei Fernseh- oder Filmtonaufnahmen am Set.

DJ-Mixer

- Direkter Anschluss von Plattenspielern möglich (Phono-Vorentzerrer)
- Cross-Fader

Line-Mixer

Line-Mixer sind reine Sammelschienen, die oft ohne eine Klangbearbeitung auskommen. Anwendung z.B. für Keyboard- und MIDI-Equipment.

14.1.2.3. Mischkonzepte

Tonstudio

- *Splitpulte*: Input- und Tape-Return-Section sind auf der Bedienoberfläche räumlich getrennt (links Inputs und rechts die Tape>Returns)
- *Inline-Pulte*: Input- und Tape-Return im Kanalzug vereint

Live

- *Beschallungspulte*: Hier ist kein Tape-Return notwendig, d.h. es gibt nur Input-Channels

Die Unterscheidung nach Mischpultkonzepten war sinnvoll, als es noch ausschließlich analoge Pulte auf dem Markt gab. Heutzutage werden in fast allen Bereichen digitale Mixer eingesetzt, die aufgrund ihrer Flexibilität sowohl als Studiopult wie in der Beschallung eingesetzt werden können. Die meisten Digitalmischer haben ausreichend Kanäle für zusätzliche Tape Returns.

¹ s. Kap. 15.1.2. „Regelverstärker“

² Anwendung z.B. bei einer Sendung mit Telefonschaltung: Der Anrufer hört alle Signale aus dem Studio (= n), nicht aber sich selber (= -1)

14.2. Signalfluss eines analogen Beschallungspultes



Abb. 14.1: Analoges Beschallungspult (Cadac J-Type)

In diesem Kapitel soll der Signalfluss eines analogen Beschallungspultes erläutert werden. Wenn das analoge Prinzip verinnerlicht wurde, sollte es kein Problem sein, auch den Signalfluss eines digitalen Pultes zu verstehen.

Als Beispiel dient ein Beschallungspult mit den folgenden technischen Daten:

- 56 Eingangskanäle, 8 Subgruppen, 1 Stereosumme (= 56/8/2)
- 10x16-Mischmatrix
- 10 Mono-Ausspielwege, 1 Stereo-Ausspielweg
- 8 VCA-Gruppen
- Statische Automation über ein Central Control Module (CCM) mit angeschlossenen Computer zur Szenenverwaltung

14.2.1. Mono-Eingangskanal

Abb. 14.2 zeigt das vollständige Schaltbild eines Mono-Eingangskanals. Im Folgenden werden dann die einzelnen Baugruppen bzw. Funktionseinheiten dieses Kanals systematisch im Signalfluss verfolgt und erklärt.

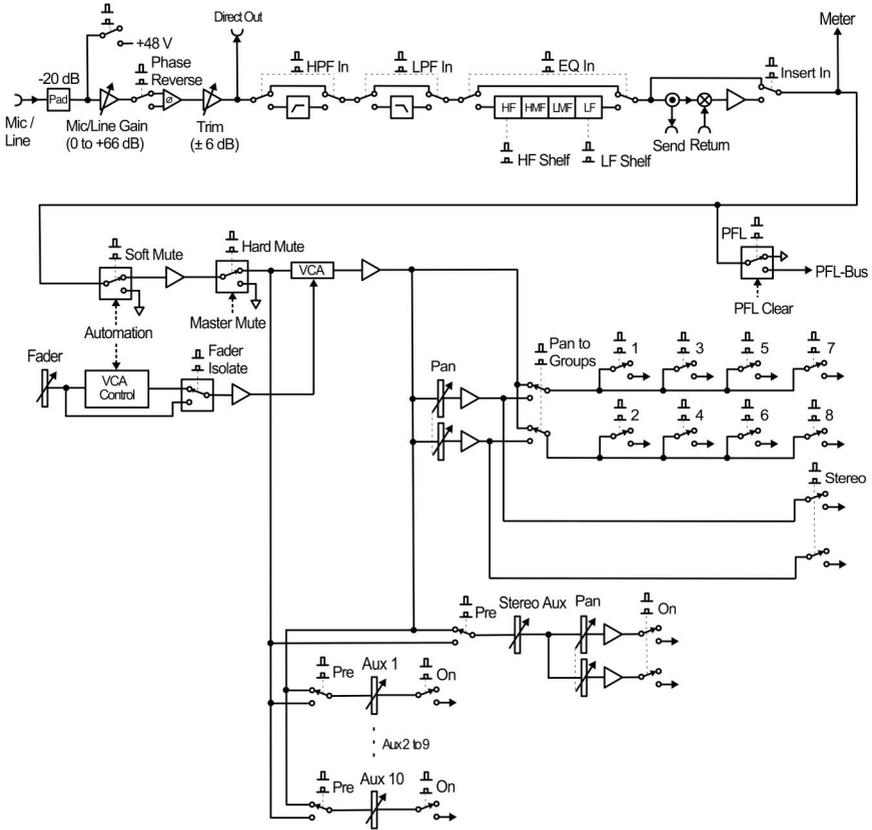


Abb. 14.2: Signalfluss Mono-Eingangskanal

14.2.1.1. Mikrofonvorverstärker

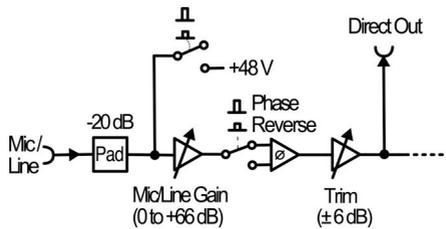


Abb. 14.3: Mikrofonvorverstärker

Mic / Line: XLR-Eingangsbuchse für Signale mit Mikrofonpegel (-50 bis -30 dB_U) und Leitungspiegel bzw. Rundfunknormpegel (+6 dB_U).

Pad: -20 dB Vordämpfung für Signale mit Leitungspiegel.

48 V: Phantomspeisung für Kondensatormikrofone oder aktive DI-Boxen.

Mic / Line Gain: Drehregler mit 12 Positionen für 0 bis +66 dB_U Vorverstärkung.

Einrastbare Gain-Regler haben den Vorteil, dass bei Stereosignalen die beiden Kanäle für Links und Rechts auf den exakt gleichen Pegel eingestellt werden können.

Trim: Feinjustage der Vorverstärkung (± 6 dB_U).

Phase Reverse ϕ : Verpolungsschalter. Die Signale von Pin 2 und 3 der XLR-Buchse werden vertauscht.

Direct Out: Direkter Abgriff des Signals hinter dem Vorverstärker z.B. für Mehrspuraufnahmen.

14.2.1.2. Filter und EQ

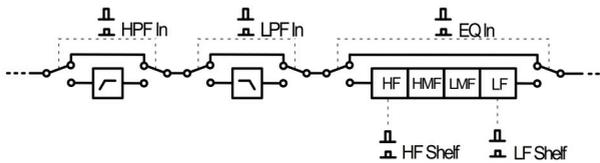


Abb. 14.4: Filter und EQ

HPF / LPF In: Die Hoch- und Tiefpassfilter können hier separat Ein- und Ausgeschaltet werden.

EQ In: Auch der Equalizer kann separat Ein- und Ausgeschaltet werden.

HF / LF Shelf: Tiefen- und Höhen-EQ können entweder als Filter mit Glockencharakteristik (Bell) oder als Kuhschwanz (Shelf) genutzt werden.

14.2.1.3. Insert

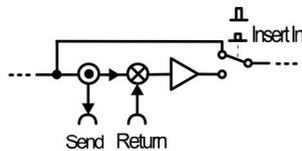


Abb. 14.5: Insert

Insert-Send: Das Signal kann hier für Effektgeräte über eine symmetrische Klinkenbuchse abgegriffen werden.

Insert-Return: Ausführung als symmetrische Trennklinkenbuchse, d.h. erst beim Einstecken eines Return-Kabels wird der interne Signalfuss unterbrochen und stattdessen das externe Signal weitergeleitet.

Insert In: Der Einschleifweg kann hier Ein- und Ausgeschaltet werden.

14.2.1.4. Vorhören

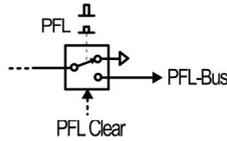


Abb. 14.6: PFL

PFL: Das Vorhörersignal wird hier vor dem Fader bzw. VCA abgegriffen.

PFL Clear: Durch einen Taster auf dem zentralen PFL-Modul können alle angewählten Vorhörknotenpunkte wieder gelöst werden.

PFL-Bus: Die Sammelschiene der PFL-Signale.

Welche Solo-Abhörfunktionen haben Mischpulte?

- Pre Fader Listening (PFL) = Abhörpunkt vor dem Fader
- After Fader Listening (AFL) = Abhörpunkt nach dem Fader
- Solo in Place (SiP) = Abhören nach Fader und Panorama über den Summenbus durch Stummschalten der nicht angewählten Kanäle. Oft gibt es auch eine Safe-Schaltung, mit der einzelne Kanäle von der SiP-Funktion ausgenommen werden können, z.B. die Effektrückwege. Beispiel für die Anwendung von SiP: Eine Gesangsspur soll mit dem dazugehörigen Hall pegelrichtig und im Panorama angeordnet abgehört werden. Solo in Place ist eher bei Studiopulten zu finden, Beschallungspulten haben eher selten eine SiP-Funktion integriert

14.2.1.5. Mute und VCA

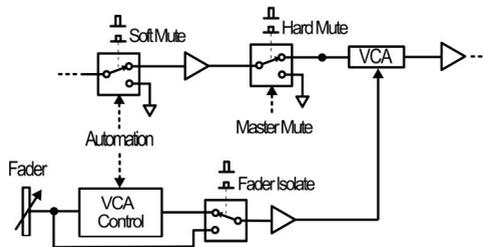


Abb. 14.7: Mute und VCA

Soft Mute: Stummschaltung des Kanals über ein Relais, welches über die Automation ferngesteuert werden kann.

Hard Mute: Stummschaltung über ein Relais, das auch über einen zentralen Master-Mute geschaltet werden kann.

VCA Control: Zuweisung des VCA des Kanalzuges zu VCA-Gruppen und damit Steuerung über die Automation.

VCA: Voltage Controlled Amplifier.

Fader Isolate: Automation für diesen Kanal ausschalten.

Was ist ein Voltage Controlled Amplifier?

Das Tonsignal wird nicht mehr über den Fader geführt, sondern einem Verstärker zugeleitet, dessen Verstärkungsmaß über eine Gleichspannung gesteuert wird. Durch den Fader wird also eine Gleichspannung verändert, welche die Verstärkung des VCA steuert. Vorteil:

- Steuerung und Signalführung sind getrennt somit wird eine Automatisierung von Abmischungen möglich
- Ein VCA kann gleichzeitig auch zur Bearbeitung der Signaldynamik verwendet werden (Beispiel: AMEK Recall RN)

Alternative: Servogetriebene Pegelsteller (Motorfader)

Servogetriebene Pegelsteller sind Fader, die sowohl von Hand, als auch mit einem Motor bewegt werden können. Vorteil:

- Voll programmierbare Motorsteuerung. Es ist aber jederzeit ein Eingreifen in automatisch ablaufende Einstellungen von Hand möglich
- Die Einstellung der Automation kann am Motorfader „abgelesen“ werden

14.2.1.6. Panning und Routing

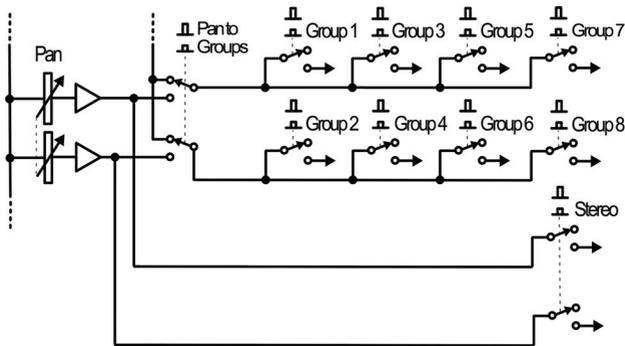


Abb. 14.8: Panning und Routing

Pan: Panorama-Regler.

Pan to Groups:

- Schalter nicht gedrückt = Das Signal geht direkt zur Gruppen-Anwahl (Mono-Signal für alle Gruppen)
- Schalter gedrückt = Das Signal geht über die PanPots zur Gruppen-Anwahl (Links für ungerade Gruppen, Rechts für gerade Gruppen)

Group 1...8: Aufschalten des Signals auf die jeweiligen Gruppen-Busse.

Stereo: Aufschalten des Stereo-Signals auf den Stereo-Bus.

14.2.1.7. Ausspielwege (engl.: Auxiliaries)

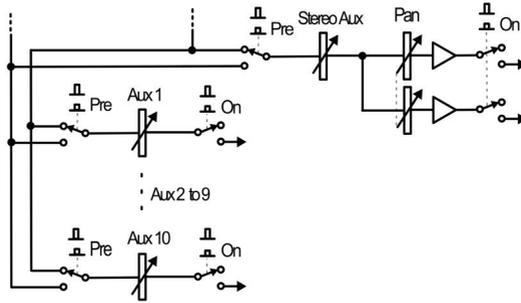


Abb. 14.9: Aux Sends

Pre: Die Ausspielwege können Pre- oder Post-Fader geschaltet werden.

Aux 1...10 / On: Mono-Ausspielwege; Pegelregelung / Ein- und Ausschalten.

Stereo Aux / Pan / On: Stereo-Ausspielweg mit Panorama; Pegelregelung / Ein- und Ausschalten des Ausspielweges.

14.2.2. Gruppen- und Matrixmodul

Die Signale auf den Gruppen- und Summenbussen werden vom Gruppen- und Matrixmodul wieder abgegriffen und über eine Mischmatrix auf die Pultausgänge geleitet (Abb. 14.10).

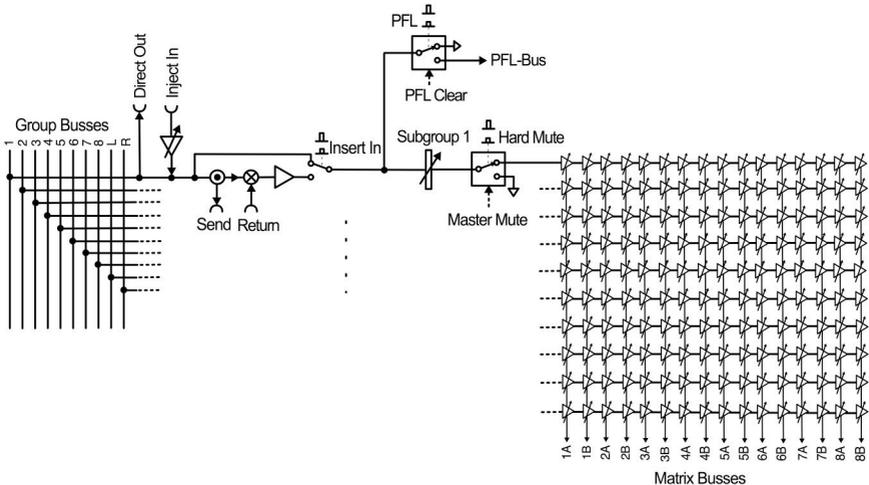


Abb. 14.10: Subgruppen und Matrix

Group Busses 1 to 8: Gruppen-Sammelschienen.

Busses L / R: Stereo-Sammelschienen.

Direct Out: Externer Abgriff des Gruppensignals, z.B. für Aufnahmen (XLR).

Inject In: Zumischen eines externen Signals, z.B. eines Submischers (XLR).

Insert: Einschleifweg (Symmetrische Klinkenbuchsen).

PFL: Vorhören vor dem Gruppensummenregler.

Subgroup-Fader: Gruppensummenregler.

Hard Mute: Stummschalten der Gruppe.

Matrix-Busses 1A to 8B: Mischmatrix auf die Matrix-Busse ($n * m = 10 * 16 = 10$ Eingänge und 16 Ausgänge).

Anmerkung: Nicht eingezeichnet sind zusätzliche Summenregler, Hard-Mute-Relais und Ausgangsbuchsen der 16 Matrixbusse.

14.2.3. Aux-Master

Das Aux-Master-Modul greift die Signale der Aux-Busse ab (Abb. 14.11).

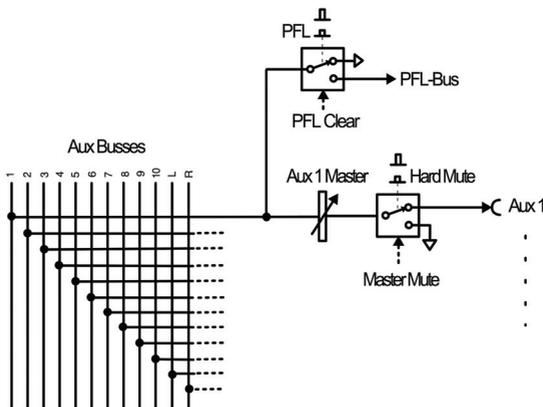


Abb. 14.11: Aux-Master

PFL: Vorhören vor dem Aux-Summenregler.

Aux 1 Master: Summenregler des Ausspielweges.

Hard Mute: Stummschalten des Ausspielweges.

Aux 1: Ausgangsbuchse (XLR).

14.2.4. PFL- / OSC-Modul

Auf dem PFL- und OSC-Modul finden sich die Bedienelemente für verschiedene Vorhörfunktionen, des Kopfhörerverstärkers und des Testtongenerators. Testsignale können zum Beispiel auf die Eingangskanäle oder Busse geschaltet werden.

14.2.5. Central Control Modul (CCM)

Die Automationsdaten werden vom CCM verwaltet und sind hier auf einen Speicherchip abgelegt. Abb. 14.12 zeigt exemplarisch das Bedienfeld eines CCM eines Mischpultes des Herstellers Cadac:



Abb. 14.12: CCM eines Cadac J-Type

Standard-Funktionen des CCM:

- Save: Szene speichern
- Recall: Szene abrufen
- Clear: Szene löschen
- Next: Nächste Szene in der Cue-Liste aufrufen
- Previous: Vorherige Szene in der Cue-Liste aufrufen

An das CCM kann zusätzlich auch ein externer Computer angeschlossen werden, der dann über eine graphische Oberfläche zusätzliche Funktionen bietet (z.B. Bearbeitung der Szenenliste) und auf dessen Festplatte ebenfalls Daten abgelegt werden können.

Bei den Mischpulten von Cadac finden sich auf dem CCM auch die Master-Mutes zum Stummschalten aller Kanäle, Subgruppen, Matrix-Ausgänge und Ausspielwege (Abb. 14.3).



Abb. 14.13: Master Mutes eines Cadac J-Type

14.3. Digitale Mischpulte



Abb. 14.14: Digitale Konsole (Yamaha PM1D)

14.3.1. Prinzip der digitalen Signalverarbeitung

In digitalen Mischpulten werden verschiedene Rechenregeln (Algorithmen) zur Bearbeitung der Audiosignale angewandt:³

- Pegelveränderungen = Multiplizierung mit einem Übertragungsfaktor
 - Dämpfung: Faktor zwischen 0 und 1
 - Verstärkung: Faktor größer 1
- Mischung = Addition der einzelnen Signale
- Signalverzögerung = Ablegen in einen Zwischenspeicher und anschließendes Auslesen mit der gewünschten Verzögerungszeit
- Filter: Kombination von Multiplikation, Addition und Verzögerung

³ vgl. Krieg, 1992, Seite 51 bis 53

14.3.2. Besonderheiten bei digitalen Pulten

- Oft gibt es mehr Busse als bei analogen Pulten z.B. für Surround-Mischungen inklusive Surround-Panning
- Dynamics und Delays in jedem Kanal
- Digitale externe Geräte können direkt angeschlossen werden, d.h. es ist keine zusätzliche A/D-Wandlung nötig
- Automation: Ein statischer Szenenspeicher ist die Regel und zumeist auch eine dynamische Automation mit Timecode-Verkoppelung
- Copy- und Paste-Funktionen für die Einstellungen in den Kanälen
- Stereolink von Kanälen
- Fadergruppen
- Digital Controlled Amplifier (DCA)
- Motorfader
- Oft ist das Mischpult in ein Audionetzwerk integriert. Die Datenübertragung erfolgt z.B. über Lichtwellenleiter.

14.3.3. Bedienkonzepte digitaler Pulte

Digitale Mischpulte haben entweder eine zentrale Bedienoberfläche oder eine „analoge“ Bedienoberfläche.

A: Zentrale Bedienoberfläche

- + Kleine räumliche Abmessung
- + Meist gutes Preis-Leistungs-Verhältnis
- Unübersichtlich und gewöhnungsbedürftig
- Es können immer nur die Parameter eines selektierten Kanals bearbeitet werden

B: „Analoge“ Bedienoberfläche

- + Übersichtlich
- + Direkter Zugriff auf alle Parameter
- + Gleichzeitige Arbeiten an mehreren Kanälen
- Teuer
- Große Abmessung

14.3.4. Kaskadierung digitaler Pulte

Zwei oder manchmal auch mehrere digitale Pulte können miteinander verbunden werden, um die Anzahl der Eingangskanäle zu erhöhen. Spezielle Funktionen der einzelnen Pulte werden dann verkoppelt wie z.B. ...

... der Solobus und die Solo-Logik

... die Mixbusse

... die Automation

14.4. Automation von Mischpulten

14.4.1. Statische Automation

Eine statische Automation beruht auf einem Szenenspeicher, die Verwaltung der Szenen erfolgt in einer Szenenliste (Abb. 14.15).

- Meist nur Schaltfunktionen wie z.B. Channel Soft Mute, VCA-Gruppenzuweisung, Aux On/Off etc.
- Eine statische Automation kann MIDI-Signale ausgeben bzw. umgekehrt ist auch eine Fernsteuerung der Automation über externes MIDI-Signal möglich

Cue	Cue Name	Time	Info	X-Act
0.25	All Mute	0.50		
0.50	Soundcheck 1: Sender	0.50		
0.60	Soundcheck 2: FX, Orchester u. Monitore	0.50		
1.00	Saal offen	0.50		
2.00	Ansage	24.00		
3.00	Straßentheater	0.50		
4.00	"Heut' ist der Tag"	0.50		
5.00	Ferme D'Artaignan	0.50		
6.00	Mylady ist zurück / Herberge Franc Meunier	0.50		
7.00	Paris #1	0.50		
8.00	Paris #2 Diener / Athos	0.50		
8.10	Paris #3 Porthos	0.50		
8.20	Paris #4 Aramis / Locate 1 "Oh Herr"	0.50		
9.00	Kathedrale "Oh Herr"	0.50		
10.00	Audienzsaal Louvre	0.50		
11.00	Karmeliterkloster / "Vater"	0.50		
12.00	Kampf Kardinalsgarde / Locate 4 "Einer für Alle"	0.50		
13.00	nach dem Kampf	0.50		
14.00	Richelieu entsendet Truppen / nur Upstage Mon.	0.50		
15.00	Muskeliere marschieren ein / alle Monitore	0.50		

Abb. 14.15: Screenshot des Cadac Sound Automation Manager (SAM)

14.4.2. Dynamische Automation

Die dynamische Automation wird von einem Timecode gesteuert. Dieser kann von einem externen Gerät kommen oder auch intern im Pult generiert werden kann. Mögliche Automationsfunktionen:

- Die üblichen Schaltfunktion wie bei einer statischen Automation
- Dynamische Standardfunktionen: Auf- und Abblenden der VCA/DCA bzw. Motorfader
- Zusätzlich bei einigen Pulten: Steuerung von Filterkurven oder Dynamics
- Automationsmodi: Read, Write und Trim (Abb. 14.16)
- Punch In / Out in die Mischautomation (z.B. mit Fußtaster)
- Daten-Verwaltung von Abmischungen z.B. über einen Mixbaum mit Undo- und Redo-Funktionen

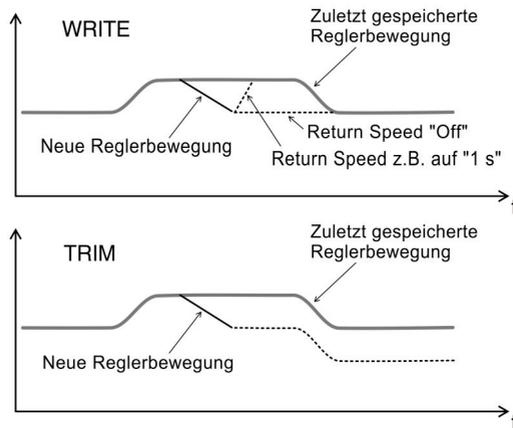


Abb. 14.16: Dynamische Automation⁴

⁴ vgl. DMX-R100, 1999, Seite 88

14.5. Übungsaufgaben

Aufgabe 1:

Ein Mischpult hat wie folgt beschriftete Bedienelemente:

GAIN, PAD, PAN, \emptyset , 48V

Beschreibe die jeweiligen Funktionen.

Was gehört nicht zum Mikrofonvorverstärker, und an welcher Position im Signalfluss findet sich stattdessen diese Funktion im Signalweg eines Kanalzuges?

Aufgabe 2:

Was bedeuten die Abkürzungen PFL und AFL?

Aufgabe 3:

Auf der Rückseite eines Tonpultes befindet sich eine 6,3 mm Klinkenbuchse mit der Beschriftung „Insert“. Wie muss ein Anschlusskabel gelötet werden, um daran ein externes Effektgerät betreiben zu können?

Hinweis: Es handelt sich um ein Mono-Effektgerät mit einem Eingang und einem Ausgang.

Aufgabe 4:

Was ist ein VCA? Was ist der Unterschied einer VCA-Steuerung zu einem herkömmlichen Fader?

Aufgabe 5:

Skizziere mit Blockschaltbildern den Signalfluss eines Eingangskanal mit Vordämpfung, Phantomspeisung, Vorverstärkung, Verpolungsschalter, Trittschallfilter, einem EQ mit drei Bändern und einem Pre- / Post-Fader schaltbaren Auspielweg. Das Signal des Eingangskanals soll über einen Panoramaregler auf einen Stereobus geleitet werden. Zusätzlich gibt es einen Bus für den Auspielweg.



Literaturtip:

Henle, Hubert: Das Tonstudio Handbuch.
München: Gunther Carstensen Verlag.

15. Klangbearbeitung



Die Themen „Kenngrößen der Filter“ und „Klangbeeinflussung“ sind für das erste Lehrjahr vorgesehen, „Einsatz von Effektgeräten“ für das zweite Lehrjahr.

15.1. Dynamikbeeinflussung

15.1.1. Definition der Dynamik

In der Audiotechnik versteht man unter Dynamik den Abstand vom kleinsten bis zum größten auftretenden Pegel. Der Begriff der Dynamik kann weiter differenziert werden in:

- Musikalische Dynamik
- Mikrofondynamik
- Systemdynamik
- Programmdynamik
- Wiedergabedynamik

15.1.1.1. Musikalische Dynamik

Die musikalische Dynamik ist die Differenz vom höchsten zum niedrigsten Schalldruckpegel bei der Aufführung (daher auch: Aufführungsdynamik).

Die untere Grenze liegt bei einem großen Sinfonieorchester bei ca. 35 bis 40 dB_{SPL}, das ist nur wenig über den Störgeräuschen in einem Saal, z.B. der Klimaanlage und nicht zuletzt der Geräusche des Publikums. Als obere Grenze werden bei lauten Passagen bis zu 110 dB_{SPL} erreicht. Damit erreicht die Aufführungsdynamik in diesem Fall ca. 70-75 dB_R.

Bei Orchesteraufnahmen im Studio ist eine größere Dynamik als bei Konzerten mit Publikum möglich, weil in einem geräuschlosen Aufnahmeraum kleinere Pegel möglich sind. Damit ist hier eine Aufführungsdynamik von ca. 80 dB_R möglich.¹

In Partituren werden die musikalischen Dynamikstufen wie in Tabelle 15.1 angegeben:

¹ vgl. Dickreiter, 1995, Seite 51

Tabelle 15.1: Musikalische Dynamikstufen²

ppp	pianissimo possibile	so leise wie möglich
pp	pianissimo	sehr leise
p	piano	leise
mp	mezzopiano	halbleise
mf	mezzoforte	halblaut
f	forte	laut
ff	fortissimo	sehr laut
fff	forte fortissimo	so laut wie möglich
Die Pegeldifferenz zwischen zwei Dynamikstufen beträgt ca. 6-10 dB _R		

15.1.1.2. Mikrofondynamik

Die Mikrofondynamik wird gemessen zwischen der Eigenstörspannung und dem Grenzschalldruckpegel des Mikrofons. Beispiel Grenzflächenmikrofon Shure Beta 91: Das Eigenrauschen wird im technischen Datenblatt mit 35 dB_A angegeben, der Dynamikbereich beträgt 125 dB bei 800 Ω Last.³

15.1.1.3. Systemdynamik

Die Systemdynamik ist die Dynamik der technischen Übertragungskette, und das ist i.d.R. die Signalführung durch ein Mischpult und weiteren Komponenten zur Klangbearbeitung. Die Systemdynamik wird gemessen zwischen dem Gerätegrundrauschen und der Übersteuerungsgrenze. Beispiel analoges Mischpult Midas Venice: Die Systemdynamik wird hier für den Frequenzbereich von 20 Hz bis 20 kHz mit -86 dB_U angegeben. Die Messung erfolgte dabei über die Line-Eingänge von zusammen 16 Eingangskanälen (Fader auf 0 dB, PanPot in der Mitte), die auf die Stereosumme geschaltet waren; Midas nennt diese Messmethode „Line to Mix Noise“ (Abb. 15.1).⁴

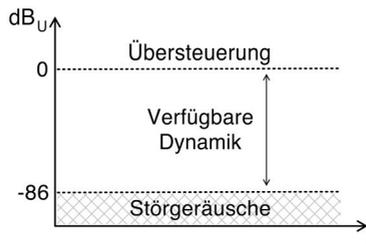


Abb. 15.1: Systemdynamik

² vgl. Dickreiter, 1995, Seite 57

³ vgl. Beta91, 2003, Seite 6

⁴ vgl. Venice, 2001, Seite 66

15.1.1.4. Programmdynamik

Die Programmdynamik ist die vom Toningenieur eingestellte Dynamik. Dies kann durch verschiedene Maßnahmen erfolgen:

- (engl.: Gain Riding): Der Toningenieur verändert aktiv den Pegel an den Fadern des Mischpultes. Dazu ist meist viel Erfahrung und eventuell auch Notenlesen wichtig
- Einsatz eines Regelverstärkers, z.B. eines Kompressors
- Durch musikalische Einschränkungen, d.h. gezielte Anweisungen an die Musiker

15.1.1.5. Wiedergabedynamik

Die Wiedergabedynamik beschreibt die dynamischen Grenzen des Wiedergabesystems, d.h. der Kombination von Leistungsverstärker und Lautsprecher. Beispiel Leistungsverstärker Yamaha H5000: Der Signal-Rausch-Abstand wird im Datenblatt mit max. 108 dB_A angegeben.⁵

15.1.2. Regelverstärker

Unter Regelverstärker versteht man Geräte, deren Verstärkungsgrad durch eine Steuerspannung beeinflussbar ist. In einem Regelverstärker ist ein VCA⁶ eingebaut. Die Verstärkung eines VCA kann über eine Gleichspannung gesteuert werden und diese wird in den meisten Anwendungen aus dem Eingangssignal abgeleitet. Das Signal, welches bearbeitet werden soll, liefert gleichgerichtet also auch die Steuerspannung (Abb.15.2).

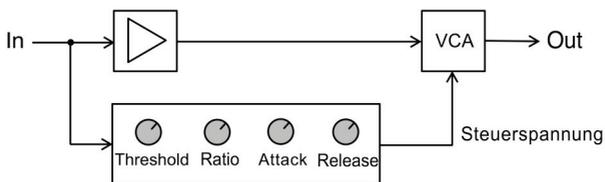


Abb. 15.2: Prinzipschaltbild eines Regelverstärkers
Bildquelle: Pieper, 1999, Seite 202

Es sind folgende Grundlegende Betriebsfunktionen möglich: Kompressor und Limiter bzw. Expander und Noise-Gate.

⁵ vgl. H5000, 2002, Seite 8

⁶ VCA = Voltage Controlled Amplifier; s. Kap. 14. „Mischpulte“.

15.1.2.1. Kompressor und Limiter

Ein Kompressor ist eine Art automatischer Regler: Übersteigt das Eingangssignal einen bestimmten Wert, den Threshold, wird die Verstärkung durch den Kompressor verringert. Das Ausgangssignal wird also bedämpft und die Dynamik eingegrenzt. Der Threshold eines Kompressors liegt normalerweise einige Dezibel unter dem gewünschten maximalen Pegel (z.B. bei -3 bis -10 dB).

Der Parameter Ratio beschreibt, um welchen Faktor das Signal nach Überschreiten des Thresholds bedämpft werden soll.

$$\text{Ratio} = \frac{\text{Eingangspegel}}{\text{Ausgangspegel}} \quad (\text{Formel 15.1})$$

Eine Ratio von 1:1 bedeutet, dass das Eingangssignal unverändert im Pegel auf den Ausgang gegeben wird. Dagegen wird bei einer Ratio von 2:1 das Ausgangssignal um die Hälfte heruntergeregelt (Abb. 15.3).

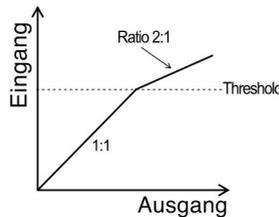


Abb. 15.3: Verstärkungskennlinie eines Kompressors

Nachdem die Pegelspitzen bei der Kompression geglättet wurden, ist das Ausgangssignal zunächst leiser als das ursprüngliche Signal. Mit einem Regler, der z.B. mit „Output Level“ oder „Make-Up Gain“ beschriftet ist, kann der Gesamtpegel wieder angeglichen werden.

Ein Limiter ist ein Kompressor mit einer Ratio von mindestens 10:1, oft beträgt die Ratio sogar 20:1 und mehr. Ein Limiter verhindert durch die Signalbegrenzung die Übersteuerung nachfolgender Komponenten oder der Übertragungstrecke, z.B. bei Funkübertragung von Audiosignalen (Abb. 15.4).

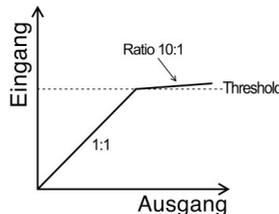


Abb. 15.4: Verstärkungskennlinie eines Limiters

Kompressoren und Limiter erhöhen die Lautheit eines Audiosignals. Die Lautheit ist dabei aber nicht mit dem Lautstärkepegel zu verwechseln oder mit der maximalen Aussteuerung.

In Abb. 15.5 ist oben die Wellenform eines unkomprimierten Musiksignals zu sehen, unten das gleiche Musikstück nach der Komprimierung. Beide Signale sind auf -3 dB normalisiert, haben also den gleichen Spitzenpegel. Die komprimierte Musik hat allerdings einen höheren Crest-Faktor und damit eine größere Lautheit.⁷

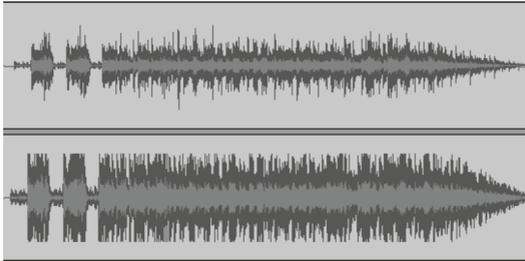


Abb. 15.5: Oben Originalmusik, unten komprimierte Musik

In der Abbildung ist zur Vereinfachung des Sachverhaltes ein Musiksignal in Mono dargestellt. Bei der Kompression von Stereosignalen ist zu beachten, dass beide Kanäle mit den gleichen Parametern gemeinsam bearbeitet werden. Dazu haben fast alle Kompressoren und Limiter eine Link-Funktion. Ohne diese würde das Klangbild im Panorama wandern.

15.1.2.2. Expander und Noise Gate

Beim Expander bzw. Noise-Gate beschreibt die Ratio, um welchen Faktor das Signal nach Unterschreiten des Thresholds bedämpft werden soll. Ein Expander hat damit die umgekehrte Funktion eines Kompressors, d.h. er vermindert die Verstärkung, wenn das Eingangssignal unter den Threshold abfällt und vergrößert somit die Dynamik des Eingangssignals (Abb. 15.6).

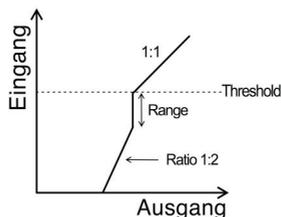


Abb. 15.6: Verstärkungskennlinie eines Expanders

⁷ s. Kap. 6.1.2.3. „Crest-Faktor C“

Mit dem Parameter Range kann eingestellt werden, um wie viel Dezibel das Signal unter dem Threshold bedämpft werden soll.

Ein Noise-Gate ist ein Expander mit einer Ratio von mindestens 1:10 bis 1:20 und einer Dämpfung von bis zu 80 dB_R. Praktisch schaltet damit ein Noise-Gate bei Unterschreiten des Threshold das Eingangssignal völlig ab (Abb. 15.7).

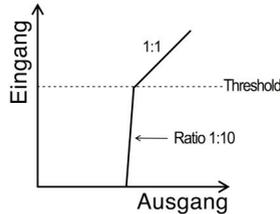


Abb. 15.7: Verstärkungskennlinie eines Noise Gates

Expander und Noise Gates werden in der Praxis zur Unterdrückung störender Geräusche in Modulationspausen eingesetzt.

15.1.2.3. Zeitbezogene Parameter von Regelverstärkern

Die oben aufgezeigten Verstärkungskennlinien zeigen das statische Verhalten eines Regelverstärkers. Mit Attack, Hold und Release gibt es zusätzlich noch zeitbezogene Parameter.

Attack Time kann mit Anstiegszeit übersetzt werden kann und *Release Time* mit Rücklaufzeit. Diese Parameter bestimmen also, mit welcher Verzögerung der Regelverstärker auf das Über- bzw. Unterschreiten des Threshold reagieren soll.

Der Parameter *Hold* findet sich oft bei Expandern und Gates. Hiermit kann eingestellt werden, wie lange die Schaltung nach Überschreiten des Threshold offen bleiben soll (Minimale Öffnungszeit).

Hard Knee und Soft Knee

Um im Bereich des Thresholds kommt es zu Übernahmeverzerrungen durch den Knick in der Kennlinie. Die sog. Knieschaltung vermindert diese Verzerrungen. Je nachdem wie stark der Knick geglättet wird, spricht man von einem Hard Knee oder Soft Knee (Abb. 15.8).⁸



Abb. 15.8: Hard und Soft Knee

⁸ vgl. Friedrich, 2008, Seite 274

15.1.3. Spezielle Regelverstärker

15.1.3.1. Ducker

Beim Ducker regelt ein externes Signal (=Key) den Regelverstärker. Die Parameter Attack und Release sind relativ lang eingestellt, damit das Eingangssignal sanft ab- und aufgeblendet wird (Abb. 15.9).

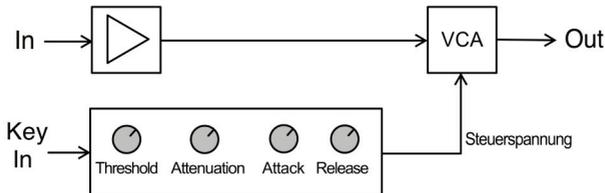


Abb. 15.9: Schaltprinzip eines Duckers
Bildquelle: Pieper, 1999, Seite 237

Anwendungsbeispiele:

- Rundfunk: Das laufende Programm wird während einer Moderation automatisch um einen einstellbaren Wert abgesenkt
- Automatische Pegelregelung von Delay- oder Nachhall-Effekten: Der Ducker regelt während des Spielens eines Instrumentes den Effektpegel herunter, erst in Spielpausen wird das Effektsignal hochgeregelt. Damit wird ein klarer Sound beim Spielen und hoher Effektpegel in den Nachklingphasen erzielt⁹

15.1.3.2. De-Esser

Ein De-Esser ist ein frequenzselektiver Kompressor. Meist wird er zur Verminderung von S- und Zischlauten bei Sprache und Gesang eingesetzt.

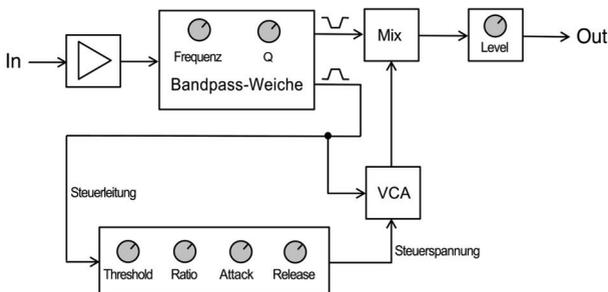


Abb. 15.10: Schaltprinzip eines De-Essers
Bildquelle: Pieper, 1999, Seite 220

⁹ vgl. Pieper, 1999, Seite 238

Abb. 15.10 zeigt das Schaltungsprinzip eines typischen De-Essers. Mit der Bandpassweiche wird der Frequenzbereich eingestellt, welcher dynamisch bearbeitet werden soll. S- und Zischlaute liegen meist zwischen 5 und 7 kHz.

15.1.3.3. Multibandkompressor

Beim Multibandkompressor können mehrere Frequenzbereiche in der Dynamik beeinflusst werden.

Beispiel BSS DPR-901: Im Zweikanalbetrieb stehen in jedem Kanal zwei Frequenzbereiche zur Verfügung, im Einkanalbetrieb sind es dann vier. Jedes Frequenzband kann komprimiert oder expandiert werden, es ist eine Art dynamische Klangregelung möglich.

Der Multibandkompressor bietet sich an für die Bearbeitung eines einzelnen Signals, wie z.B. einer Gesangsstimme aber auch für Summensignale, z.B. zur Erhöhung der Lautheit einer Abmischung beim Mastering.

15.1.3.4. Leveller

Ein Leveller hat prinzipiell die gleiche Funktion wie ein normaler Kompressor, aber mit einigen Sekunden ist der Bemessungszeitraum des Signals wesentlich länger.

Anwendung: Aussteuerungsautomatik bei Consumer-Aufnahmegeräten, z.B. der Mini-Disc oder DV-Kameras.

15.1.3.5. Transient Designer (Sound Performance Lab)

Ein Transient Designer bearbeitet nur die ersten Millisekunden des Signals. Dabei werden die schnellen, steilflankigen Pegel des Einschwingvorgangs verstärkt. Vor allem perkussive Instrumente erhalten so einen durchsetzungsfähigeren Klang in der Mischung (z.B. Kickdrum, Abb. 15.11).

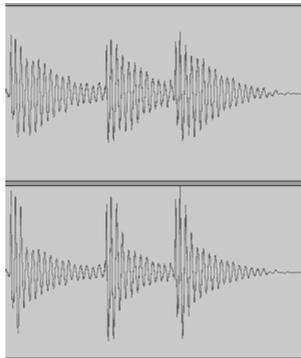


Abb. 15.11: Oben Original Kickdrum, unten mit verstärkten Transienten

15.1.3.6. Slow Gear (Boss)

Der Slow Gear erzeugt den gegenteiligen Effekt vom Transient Designer: Die Einschwingphase gespielter Töne wird unterdrückt. Damit wird der Sound eines Instruments meist stark verfremdet (z.B. als Effekt für E-Gitarre und Bass, Abb. 15.12).

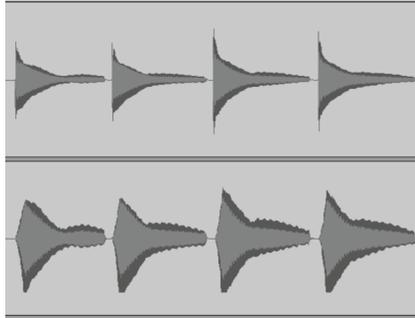


Abb. 15.12: Oben Original Kontrabass, unten mit Slow-Gear-Effekt

15.2. Filter und Equalizer

Wie Filter und Equalizer schaltungstechnisch aufgebaut sind, wurde bereits in Kapitel 6 „Grundlagen der Elektronik“ beschrieben. Hier soll es nun dagegen eher um die praktische Handhabung gehen.

15.2.1. Allgemeines zu Filter und EQ

Filter und Equalizer beeinflussen den Frequenzgang bzw. die Klangfarbe. Das kann aus technischen Gründen notwendig sein oder auch zur künstlerischen Gestaltung.

A: Technische Gründe

- Störschall herausfiltern, z.B. den Trittschall über ein Mikrofonstativ
- Rauschen vermindern, z.B. bei der Wiedergabe von Archivaufnahmen
- Dämpfung von Raumresonanzen beim Einmessen einer Beschallungsanlage

B: Künstlerische Gestaltung

- Zuweisen von Frequenzbereichen bei einer musikalischen Mehrspurmischung: Jedes Instrument sollte genug Platz im Frequenzspektrum für den jeweils typischen Klang haben. Hierbei sind spektrale Verdeckungseffekte zu vermeiden.
- Klangliche Verfremdung; z.B. aus einer sauberen Sprachaufnahme eine Telefonstimme erzeugen.

15.2.2. Analoge Filter

In Abb. 15.3 sehen wir die EQ- und Filter-Sektion von drei Kanälen eines analogen Mischpultes (Cadac F-Type).



Abb. 15.13: EQ in den Kanalzügen eines analogen Pultes (Cadac F-Type)

15.2.2.1. Hochpass- und Tiefpassfilter

Hoch- und Tiefpässe sind reine DämpfungsfILTER. Die Grenzfrequenz f_g liegt bei -3 dB Dämpfung bzw. 70% des Ursprünglichen Pegels (Abb. 15.14). Gedämpfte Frequenzen unterhalb f_g erfahren eine Phasenverschiebung von 45° .

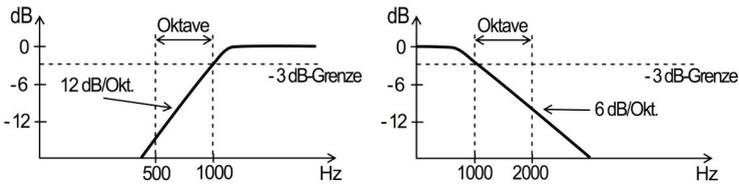


Abb. 15.14: Hoch- und Tiefpass

15.2.2.2. Bandpassfilter

Ein Bandpassfilter ist im Prinzip eine Kombination von Hoch- und Tiefpass, d.h. der Übertragungsbereich wird bandbegrenzt (Abb.15.15). Gedämpfte Frequenzen unterhalb der Grenzfrequenzen bei -3 dB erfahren eine Phasenverschiebung von 45° .

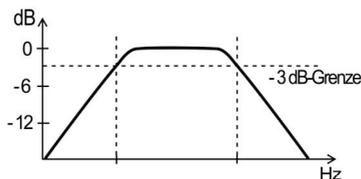


Abb. 15.15: Bandpass

15.2.2.3. Kuhschwanzfilter

Beim Kuhschwanzfilter ist eine Anhebung oder Absenkung einstellbar. Die Eckfrequenz liegt 3 dB unterhalb der maximalen Anhebung bzw. 3 dB über der minimalen Absenkung (Abb. 15.16).

Diese Filter haben einen großen Wirkungsbereich, daher ist ein sparsamer Gebrauch zu empfehlen; Meist werden Einstellungen von max. ± 6 dB vorgenommen.

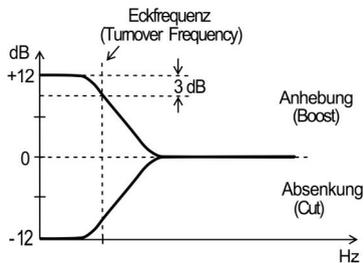


Abb. 15.16: Kuhschwanzfilter

15.2.2.4. Glockenfilter

Sind Glockenfilter als vollparametrische Filter ausgeführt, dann können folgende Parameter verändert werden (Abb. 15.17):

- Mittenfrequenz
- Anhebung oder Absenkung
- Bandbreite bzw. Güte

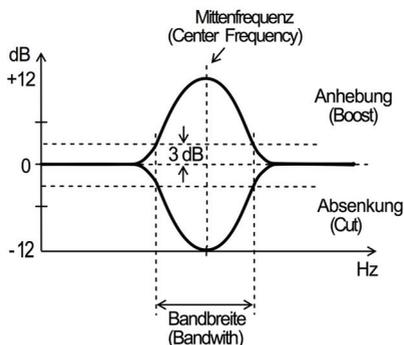


Abb. 15.17: Glockenfilter

Berechnung der Mittenfrequenz f_0 bei bekannten Grenzfrequenzen f_{gu} und f_{go} :

$$f_0 = \sqrt{f_{gu} * f_{go}} \quad (\text{Formel 15.2})$$

Berechnung der Bandbreite Δf :

$$\Delta f = f_{go} - f_{gu} \quad (\text{Formel 15.3})$$

Berechnung der Güte Q :

$$Q = \frac{f_0}{\Delta f} \quad (\text{Formel 15.4})$$

Beispiel:

Die Grenzfrequenzen eines Glockenfilters liegen bei 1,5 kHz und 2 kHz.

$$\text{Mittenfrequenz } f_0 = \sqrt{1500 \text{ Hz} * 2000 \text{ Hz}} = 1732 \text{ Hz}$$

$$\text{Bandbreite } \Delta f = 2000 \text{ Hz} - 1500 \text{ Hz} = 500 \text{ Hz}$$

Dann beträgt die Filtergüte:

$$Q = \frac{1732 \text{ Hz}}{500 \text{ Hz}} = 3,5$$

15.2.2.5. Kerbfilter

Ein Kerbfilter ist ein Glockenfilter mit sehr hoher Güte (z.B. $Q = 10$), und ist oft als reines Dämpfungsfiler ausgelegt (Abb. 15.18).

Anwendung: Feedbackunterdrückung in Monitoranlagen, Störfrequenzen werden hier schmalbandig herausgefiltert.

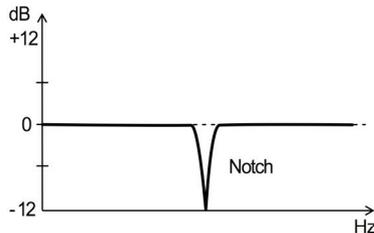


Abb. 15.18: Kerbfilter

15.2.2.6. Graphischer Equalizer

Es ist hier eine Anhebung oder Absenkung für festgelegte Frequenzbänder möglich (z.B. ± 12 dB oder ± 15 dB). Der graphische EQ muss auch bei maximaler Anhebung mehrerer Bänder übersteuerungsfest sein; Meist zeigt daher eine Overload-LED, wenn die Übersteuerungsgrenze überschritten wird.

Graphische Equalizer können als Oktavbandfilter mit 10 Bändern, 2/3-Oktavbandfilter mit 16 Bändern oder Terzbandfilter mit 31 Bändern ausgeführt sein. Oft ist zusätzlich ein Hoch- und Tiefpass integriert (Abb. 15.19).

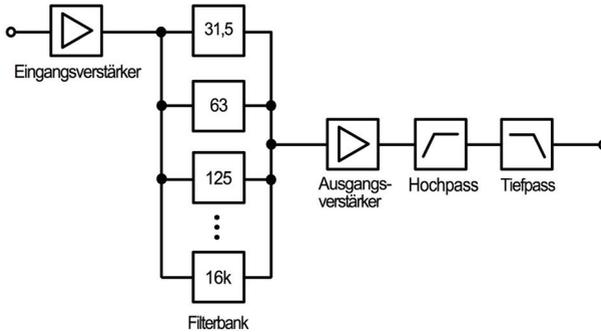


Abb. 15.19: Graphischer EQ

15.2.2.7. Allpassfilter

Allpassfilter haben eine konstante Verstärkung, erzeugen aber frequenzabhängige Phasenverschiebungen.

Anwendung:

- Ausgleich von Phasenfehler bei Hoch-, Tief- und Bandpässen
- In Effektgeräten: z.B. beim Phaser und Vibrato

15.2.3. Digitale Filter

Digitale Filter sind als Software-Plug-Ins in Audio Workstations (DAW) integriert. Es gibt aber auch digitale Filter als eigenständige 19"-Geräte. Bei beiden Varianten erfolgt die Bedienung über eine graphische Oberfläche (Abb. 15.20). Die Speicherung von Einstellungen oder der Zugriff auf werkseitige Voreinstellungen sind obligatorisch.

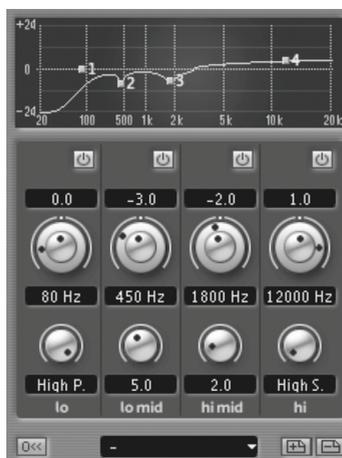


Abb. 15.20: EQ einer digitalen Audio Workstation (Cubase SE)

Die unterschiedlichsten Frequenzverläufe werden durch mathematische Operationen wie Addition und Multiplikation und/oder durch eine Signalverzögerung erzeugt. Es kann zwischen zwei digitalen Filterprinzipien unterschieden werden:¹⁰

- Nichtrekursive Filter (engl.: Finite Impulse Response Filter = FIR):
 - Der Ausgangswert wird aus dem Eingangswert abgeleitet
 - Mehrere unterschiedlich gewichtete und zeitlich verschobene Abtastwerte werden addiert

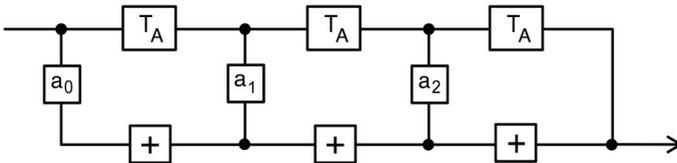


Abb. 15.21: Digitales FIR-Filter
Bildquelle: Dickreiter, 1990, Seite 360

- Rekursive Filter (engl.: Infinite Impulse Response Filter = IIR, Abb. 15.21)
 - Rückführung der Ausgangswerte und Gewichtung mit einem Koeffizient

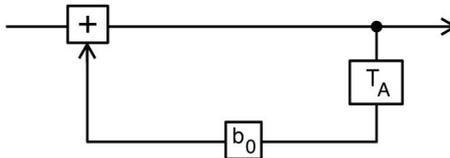


Abb. 15.22: Digitaler IIR-Filter 1. Ordnung
Bildquelle: Dickreiter, 1990, Seite 360

T_A : Speicher für einen Abtastwert und eine Abtastperiode

a_0 bzw. b_0 : Gewichtungskoeffizienten

+ : Addition

Nichtlinearitäten bei digitalen Filtern

Die weitläufige Annahme, dass alle digitalen Filter einen linearen Phasengang hätten, ist falsch. Unterschiedliche Algorithmen erzeugen durchaus Phasenfehler. Es ist aber grundsätzlich möglich, digitale Filter mit linearem Phasengang zu konstruieren bzw. zu programmieren, nämlich als sog. LTD-Filter (=Linear Time-Invariant Discrete Filter).

¹⁰ vgl. Krieg, 1992, Seite 53

Grenzen von digitalen Filtern

Die Grenzen von digitalen Filtern liegen in der Genauigkeit der Abtastwerte und Koeffizienten. Entsprechend kann es zu Fehlern bei den Ergebnissen der Rechenoperationen kommen. Die Berechnungen können mit Festkomma oder Gleitkomma durchgeführt werden.

- Festkomma-Berechnung = fest definierte Stellenzahl für die binären Werte vor und hinter dem Komma
- Gleitkomma-Berechnung = Datendarstellung mit Vorzeichenbit, Mantisse und Exponent
 - Vorteil Gleitkomma: Bei gleicher Anzahl der Bits größerer Dynamikbereich im Vergleich zu Festkomma-Algorithmen
 - Nachteil: Kompliziertere Rechenvorgänge und damit größere Latenzen

15.3. Effektgeräte

15.3.1. Echo

Das Echo (engl.: Delay) ist zunächst ein akustisches Phänomen: Schall wird reflektiert und zurückgeworfen. Das Delay als elektronisches Effektgerät simuliert diese Echos. Dabei kann es als Zumischeffekt genutzt werden z.B. um eine E-Gitarre „breit zu machen“ oder auch als Einschleifeffekt z.B. um Laufzeitunterschiede einer Beschallungsanlage auszugleichen.

15.3.1.1. Mechanisches Analog-Delay (Bandecho)

Eine Endlos-Tonbandschleife wird am Aufnahmekopf und mehreren Wiedergabe-Tonköpfen vorbeigezogen. Abhängig von der Bandgeschwindigkeit ergeben sich verschiedene Verzögerungszeiten. Bei Bandechos mit drei Wiedergabeköpfen kann zum Beispiel passend zum Songtempo ein Achtel-, Viertel- und Halbnoten-Delay eingestellt werden. Über den Feedback-Regler wird das verzögerte Signal nochmals auf den Aufnahmekopf zurückgeführt. Dies führt zu mehrfachen Wiederholungen mit abnehmendem Pegel (Abb. 15.22).

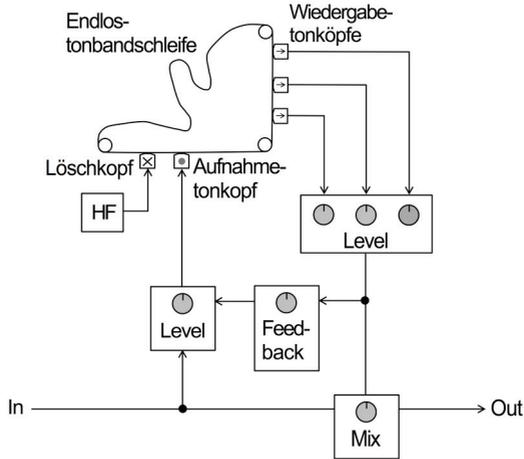


Abb. 15.23: Bandecho

15.3.1.2. Elektronisches Analog-Delay

Ein elektronisches Analog-Delay ist mit einem Eimerkettenspeicher aufgebaut. Das ist im Prinzip eine größere Anzahl von Speichern, in die das Eingangssignal nacheinander geleitet wird. Durch den Tiefpassfilter im Signalausgang werden die Treppentufen im Signal wieder geglättet (Abb. 15.23).

- Vorteil gegenüber Bandecho: Keine Verschleißteile
- Nachteil: Eingeschränkte Bandbreite, klingt höhenarm

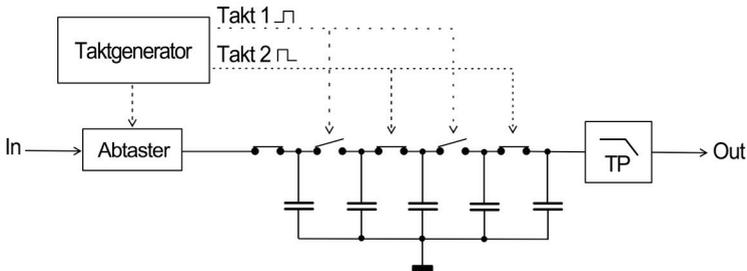


Abb. 15.24: Elektronisches Analog-Delay

15.3.1.3. Digitales Delay

Das digitalisierte Audiosignal über einen Digital Sound Processor (DSP) in einem Random Access Memory (RAM) geschoben und dort zwischengespeichert. Nach einer gewissen Zeit werden diese Daten wieder ausgelesen und zum D/A-Wandler geleitet. Die maximale Verzögerungszeit ist dabei abhängig von der Größe des RAM-Speichers. Im Read Only Memory (ROM) sind das Betriebssystem und Steuerbefehle abgelegt für das Gerät abgelegt (Abb. 15.24).

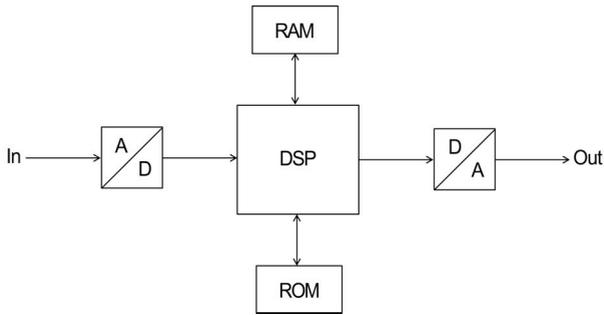


Abb. 15.25: Digitales Delay

Musikalischer Einsatz des Echos

Die Delayzeit kann an die rhythmische Struktur des Musikstückes angepasst werden. Die Verzögerungszeiten für eine Viertelnote lassen sich bei bekannten Beats per Minute (BPM) wie folgt berechnen:

$$t = \frac{60 \text{ s}}{\text{BPM}} \quad (\text{Formel 15.5})$$

Einheit [s]

Beispiel: Ein Lied hat ein Songtempo von 110 BPM, das Viertelnoten-Delay beträgt dann...

$$t = \frac{60 \text{ s}}{110} = 0,545 \text{ s} = 545 \text{ ms}$$

Ein Halbnoten-Delay hätte dann die doppelte Verzögerungszeit von 1,091 s, ein Achtelnoten-Delay hat dagegen nur 273 ms.

15.3.2. Hall

15.3.2.1. Natürliche Hallerzeugung

Raummikrofone

Zusätzliche Mikrofone werden im Aufnahmerraum platziert, um die Akustik aufzufangen. Beispiel Live-Konzert: Zwei Nierenmikrofone werden außerhalb des Hallradius aufgestellt, ausgerichtet in die von der Bühne abgewandenen Raumecken.

Hallraum

Das zu verhallende Signal wird trocken aufgenommen und über einen Lautsprecher in einen Hallraum übertragen. Dort installierte Mikrofone nehmen die Raumantwort auf, diese Signale werden dann zum Originalsignal dazugemischt.

15.3.2.2. Mechanische Hallerzeugung

Federhall

Der Federhall ist gebräuchlich bei E-Gitarrenverstärkern. Eine Spule am einen Ende der Feder erzeugt mit einer elektrischen Wechselspannung (=Signal der E-Gitarre) ein Magnetfeld, welches mit dem Feld eines Dauermagneten in Wechselwirkung tritt. Die dabei wirkenden Kräfte versetzen die Feder in Schwingung. Eine Aufnahmespule am anderen Ende der Feder induziert wieder eine Wechselspannung, die verstärkt als Hallsignal dazugemischt wird.

Hallplatte

Die Hallplatte ist eine ca. 1 x 2 m große rechteckige dünne Stahlplatte, die mit gespannten Federn in einen Rahmen aufgehängt ist. Mit Kontaktlautsprechern wird diese Platte in Schwingung versetzt. Mehrere Piezo-Wandler nehmen diese Schwingungen auf und liefern so das Hallsignal.

Hallfolie

Hallfolien haben mit ca. 20 x 30 cm geringere Abmessungen verglichen mit einer Hallplatte. Eine hauchdünne, galvanisch hergestellte Goldfolie wird durch einen miniaturisierten Schwingungsgeber angeregt und ein ebenso kleiner Schwingungsaufnehmer liefert dann das Hallsignal.

15.3.2.3. Digitale Hallgeräte

Beim sog. Faltungshall sind im Speicher des Hallgeräts Reflexionsmuster echter Räume abgelegt, damit ist eine täuschend echte Simulation einer Raumakustik möglich. Herkömmliche digitale Hallgeräte versuchen dagegen durch Berechnungsalgorithmen die Akustik eines Raumes nachzubilden. Die Algorithmen sind sozusagen Voreinstellungen (Presets), welche die Bezeichnung des Raumes tragen, dessen Nachhall simuliert werden soll. Beispiele:

- Hall: Konzertsaal
- Room: Wohnraum
- Chamber: Hallkammer
- Cathedral: Kirche

Auch für die vorher aufgeführten Methoden der natürlichen und mechanischen Hallerzeugung gibt es entsprechende Algorithmen zur digitalen Nachbildung:

- Ambience: Simuliert Raummikrofone
- Spring: Hallfeder
- Plate: Hallplatte

Durch die digitale Signalbearbeitung sind aber auch unnatürliche Effekte möglich wie z.B.:

- Gated-Reverb: Nachhall wird durch ein Gate abgeschnitten
- Reverse: Rückwärtsecho

Wenn ein Algorithmus am Hallgerät ausgewählt wurde, dann kann dieser in seinen Parametern verändert werden. Die wichtigsten Parameter sind:

- Pre Delay: Vorverzögerung vor dem Einsetzen des Nachhalls
- Reverb Time: Nachhallzeit
- Density / Diffusion: Halldichte / Zerstreuung
- Room Size: Raumgröße
- HF-Damp: Höhenabsenkung; simuliert die Dämpfung durch die Luft

15.3.3. Weitere Effekte

15.3.3.1. Flanger

Beim Flanger wird ein leicht verzögertes Signal dem Originalsignal hinzugemischt. Durch eine phasenverschobene Addition entstehen Kammfilter-Effekte (Abb. 15.25).

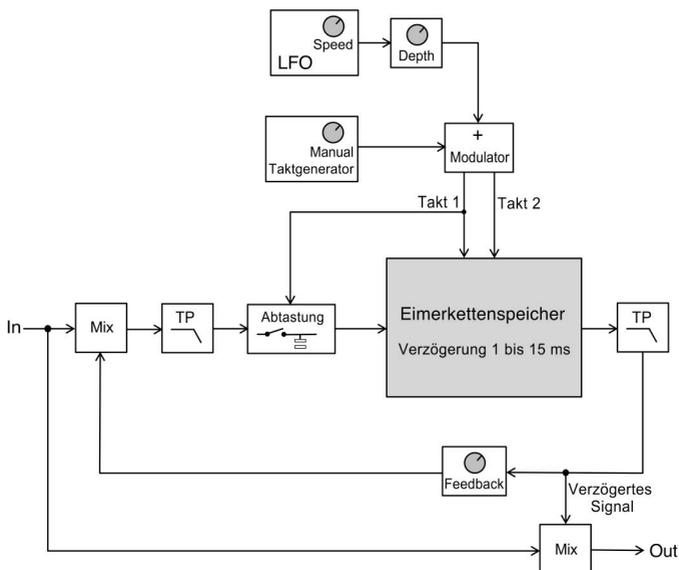


Abb. 15.26: Flanger
Bildquelle: Pieper, 1999, Seite 111

LFO : Low Frequency Oscillator. Langsam schwingender Oszillator, der die Taktfrequenz und damit die Kammfilterfrequenzen ständig ändert. Dadurch entsteht erst der typische schwebende Effekt des Flangers.

Speed : Frequenz des LFO-Signals. Beeinflusst die Geschwindigkeit, mit der die Kammfilterfrequenzen wandern.

Depth : Amplitude des LFO-Signals. Beeinflusst die Intensität des Effekts.

Manual : Verändern der Taktfrequenz. Beeinflusst die Verzögerungszeiten und damit die Einsatzfrequenz der Kammfilter (Kleiner Wert = Kammfilter nur auf hohen Frequenzen; Großer Wert = Kammfiltereffekt erstreckt sich über das ganze Spektrum)

Feedback : Mit dem Feedback-Regler kann das Ausgangssignal zurück auf den Eingang gegeben werden.

15.3.3.2. Phaser

Ein Phaser hat eine ähnliche Funktion wie ein Flanger, d.h. es entsteht ein Kammfilter-Effekt durch eine phasenverschobene Addition. Schaltungstechnisch ist ein Phaser aber mit Allpassfiltern aufgebaut, die wesentlich kürzere Verzögerungszeiten als der Eimerkettenspeicher eines Flangers ermöglichen. Die Bezeichnung „4-Stage“ bis „12-Stage“ geben an, wie viele Allpässe hintereinander geschaltet sind und damit auch, wie viele Kammfilterfrequenzen auftreten. Zum Beispiel sind es zwei Kammfilterfrequenzen bei 4-Stage-Phasern (Abb. 15.26).

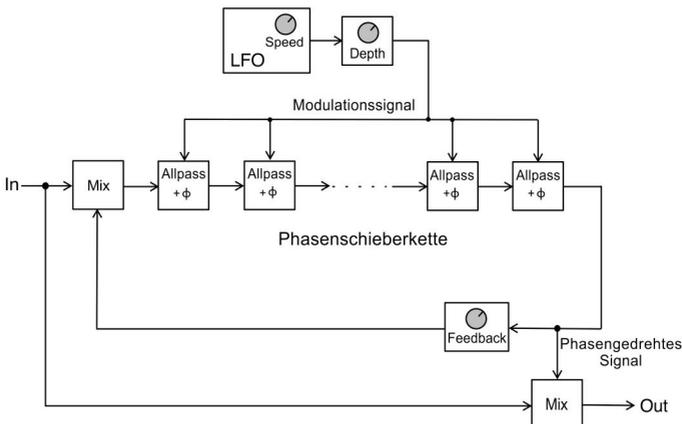


Abb. 15.27: Phaser
Bildquelle: Pieper, 1999, Seite 120

15.3.3.3. Chorus

Der Chorus hat im Prinzip das gleiche Schaltbild wie ein Flanger. Allerdings hat ein Chorus eine erheblich längere Verzögerungszeit von 30 ms und mehr. Es

treten hier keine hörbaren Kammfiltereffekte mehr auf, stattdessen sind zwei getrennte Audio-Ereignisse wahrzunehmen (Abb. 15.27).



Abb. 15.28: Chorus-Bodeneffekt (Boss Super Chorus)

Effect Level : Zumischen des Effekts zum Direktsignal (Entspricht „Mix“)

EQ : Einfache Klangregelung durch einen Tiefpass

Rate : Frequenz des LFO-Signals (Entspricht „Speed“)

Depth : Amplitude des LFO-Signals

15.3.3.4. Tremolo

Das Tremolo ändert in Abhängigkeit vom internen Oszillator die Lautstärke des Eingangssignals (=Amplitudenmodulation). Für die Modulation kann zum Beispiel ein Optokoppler eingesetzt werden, d.h. eine Kombination aus einem Glühbirnchen und einem lichtempfindlichem Widerstand. Je nach einfallender Lichtintensität ändert sich der Widerstandswert und damit der Pegel des Eingangssignals (Abb. 15.28 und 15.29).

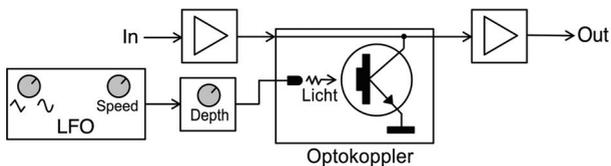


Abb. 15.29: Tremolo
Bildquelle: Pieper, 1999, Seite 128

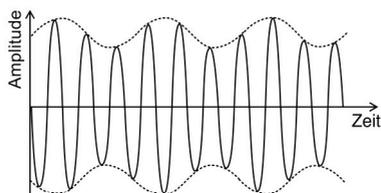


Abb. 15.30: Amplitudenmodulation

15.3.3.5. Vibrato

Das Vibrato ändert in Abhängigkeit vom LFO die Tonhöhe des Eingangssignals (=Frequenzmodulation) (Abb. 15.30 und 15.31).

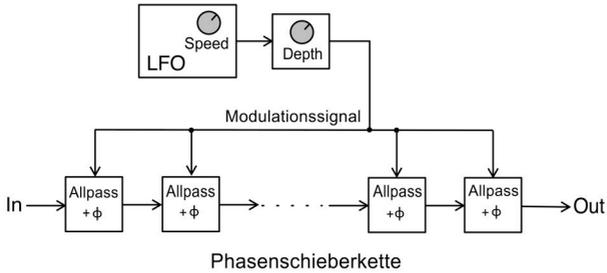


Abb. 15.31: Vibrato

Bildquelle: Pieper, 1999, Seite 137

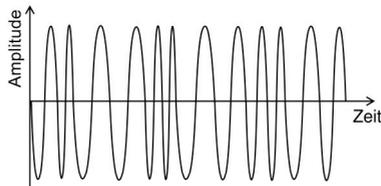


Abb. 15.32: Frequenzmodulation

15.3.3.6. Pitch Shift

Ein Pitch Shift ist ein Effekt zur dauerhaften Veränderung der Tonhöhe (=Transponierung). Anwendungsbeispiele:

- Vorsichtiger Einsatz bei Gesang (z.B. +5 Cent links, -5 Cent rechts)
- Stärkerer Einsatz bei Gitarre und Bass (z.B. Hinzumischen einer ganzen Terz)

15.3.3.7. Wah Wah

Ein Wah Wah ist ein Bandpassfilter mit variabler Mittenfrequenz. Als Bodeneffekt ist ein Wah Wah manuell zu bedienen (Abb. 15.32). Es gibt diesen Effekt aber auch als 19“-Gerät, dann meist mit einer automatischen „Rate“, mit der die Mittenfrequenz des Bandpassfilters über das Spektrum wandert.



Abb. 15.33: Wah-Wah-Fußpedale
(Dunlop und DOD)

15.3.3.8. Verzerrer

Das Prinzip eines Verzerrers beruht darauf, dass beim Übersteuern eines Verstärkers nichtlineare Verzerrungen entstehen, d.h. es werden dem ursprünglichen Signal harmonische Oberschwingungen hinzugefügt. Dabei ist es gleichgültig, ob es sich um einen Röhren- oder Transistorverstärker handelt. Allerdings gibt es Unterschiede im Klang, da eine Röhre eine andere Kennlinie hat als ein Transistor. Bei Röhren setzen die Verzerrungen langsam ein, während bei einem Transistor aufgrund der scharf abknickenden Kennlinie das Signal sofort ins Clipping¹¹ geht. Röhrensaltungen werden daher für Verzerrer mit einem sog. „Soft Clipping“ eingesetzt und der Effekt wird dann meist „Overdrive“ genannt. Transistoren verzerrten dagegen mit einem „Hard Clipping“, diesen Effekt nennt man schlicht „Distortion“. In Abb. 15.33 sehen wir verschiedene Verzerrer für E-Gitarren.



Abb. 15.34: Verzerrer-Fußpedale
(Fulltone, Korg, Ibanez und Marshall)

¹¹ s. Kap. 17.3.2. „Clipping bei Endstufen“

15.3.3.9. Vocoder

Das Kunstwort Vocoder steht ausgeschrieben für „Voice Coder“. Der Vocoder wurde in den 1930er von Homer Dudley¹² für die Bell Laboratories entwickelt. Ursprünglich, um eine menschliche Stimme elektronisch nachbilden zu können. Codierte Sprache sollte dadurch abhörsicher übertragen werden können. Als musikalisches Effektgerät wurde der Vocoder erst sehr viel später ab den 1970er eingesetzt.

Ein Vocoder besteht aus einem Analyse- und einem Syntheseteil. Bei der Analyse werden aus dem Originalsprachsignal verschiedene Sprachparameter abgeleitet, die dann als Steuersignale an die Synthesebaugruppen weitergeleitet werden (Abb. 15.34).

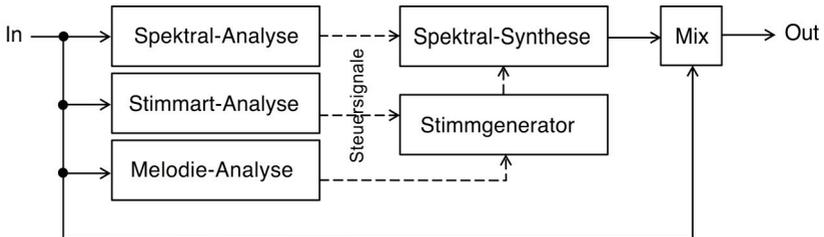


Abb. 15.35: Vocoder

Die Analyse geschieht in drei parallelen Funktionsblöcken. Bei der Spektralanalyse werden die Frequenzanteile des Eingangssignals erfasst und daraus Steuersignale für den Mund-, Rachen- und Nasenfilter abgeleitet. Im Prinzip funktioniert das durch eine gewisse Anzahl von Bandpassfiltern (z.B. mit 20 Bändern). Bei der Stimmartanalyse wird zwischen einem stimmhaften oder stimmlosen Laut unterschieden. Das resultierende Steuersignal ist hier dann nur eine Ja-Nein-Information. Bei der Melodieanalyse wird der Grundton des Stimmsignals erfasst und als Melodiekennwert weitergeleitet.

Die Synthese ist in nur zwei Blöcken aufgeteilt: Der Stimmgenerator erzeugt bei stimmlosen Lauten ein Rauschen oder bei stimmhaften Lauten eine Impulsfolge mit den entsprechenden Obertönen. Der Melodiekennwert steuert die Frequenz dafür. Das Ausgangssignal des Stimmgenerators durchläuft dann noch die Filterbank der Spektralsynthese.¹³

¹² Homer Dudley (1896 – 1987)

¹³ vgl. Funkschau, 07/1978

15.3.3.10. Exciter und Enhancer

Exciter und Enhancer beeinflussen die Höhenwiedergabe durch künstlich erzeugte Oberwellen und Phasenverschiebungen. Unterscheidung der beiden Effekte:

- Exciter: Hochpass und Verzerrer
- Enhancer: Mehrere Bandpassfilter und Verzerrer

15.3.3.11. Leslie

Durch rotierende Lautsprecher wird beim Leslie ein akustischer Doppler-Effekt erzeugt (Abb. 15.35). Die Drehgeschwindigkeiten sind z.B. 60 und 400 Umdrehungen pro Minute das entspricht einer Modulation von 1 Hz bzw. 6,7 Hz. Typisch ist der „Anlauf-Effekt“ beim Einschalten des Motors, bis dieser die Enddrehzahl erreicht.

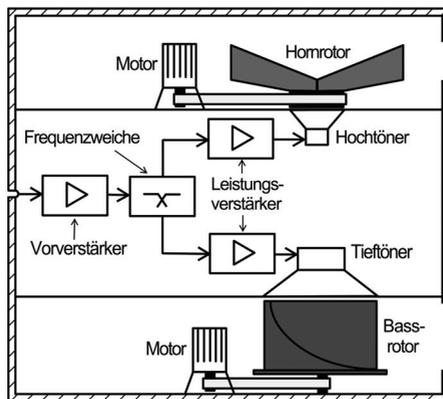


Abb. 15.36: Leslie

Mikrofonierung eines Leslies:

Üblicherweise zwei Mikrofone für den Hornrotor, die auf die Drehachse gerichtet sind und zusätzlich ein Mikrofon für den Bassrotor.

Leslie-Simulatoren:

- Elektronische Nachbildung eines Leslies als 19“-Gerät oder Bodeneffekt
- Beispiele: Hughes & Kettner Tube Rotosphere oder Boss RT-20

15.4. Übungsaufgaben

Aufgabe 1:

Wie ist allgemein der Begriff „Dynamik“ definiert?

Aufgabe 2:

Ist ein Kompressor ein Zumisch- oder ein Einschleifeffekt? Begründe!

Aufgabe 3:

Ein Kompressor hat folgende Bedienelemente:

THRESHOLD

RATIO

ATTACK

RELEASE

Beschreibe die Funktion der einzelnen Parameter.

Aufgabe 4:

Welche Funktionen können an einem vollparametrischen Equalizer eingestellt werden?

Aufgabe 5: (Frage bei der Abschlussprüfung Sommer 2001 der IHK Erfurt)

Ordne nachfolgende Geräte je einer Gruppe in der Tabelle zu:

Hall, Kompressor, Equalizer, Chorus, Gate, Exciter.

Verzögernde Geräte	Dynamikbearbeitende Geräte	Entzerrende Geräte

Aufgabe 6:

Skizziere jeweils die statische Kennlinie eines Limiters und eines Kompressors.



Literaturtipp:

Pieper, Frank: Das Effekte Praxisbuch.
München: Gunther Carstensen Verlag.

16. Frequenzweichen, Controller und Leistungsverstärker



Dieses Kapitel steht im Zusammenhang mit dem Themenbereich „Lautsprecher“, also des nachfolgenden Kapitels. Einordnung im Rahmenlehrplan: Erstes Lehrjahr.

16.1. Frequenzweichen

Warum benötigt man Frequenzweichen?

- Zur Vermeidung der Überschneidung von Frequenzbereichen mehrerer Lautsprecher (Tief- Mittel- und Hochtöner) und der damit einhergehenden Interferenzen
- Zum Schutz der Hochtonlautsprecher vor Überlastung

16.1.1. Passive Frequenzweichen

Die Platine einer passiven Frequenzweiche ist in der Lautsprecherbox eingebaut. Die Frequenztrennung erfolgt durch passive Bauelemente wie z.B. Luftspulen und bipolare Elektrolytkondensatoren, welche so dimensioniert sein müssen, dass sie den hohen Pegel des Lautsprechersignals aushalten. Die Optimierung der Parameter wie zum Beispiel der Übernahmefrequenz erfolgt vom Hersteller und kann vom Anwender nicht geändert werden.¹

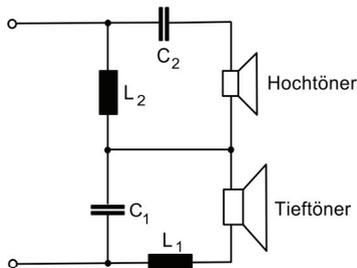


Abb. 16.1: Passive Weiche

Bildquelle: Albrecht et al., 1995, Seite 127

Die in Abb. 16.1 dargestellte passive Frequenzweiche für einen Zweigeweglautsprecher hat im Übergangsbereich von Hoch- und Tiefpass eine Dämpfung von 12 dB/Oktave. Abb. 16.2 skizziert die Übernahmefrequenz dieser Schaltung, die bei -3 dB liegt.

¹ vgl. Albrecht et al., 1995, Seite 127 und Stark, 1999, Seite 175

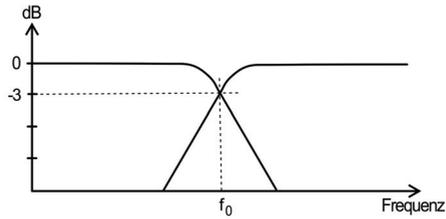


Abb. 16.2: Übernahmefrequenz
Bildquelle: Albrecht et al., 1995, Seite 127

Die Werte für die Spulen und Kondensatoren der aufgeführten Schaltung lassen sich wie folgt berechnen:²

$$L_1 = \frac{Z}{2\pi * f_0} \quad (\text{Formel 16.1})$$

$$L_2 = \frac{Z}{3,2\pi * f_0} \quad (\text{Formel 16.2})$$

Einheit [H]

$$C_1 = \frac{1,6}{2\pi * f_0 * Z} \quad (\text{Formel 16.3})$$

$$C_2 = \frac{1}{3,2\pi * f_0 * Z} \quad (\text{Formel 16.4})$$

Einheit [F]

f_0 : Übernahmefrequenz [Hz]

Z : Impedanz des jeweiligen Lautsprechers [Ω]

16.1.2. Aktive Frequenzweichen

Bei aktiven Weichen erfolgt die Frequenztrennung vor den Leistungsverstärkern (Abb. 16.3).

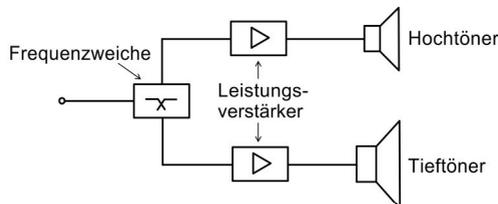


Abb. 16.3: Aktive Weiche

² vgl. Albrecht et al., 1995, Seite 127

Am Eingang der aktiven Weiche liegt das Audiosignal mit Leitungspiegel an und deshalb können normale Filterschaltungen bzw. EQs verwendet werden, deren Parameter dann auch vom Anwender verändert werden können:

- Veränderbare Übernahmefrequenzen
- Pegelanpassung der einzelnen Systeme
- Frequenzgangkorrektur

16.2. Controller

16.2.1. Funktionen eines Controllers

- Pegelanpassung und Entzerrung
- Aktive Frequenzweiche
- Phasengangkorrektur nach der Weiche
- Übersteuerungsschutz (Peak- / RMS-Limiting):
 - Das Signal vom Verstärkerausgang wird als SpeakerSense zum Controller zurückgeführt
 - Eine Regelverstärkerschaltung begrenzt den Ausgangspegel des Controllers in Abhängigkeit vom Ausgangspegel des Leistungsverstärkers (Abb. 16.4)

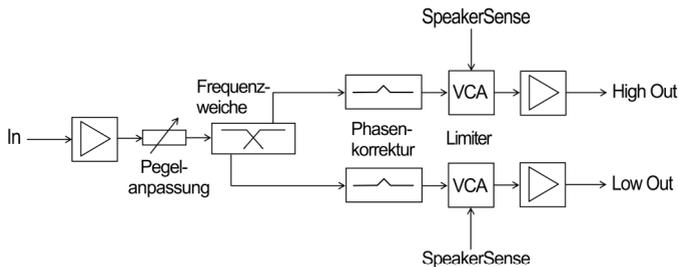


Abb. 16.4: Prinzipschaltung eines Controllers
Bildquelle: McCarthy, 2001, Seite 11

Andere mögliche Messgrößen, die ein Controller auswerten kann sind zum Beispiel die Erfassung der Schwingspulentemperatur oder der Membranauslenkung des Lautsprechers.³

³ vgl. Ahnert und Steffen, 1993, Seite 152

16.2.2. Einbindung eines Controllers in den Signalweg

Seriell:

Ein Eingangssignal → ein Controller → ein Verstärker und ein Lautsprecher

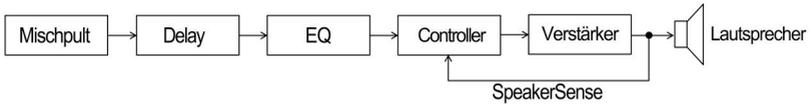


Abb. 16.5: Controller Seriell

Parallel:

Ein Eingangssignal → ein Controller → mehrere Verstärker und Lautsprecher

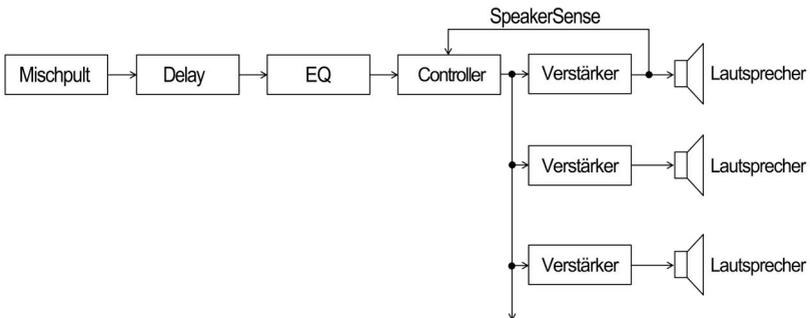


Abb. 16.6: Controller Parallel

Die Gesamteingangsimpedanz der parallel geschalteten Verstärker darf einen gewissen Wert nicht unterschreiten, z.B. laut Meyer Sound 600 Ω . In der Praxis lassen sich somit maximal 16 Verstärker mit einer Eingangsimpedanz von 10 k Ω parallel an einem Controller betreiben. Der Verstärker mit dem höchsten Ausgangspegel muss an die SpeakerSense-Leitung angeschlossen sein. Ein Nachteil der parallelen Schaltung ist aber, dass beim Ausfall des Verstärkers an der SpeakerSense-Leitung auch alle anderen Verstärker bzw. Lautsprecher keinen Übersteuerungsschutz mehr haben.⁴

⁴ vgl. McCarthy, 2001

16.3. Leistungsverstärker

16.3.1. Technische Daten von Verstärkern

Als Beispiel soll hier der Verstärker H5000 von Yamaha dienen.

Tabelle 16.1: Technische Daten eines Verstärkers (Yamaha H5000)⁵

Ausgangsleistung (20Hz bis 20kHz und THD+N < 0,1%)	Stereo mit $RL=8\Omega \rightarrow 550W$ Stereo mit $RL=4\Omega \rightarrow 700W$
Frequenzgang ($RL=8\Omega, P_0=1W$)	10Hz bis 50kHz, 0dB +/-1dB
Klirrfaktor THD+N	< 0.05% (20Hz bis 20kHz, Halbe Leistung)
Signal-Rausch-Abstand	103dB (Eingang 600 Ω , 12.7kHz LPF)
Rücklaufzeit (bei 8 Ω Stereo)	$\pm 30V$ / Mikrosekunde
Dämpfungsfaktor	> 200 bei $RL=8\Omega$ und 1kHz
Eingangsempfindlichkeit	+6 dB (Nominalleistung in 8 Ω)
Verstärkungsfaktor	32 dB
Eingangsimpedanz	30 k Ω (symmetr.), 15 k Ω (unsymmetr.)
Temperaturschutzschaltung	Stummschaltung bei Innentemperatur > 95 °C
Leistungsaufnahme	500 W / 700 VA



Abb. 16.7: Leistungsverstärker (Yamaha H5000)

Ausgangsleistung bzw. Nennleistung [W]

Die abgegebene Leistung einer Endstufe ist abhängig von der Impedanz des angeschlossenen Lautsprechers. Je niedriger die Impedanz, desto höher ist die Leistung. Weniger als 2 Ω Nennimpedanz sollten aber vermieden werden, da sich

⁵ vgl. H5000, 2002, Seite 8 und 9

die Endstufe ansonsten stark erwärmt und eventuell eine integrierte Sicherheitsabschaltung aktiviert wird.

- Sinusdauerleistung (Nennleistung):
 - Nach der DIN 45566 / 45567: Messung mit einem Sinus-Dauerton über 10 Minuten
 - Nach IEC-Vorschrift: Nennleistung im 24-Stunden Dauerbetrieb
- Spitzenleistung (Musikleistung):

Die Spitzenleistung ist höher als die Sinusleistung, gilt aber nur für kurze Impulse nach Aussteuerungspausen. Die Ladekondensatoren des Netzteils sind auf eine höhere Spannung aufgeladen, was aber nur kurzzeitig anhält (ca. 1 bis 2 Sekunden). Bei Verstärkern mit stabilisierten Netzteilen sind die Werte für Sinusdauerleistung und Spitzenleistung gleich groß.

Übertragungsbereich

Der Übertragungsbereich wird als grafischer Frequenzgang dargestellt. Die Erlaubten Abweichungen innerhalb des Übertragungsbereichs werden vom Hersteller definiert und betragen z.B. $\pm 1,5$ dB (Abb. 16.8).

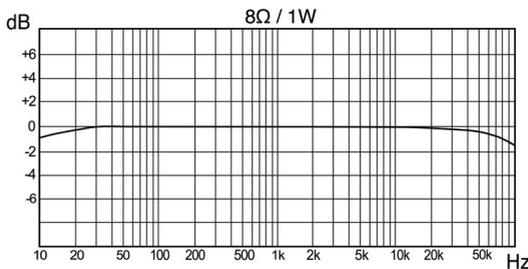


Abb. 16.8: Frequenzgang eines Verstärkers (Yamaha H5000)
Bildquelle: H5000, 2002, Seite 13

Klirrfaktor [% THD]

Der Klirrfaktor ist ein Maß für die maximal zulässigen nichtlinearen Verzerrungen. Bei Beschallungsanlagen, die für Ruf und Alarmierung verwendet werden, war laut der alten Norm DIN 45566 ein maximaler Klirrfaktor von 2 % zulässig (Testsignal: 1 kHz). Die aktuelle Norm IEC 286.3/19.4 schreibt einen erheblich geringeren Wert von 0,2 % vor (temperaturbegrenzte Ausgangsleistung über 4 Stunden, Testsignal: 1 kHz).⁶

⁶ vgl. ZVEI, 1999, Seite 6 und 7

Signal-Rausch-Abstand [dB]

Der Signal-Rausch-Abstand wird oft auch als (engl.:) Signal-to-Noise-Ratio, kurz SNR oder S/N angegeben. Das ist das Verhältnis der mittleren Leistung des Audiosignals zur mittleren Leistung des Verstärkergrundrauschens.

Rücklaufzeit [V / μ s]

Die Rücklaufzeit ist die Zeitspanne, in der ein Signal nach dem Abschalten auf einen definierten Wert abgesunken ist.

Dämpfungsfaktor D

Der Dämpfungsfaktor ist das Verhältnis von Nennimpedanz des Lautsprechers zur Ausgangsimpedanz des Verstärkers.

$$D = \frac{\text{Nennimpedanz Lautsprecher}}{\text{Ausgangsimpedanz Verstärker}} = \frac{Z_E}{Z_A} \quad (\text{Formel 16.5})$$

Die Ausgangsimpedanz von Endstufen liegt im Milliohm-Bereich, zum Beispiel 80 m Ω . Wird dieser Verstärker zusammen mit einem 8- Ω -Lautsprecher betrieben, so ergibt sich ein theoretischer Dämpfungsfaktor von:

$$D = \frac{8 \Omega}{0,08 \Omega} = 100$$

Professionelle Endstufen weisen mindestens diesen Wert auf, meist ist der Dämpfungsfaktor sogar erheblich höher. Zusätzlich auftretende Impedanzen von Kabel- und Steckverbindungen oder einer passiven Frequenzweiche verschlechtern allerdings den Dämpfungsfaktor. Bei einem zu niedrigen Dämpfungsfaktor wird ein Teil der Ausgangsleistung im Verstärker in Wärme umgesetzt und es treten lineare und nichtlineare Verzerrungen auf.

Anmerkung: Verstärker und Lautsprecher werden mit Spannungsanpassung⁷ betrieben, denn es gilt hier gilt: $Z_E \gg Z_A$

Eingangsempfindlichkeit [V / dB_u]

= Effektivwert der Spannung, die am Eingang anliegen muss, damit bei voll aufgedrehtem Lautstärkesteller die Nennleistung erreicht wird.

Leistungsaufnahme [W / VA]

Dieser Wert wird vor allem bei der Planung von einer Stromversorgung für eine Vielzahl von Leistungsverstärkern interessant.

⁷ s. Kap. 11. „Anpassung und Audioleitungen“ die Ausführungen zur Spannungsanpassung

Verstärkungsfaktor

In den technischen Datenblättern finden sich verschiedene Angaben für den Verstärkungsfaktor...⁸

A: Als *Eingangsempfindlichkeit* (engl.: *Sensitivity*)

Angabe der Eingangsspannung, die benötigt wird, um die volle Ausgangsleistung zu erhalten.

Beispiel: Angegeben wird eine „Sensitivity = 0,775 V for full rated output“. Die Berechnung der Ausgangsspannung bei einer Verstärkerleistung von 320 Watt an 8 Ω sieht dann so aus:

$$V_{\text{MaxOut}} = \sqrt{x \Omega * \text{Ausgangsleistung bei } x \Omega} \quad (\text{Formel 16.6})$$

$$V_{\text{MaxOut}} = \sqrt{8 \Omega * 320 \text{ W}}$$

$$V_{\text{MaxOut}} = 50,6 \text{ V}$$

B: Als *Verstärkungsgrad*

Verhältnis von Ausgangs- zu Eingangsspannung

Verstärkungsgrad des vorherigen Rechenbeispiels:

$$\frac{\text{Ausgangsspannung}}{\text{Eingangsspannung}} = \frac{50,6 \text{ V}}{0,775 \text{ V}} = 65,3$$

C: Als *Spannungspegel*

$$\text{Spannungspegel } p_U = 20 \lg \frac{\text{Ausgangsspannung}}{\text{Eingangsspannung}} \quad (\text{Formel 16.7})$$

Einheit [dB]

Für das Rechenbeispiel ergibt das einen Spannungspegel von:

$$p_U = 20 \lg \frac{50,6 \text{ V}}{0,775 \text{ V}} = 36,3 \text{ dB}_U$$

⁸ vgl. McCarthy, 2001, Seite 30

16.3.2. Clipping bei Endstufen

Durch die Betriebsspannung werden der maximalen Verstärkung der Endstufe feste Grenzen gesetzt. Eine Aussteuerung ohne Verzerrungen ist nur innerhalb dieser Grenzen möglich (im Abb. 16.9 die gestrichelte Sinuskurve). Wird der Eingangspegel aber weiter erhöht, so werden die Signalspitzen regelrecht abgeschnitten. Es treten dadurch unangenehme Verzerrungen auf, vor allem mit hohen Frequenzen, das sog. Clipping. Somit werden bei Lautsprechern vor allem die Hochtöner stark belastet und es kann zu einem Ausfall der Treiber durch mechanische oder thermische Überlastung kommen.

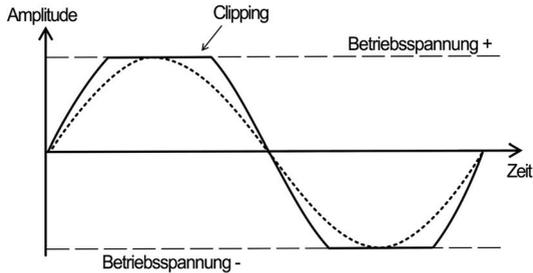


Abb. 16.9: Clipping einer Sinusschwingung⁹

⁹ vgl. Czichos und Hennecke, 2008, Seite G135

16.3.3. Stereo, Parallel Mono und Bridged Mono

- Stereo (bzw. Dual Mono): Die übliche Betriebsart einer Endstufe
- Parallel Mono: Der linke NF-Eingang wird parallel auf den rechten Kanal geschaltet
- Bridged Mono: Der linke Eingang wird parallel und verpolt (\emptyset) auf den rechten Kanal geschaltet. Die Ausgangsleistung an den heißen Klemmen addiert sich, die Masseklemmen müssen mit einer Brücke verbunden werden

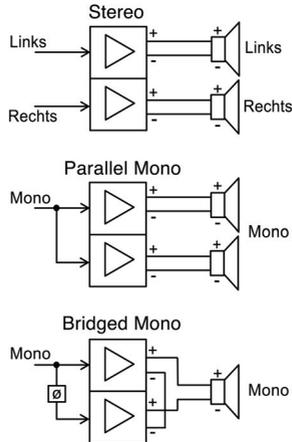


Abb. 16.10: Stereo, Parallel Mono und Bridged Mono

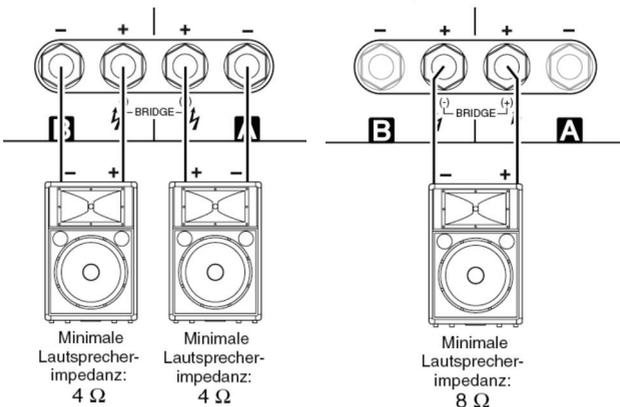


Abb. 16.11: Beispiel Stereo und Bridged Mono (Yamaha P7000S)

Bildquelle: P7000S, 2003, Seite 9

16.4. Übungsaufgaben

Aufgabe 1: (Frage bei der Abschlussprüfung Sommer 2001 der IHK Erfurt)

An eine Endstufe ist impedanzrichtig ein Lautsprecher mit 4Ω angeschlossen. Dabei wird die maximale Leistung von 1200W an den Lautsprecher abgegeben.

- Welche Anpassungsart liegt vor?
- Wie groß ist der Innenwiderstand R_i der Endstufe?

Aufgabe 2: (Frage bei der Abschlussprüfung Sommer 2001 der IHK Erfurt)

Auf den Eingang einer Verstärkerendstufe wird ein Sinussignal gegeben. Die Endstufe wird stark übersteuert. Skizziere das „geclippte“ Signal.

Aufgabe 3:

Welche Aufgaben hat ein Controller?

Aufgabe 4: (Frage bei der Abschlussprüfung Sommer 2001 der IHK Erfurt)

An der Frequenzweiche eines Dreiwegesystems finden sich folgende Symbole:



Ordne jedem Symbol den entsprechenden Filtertyp zu.

Aufgabe 5:

Die in diesem Kapitel beschriebenen Zusammenhänge von Frequenzweichen, Controllern und Leistungsverstärkern und auch des folgenden Kapitels über Lautsprecher beziehen sich auf die sog. niederohmige Technik. Daneben gibt es noch die hochohmige Technik der 100V -Anlagen. Recherchiere im Internet und/oder in Fachliteratur und erkläre in Stichworten die Unterschiede zwischen beiden Systemen.



Literaturtipp:

Dickreiter, Michael: Handbuch der Tonstudioteknik.
München: Saur Verlag.

17. Lautsprecher



Lautsprecher sind ein Thema im ersten Lehrjahr.

17.1. Wandlerprinzipien bei Lautsprechern

Lautsprecher wandeln elektrische in akustische Energie. Die drei wichtigsten elektroakustischen Wandlerprinzipien sind:

- Elektrodynamische Wandler
- Elektrostatische Wandler
- Piezoelektrische Wandler

17.1.1. Elektrodynamische Lautsprecher

Elektrodynamische Lautsprecher funktionieren nach dem Prinzip der Kraftwirkung eines stromdurchflossenen Leiters in einem Magnetfeld. Diese Kraft wird zur Anregung einer Membran genutzt. Es gibt verschiedene Bauarten, die diesem Prinzip folgen: Konus-, Kalotten- und Druckkammerlautsprecher und daneben Bändchen- und Folienmagnetostaten.

17.1.1.1. Konuslautsprecher in Tauchspulenbauweise

Beim Konuslautsprecher in Tauchspulenbauweise ist die Membran an einer Schwingspule befestigt, welche sich im Magnetfeld eines Permanentmagneten befindet. Fließt durch die Spule ein Wechselstrom, so bewegt sich die Membran analog dazu.

Eigenschaften des Konuslautsprechers:

- Konuslautsprecher werden für den Tief- und Mitteltonbereich eingesetzt und haben einheitliche Größen von 8“, 10“ und 12“ für Mitteltöner bzw. 15“ und 18“ für Tieftöner. Bei Hochtönern kommen andere Wandlerprinzipien eher in Frage
- Konuslautsprecher haben einen geringen Wirkungsgrad von ca. 1%, d.h. 99% der Verstärkerleistung werden nicht in Schall, sondern in Wärme umgewandelt¹
- Es treten unerwünschte Eigenresonanzen (Partialschwingungen) der Membran auf, die sich aber durch eine steifere Membran vermindern lassen

¹ vgl. Stark, 1999, Seite 55

- Konuslautsprecher haben ein schlechtes Impulsverhalten aufgrund der relativ großen Masse von Membran und Schwingspule (Abb. 17.1)

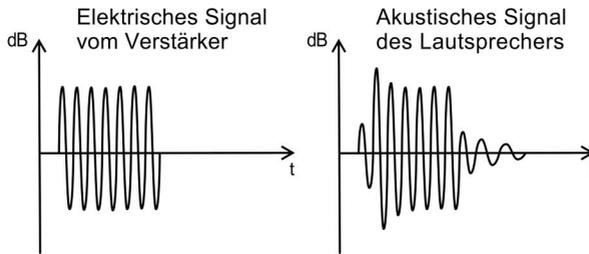


Abb. 17.1: Impulsverhalten eines Lautsprechers²

Schnittzeichnung eines Konuslautsprechers:

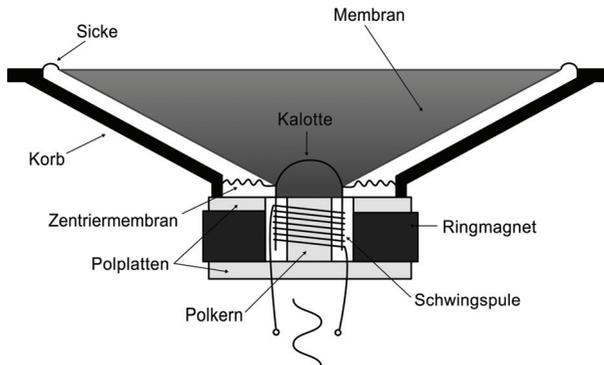


Abb. 17.2: Konuslautsprecher

Erläuterungen zur Abb. 17.2:³

- Membran: konisch geformt. Materialien: Pappe, Kunststoff, Textilgewebe oder Aluminium
- Kalotte: Staubschutz und mechanischer Zusammenhalt der Membran
- Zentriermembran: elastische Aufhängung der Kalotte und des Spulenträgers
- Sicke: elastische Randaufhängung der Membran
 - Harte Sicke: Bessere Übertragung von tiefen Frequenzen
 - Weiche Sicke: Höherer Wirkungsgrad des Wandlers
 - Materialien: z.B. Gummi, Schaumstoff oder Gewebe

² vgl. Stark, 1999, Seite 36

³ vgl. Stark, 1999, Seite 95

- Korb = Lautsprecherrahmen aus Metall oder Kunststoff
- Schwingspule: Kupferspule auf Träger aus Aluminium geklebt
- Ferrit-Magnet, als Ringmagnet ausgeführt

17.1.1.2. Kalottenlautsprecher in Tauchspulenbauweise

Ein Kalottenlautsprecher entspricht im Wesentlichen dem Konuslautsprecher, nur fehlt hier der Korb und die Konusmembran (Abb. 17.3). Der Schall wird also nur über die Kalotte abgestrahlt. Aufgrund der kleineren Masse ergibt sich ein besseres Impulsverhalten. Tiefe Frequenzen kann ein Kalottenlautsprecher allerdings nur schlecht übertragen und daher wird er als Hochtonlautsprecher eingesetzt. Baugrößen: z.B. 0,5“ bis 3“.

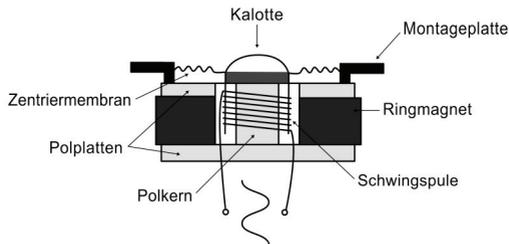


Abb. 17.3: Kalottenlautsprecher

17.1.1.3. Druckkammerlautsprecher in Tauchspulenbauweise

Hier komprimiert die Membran eines Kalottenlautsprechers die Luft in einen Druckraum. Die schmale Austrittsöffnung führt zur erhöhten Strömungsgeschwindigkeit der Luft (Geschwindigkeitstransformation). Ein akustisches Element vor der Öffnung dient zum Abschluss der Kammer und ist zur Phasenkorrektur notwendig (Abb. 17.4).⁴

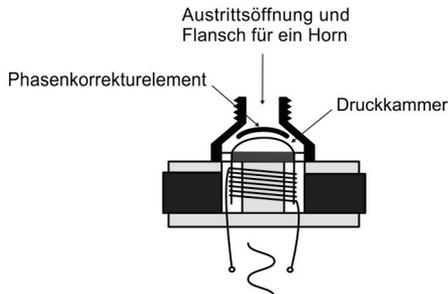


Abb. 17.4: Druckkammerlautsprecher

⁴ vgl. Stark, 1999, Seite 87

Eigenschaften des Druckkammerlautsprechers:⁵

- Erhöhung des Wirkungsgrades des Wandlers
- Starke Bündelung des Schalls
- Akustische Verstärkung durch einen Hornaufsatz notwendig
- Eingeschränkter Frequenzbereich von ca. 300 Hz bis 9 kHz, daher kommt nur der Einsatz als Mittel- oder Hochtöner in Frage

17.1.1.4. Bändchenmagnetostat

Hier ist die Membran ein stromdurchflossenes Aluminiumbändchen, das sich in einem starken Magnetfeld bewegt (Abb. 17.5).

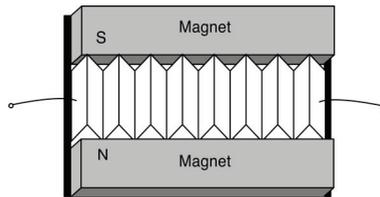


Abb. 17.5: Bändchenlautsprecher

Eigenschaften des Bändchenmagnetostaten:

- Das Bändchen hat eine minimale bewegte Masse und dadurch ergibt sich eine sehr gute Impulstreue
- Linearer Amplitudenfrequenzgang und niedriger Klirrfaktor
- Geringer Wirkungsgrad
- Niedrige Impedanz bis max. 1 Ω aufgrund der geringen Leiterlänge, daher ist ein Anpassungsübertrager notwendig
- Meist Einsatz als Hochtöner bei kleiner und kompakter Bauweise

17.1.1.5. Folienmagnetostat

Beim Folien-Magnetostat bewegt sich eine dünne Kunststoff-Folie mit aufgeklebten stromdurchflossenen Leiterbahnen in einem starken Magnetfeld (Abb. 17.6).

⁵ vgl. Albrecht et al., 1995, Seite 116 und 117

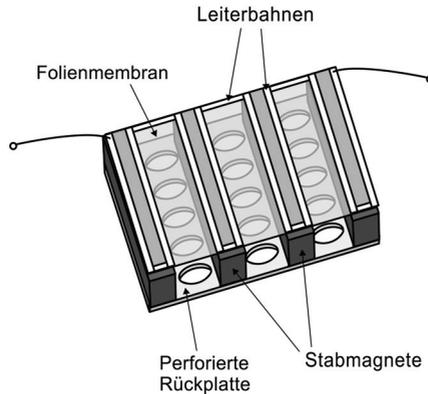


Abb. 17.6: Magnetostat

Eigenschaften des Folienmagnetostaten:

- Die Folie stellt eine kleine bewegte Masse dar und daher hat dieser Wandler eine gute Impulstreue
- Hoher Wirkungsgrad und geringer Klirrfaktor
- Linearer Impedanz- und Amplitudenfrequenzgang
- Im Vergleich zum Bändchen kein Übertrager notwendig, da aufgrund des längeren Leiters die Impedanz wie bei Tauchspulenlautsprechern zwischen 4 und 8 Ω liegt
- Frequenzbereich ab ca. 200 bis 300 Hz, d.h. Einsatz als Mittel- und Hochtöner
- Spezialanwendungen z.B. als Flächenlautsprecher zur Wandmontage

17.1.2. Elektrostatische Lautsprecher

Beim Elektrostaten befindet sich eine leitfähige Folienmembran in einem elektrostatischen Feld zwischen zwei perforierten Statoren, welche mit einer Polarisationsspannung vorgeladen sind. Ein Übertrager wandelt das Signal vom Leistungsverstärker in ein Hochvolt-Signal, das die Polarisationsspannung moduliert. Die Folienmembran wird entsprechend der modulierten Polarisationsspannung angezogen oder abgestoßen (Abb. 17.7).

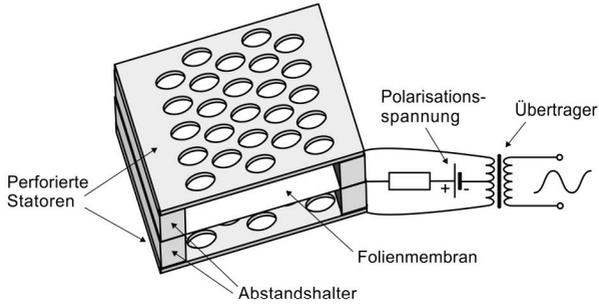


Abb. 17.7: Elektrostat

Eigenschaften des Elektrostaten:

- Die Membran hat eine geringe Masse und dadurch ein gutes Einschwingverhalten
- Sehr gute Linearität des Amplitudenfrequenzgangs, sehr geringer Klirrfaktor
- Schlechte Wiedergabe tiefer Frequenzen, nutzbarer Bereich ab ca. 200 bis 300 Hz aufwärts (=Mittel- und Hochtöner)
- Schmäler Abstrahlwinkel

17.1.3. Piezoelektrische Lautsprecher

Der Wandler des Piezo-Lautsprechers (Abb. 17.8) besteht aus einem kristallinen oder keramischen Material, das sich bei Anlegen einer elektrischen Spannung verformt.



Abb. 17.8: Piezo-Lautsprecher

Links: Komplettes Hochtornhorn

Rechts: Ausgebauter Piezowandler (ø 2 cm) mit aufgeklebter Membran

Eigenschaften des Piezo-Wandlers:

- Die Bewegungsamplitude des Piezos ist sehr klein, deshalb ist eine akustische Verstärkung durch einen Hornvorsatz notwendig⁶
- Hoher Klirrfaktor
- Schlechte Wiedergabe tiefer Frequenzen und daher nur Anwendung als Hochtöner sinnvoll
- Sonderanwendung: Ultraschall-Lautsprecher

17.2. Lautsprecherboxen

17.2.1. Frei schwebender Lautsprecher

Bei einem frei schwebenden Lautsprecher kommt es zum akustischen Kurzschluss. Der Schall, der zur Rückseite der Membran gelangt, kann in Phase oder gegen Phase sein. Daraus ergeben sich Auslöschungen oder Anhebungen im Frequenzgang. In den tiefen Frequenzen wird praktisch kein Schall mehr abgestrahlt (Abb. 17.9).

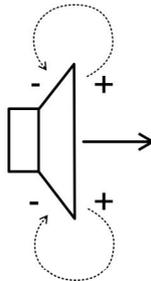


Abb. 17.9: Akustischer Kurzschluss

Bildquelle: Dickreiter, 1987, Seite 209

17.2.2. Unendliche Schallwand

Die unendliche Schallwand ist ein theoretisches ideales Modell. Ein Druckausgleich wird durch eine unendlich ausgedehnte Wand verhindert (Abb. 17.10).

⁶ vgl. Stark, 1999, Seite 14

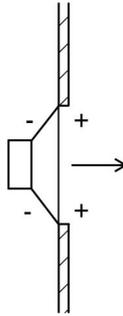


Abb. 17.10: Unendliche Schallwand
Bildquelle: Dickreiter, 1987, Seite 209

17.2.3. Geschlossenes Gehäuse

Bei geschlossenen Boxen wie in Abb. 17.11 steigen der Wirkungsgrad und die Belastbarkeit. Da das Gehäuse luftdicht abgeschlossen ist, resultiert allerdings eine Dämpfung der Membran:

- Kleines Volumen des Gehäuses = hohe Dämpfung
- Großes Volumen des Gehäuses = kleine Dämpfung

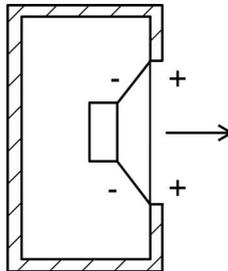


Abb. 17.11: Geschlossene Box

17.2.4. Bassreflex-Box

Eine Bassreflex-Box funktioniert nach dem Prinzip des Helmholtzresonators: Durch die Bassreflexöffnung wird eine gleichphasige Überlagerung tiefer Frequenzen und damit eine Erweiterung des Frequenzbereichs nach unten angestrebt (Abb. 17.12).

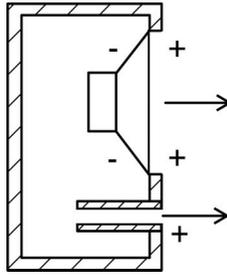


Abb. 17.12: Bassreflexbox

17.2.5. Bandpass-Gehäuse

Ein Bandpass-Gehäuse ist eine Kombination von geschlossener Box und Bassreflex-Gehäuse (Abb. 17.13). Diese Konstruktion hat einen eingeschränkten Übertragungsbereich von ca. einer Oktave, daher ist nur eine Verwendung als reiner Subwoofer sinnvoll.⁷

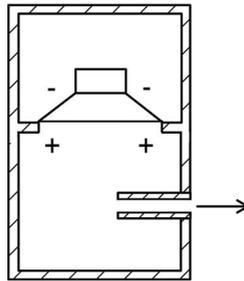


Abb. 17.13: Bandpass-Gehäuse

17.2.6. Transmissions-Gehäuse

Beim Transmissions-Gehäuse gibt es eine Umwegleitung des Schalls von der Membranrückseite zur Gehäusevorderseite (Abb. 17.14). Abhängig von der Laufzeit des Schalls gibt es gleichphasige Überlagerungen bei einer Wellenlänge von $\lambda/2$ und allen ungeraden Vielfachen davon ($3/2\lambda$, $5/2\lambda$, $7/2\lambda$ etc.). Gegenphasige Überlagerung und damit Auslöschungen treten auf bei λ , 2λ , 3λ etc. Die Folge ist ein sehr unausgeglichener Frequenzgang.⁸ Trotzdem werden Transmissionsgehäuse z.B. als Subwoofer gebaut.

⁷ vgl. Stark, 1999, Seite 125

⁸ vgl. Stark, 1999, Seite 128

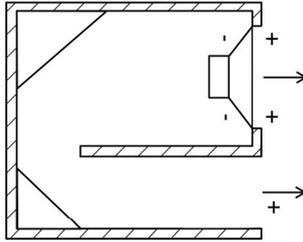


Abb. 17.14: Transmissions-Gehäuse

17.2.7. Exponential-Hörner

Hörner wirken ähnlich wie der Schalltrichter eines alten Grammophons: Sie erhöhen akustisch die Lautstärke. Die Krümmung des Horns folgt einer Exponentialfunktion, daher dessen Bezeichnung (Abb. 17.15).

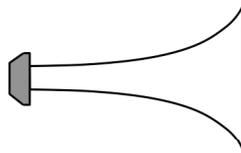


Abb. 17.15: Exponentialhorn

Eine Exponentialfunktion ist ein Logarithmus mit der Basis e :

$$x = e^y \quad (\text{Formel 17.1})$$

e : Eulersche Konstante ($e \approx 2,71828\dots$)

Im Beschallungsbereich unterscheidet man Horn-Konstruktionen zur Tief- und Mitteltonwiedergabe und Hochtonhörner. Hörner für die Tief- und Mitteltonwiedergabe werden als Front Loaded Bins, Folded Horn Bins und Rear Loaded Bins angeboten. Den drei Prinzipien ist gemeinsam, dass die Größe der Austrittsöffnung und Länge des Horns die untere Grenzfrequenz und den Grad der Schalldruckerhöhung festlegen. Zusammenhang von Tonhöhe und Horngröße: Je größer das Horn, desto tiefere Frequenzen können wiedergegeben werden.

17.2.7.1. Front Loaded Bins

Vor einem Konuslautsprecher sitzt ein exponential geformter Trichter wie in Abb. 17.16. Die Länge des Horns errechnet sich aus einem Viertel der Wellenlänge der tiefsten gewünschten Frequenz. Beispiel: Der Ton e der tiefen E-Seite des Basses hat eine Grundfrequenz von 42 Hz. Die Wellenlänge beträgt demnach 8,19 m. Ein Viertel davon sind ca. 2,05 m, diese Länge müsste das Horn mindestens haben, wenn dieser Ton mit vollem Pegel übertragen werden soll.

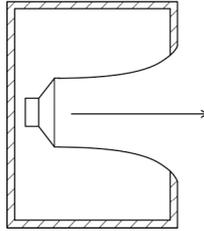


Abb. 17.16: Front Loaded Bin
Bildquelle: Pieper, 1996, Seite 156

17.2.7.2. Folded Horn Bins

Gefaltete Hörner können etwas kompakter konstruiert werden im Vergleich zu Front Loaded Bins. Sie haben im tiefen Frequenzbereich einen hohen Wirkungsgrad, allerdings werden höhere Frequenzen nicht so gut wiedergegeben (Abb. 17.17).

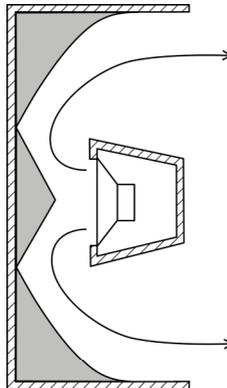


Abb. 17.17: Folded Horn Bin
Bildquelle: Pieper, 1996, Seite 156

17.2.7.3. Rear Loaded Bins

Diese Boxen strahlen zum einen direkt nach vorne ab; Tiefe Frequenzen werden aber auch über ein gefaltetes Horn hinter dem Lautsprecher zur Vorderseite umgeleitet und durch konstruktive Interferenzen verstärkt (Abb. 17.18).

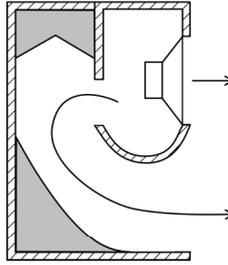


Abb. 17.18: Rear Loaded Bin
Bildquelle: Pieper, 1996, Seite 156

17.2.7.4. Hochtöner

Hörner zur Hochtönerwiedergabe haben meist einen Druckkammerlautsprecher als Treiber. Hochtöner strahlen den Schall stark gerichtet ab und es werden verschiedene Abstrahlcharakteristiken unterschieden:

- Biradial: der horizontale und vertikale Abstrahlwinkel sind hier gleich, z.B. $90^\circ \times 90^\circ$
- Shortthrow: z.B. 90° horizontal x 60° vertikal
- Longthrow: z.B. 60° horizontal x 40° vertikal

Einige Hersteller unterscheiden ihre Lautsprecher auch zwischen Narrow Coverage (z.B. Meyer Sound UPA-1P mit $100^\circ \times 40^\circ$) und Wide Coverage (z.B. Meyer Sound UPA-2P mit $45^\circ \times 45^\circ$). Manchmal kann das Hochtönerhorn im Gehäuse gedreht werden, dann ist der Lautsprecher sowohl senkrecht wie auch waagrecht mit der gewünschten Abstrahlcharakteristik einsetzbar.

Zu hohen Frequenzen tritt eine zunehmende Fokussierung der Abstrahlcharakteristik ein. Mögliche Maßnahmen dagegen:

- Kombination von verschiedenen Hornformen, um den Bündelungseffekt entgegenzuwirken z.B. das Constant-Directivity-Horn von E-Voice
- Akustik-Linsen vor dem Horn: Verlängerung des Laufweges der Schallwellen durch Umlenkung an speziell geformten Lamellen

17.2.8. Kriterien zur Beurteilung von Lautsprecherboxen

In Tabelle 17.1 ist ein Auszug aus dem Datenblatt des Lautsprechers Typ JF80z von Eastern Acoustic Works zu sehen. Anhand dieser technischen Daten werden im Folgenden die wichtigsten Kriterien zur Beurteilung von Lautsprechern erklärt.

Tabelle 17.1: Technische Daten eines Lautsprechers (EAW JF80z)⁹

Operating Range	85 Hz to 20 kHz
Axial Sensitivity (dB SPL, 1 Watt @ 1 m)	90 dB
Nominal Input Impedance	8 Ω
Power Handling, AES Standard	450 Watts @ 8 Ω
Calculated Maximum Output (dB SPL @ 1 m)	Average 114 dB Peak 123 dB
Nominal Beamwidth	Horizontal 100° Vertical 100°
Recommended High-Pass Filter	70 Hz, 12 dB/Octave Butterworth

Lineare Verzerrungen (Frequenzgang)

Lineare Verzerrungen sind Abweichungen vom idealen Frequenzgang. Der Frequenzgang eines Lautsprechersystems kann zum Beispiel Abweichungen von ± 3 dB innerhalb des relevanten Frequenzbereiches aufweisen (Abb. 17.19).

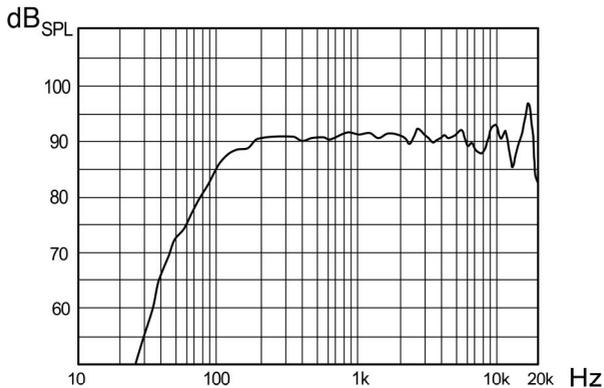


Abb. 17.19: Frequenzgang eines Lautsprechers (EAW JF80z)

Bildquelle: JF80z, 2005, Seite 3

Nichtlineare Verzerrungen [%]

Nichtlineare Verzerrungen werden als Klirrfaktor für die Frequenz von 1 kHz angegeben. Der Klirrfaktor findet sich meist in Datenblättern von aktiven Lautsprechern, allerdings auch nur dann, wenn der Wert besonders niedrig und daher positiv erwähnenswert ist. Beispiel: Für den aktiven Lautsprecher UPA-1P von Meyer Sound wird ein Klirrfaktor von 0.02% angegeben.

⁹ vgl. JF80z, 2005, Seite 1

Kenschalldruckpegel [$\text{dB}_{\text{SPL}} / 1 \text{ W} / 1 \text{ m}$]

Der Kenschalldruckpegel eines Lautsprechers wird bei einer Leistung von 1 W im Abstand von 1 m gemessen. Lautsprecher verschiedener Hersteller lassen sich somit zumindest über dieses genormte Kriterium vergleichen. Außerdem lässt sich bei einem bekannten Kenschalldruckpegel für beliebige Leistungen der real auftretende Schalldruckpegel berechnen.

Wird die Leistung von 1 W auf 2 W verdoppelt, so ergibt sich eine Schalldruckpegelzunahme von:

$$10 \lg \frac{2 \text{ W}}{1 \text{ W}} = 3 \text{ dB}_{\text{SPL}} \quad (\text{Formel 17.2})$$

Folglich nimmt also der Schalldruckpegel in 1 m Entfernung bei einer Leistungsverdoppelung um +3 dB_{SPL} zu.

Anwendungsbeispiel:

Ein Lautsprecher mit einem Kenschalldruckpegel von 94 $\text{dB}_{\text{SPL}} / 1 \text{ W} / 1 \text{ m}$ wird an einem Verstärker mit 64 W betrieben. Wie groß ist der maximale Schalldruckpegel, den der Lautsprecher in Kombination mit diesem Verstärker abgeben kann?

Erste Lösungsmöglichkeit: Tabellarisch (Tabelle 17.2): Der Schalldruckpegel lässt sich hier direkt ablesen: 112 dB_{SPL} .

Tabelle 17.2: Zusammenhang von Leistung und Schalldruckpegel

Leistung [W]	Schalldruckpegel bei 1m [dB_{SPL}]
1	94
2	97
4	100
8	103
16	106
32	109
64	112
128	115
256	118
512	121
...	...
P *2	$L_p + 3$

Zweite Lösungsmöglichkeit: Berechnung.

- Erster Berechnungsschritt: Zunahme des Schalldruckpegels

$$10 \lg \frac{64 \text{ W}}{1 \text{ W}} = 18,06 \text{ dB}$$

- Zweiter Berechnungsschritt: Ausrechnen des Gesamtschalldruckpegels

$$94 \text{ dB}_{\text{SPL}} + 18 \text{ dB} = 112 \text{ dB}_{\text{SPL}}$$

Nennimpedanz [Ω]

Durch die Eigenschwingung der Membran und die eingeschlossene Luft im Lautsprechergehäuse entsteht eine Gegenspannung, d.h. die Impedanz hat ein Maximum bei der Resonanzfrequenz des Lautsprechers (Abb. 17.20).

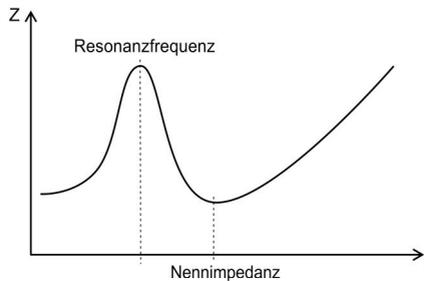


Abb. 17.20: Impedanzverlauf (induktives Verhalten)

- Induktives Verhalten (Elektrodynamische Wandler): Der Wert im Minimum des Kurvenverlaufs rechts von der Resonanzfrequenz wird als Nennimpedanz herangezogen. Nach diesem Minimum steigt die Impedanz zu hohen Frequenz hin
- Elektrostatishes Verhalten (Elektrostat): Entgegen gesetzte Impedanzkurve, d.h. steigende Impedanz zu tiefen Frequenz hin

Impedanz bei Reihenschaltung bzw. parallelem Anschluss von Lautsprechern:

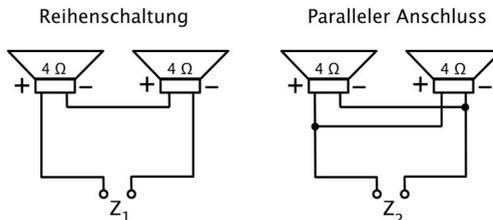


Abb. 17.21: Reihenschaltung und paralleler Anschluss

- Reihenschaltung:

$$Z_1 = Z + Z \quad (\text{Formel 17.3})$$

$$Z_1 = 4 \Omega + 4 \Omega = 8 \Omega$$

- Parallele Schaltung:

$$\frac{1}{Z_2} = \frac{1}{Z} + \frac{1}{Z} \quad (\text{Formel 17.4})$$

$$\frac{1}{Z_2} = \frac{1}{4 \Omega} + \frac{1}{4 \Omega} = \frac{1}{2 \Omega}$$

$$\rightarrow Z_2 = 2 \Omega$$

Belastbarkeit [W]

Dies ist die elektrische Leistung, mit der ein Lautsprecher über längere Zeit ohne Schaden betrieben werden kann. Grenzen der Belastbarkeit:

- Zu hohe Spitzenwerte der Signalspannung: Die mechanische Grenzen eines Lautsprechers werden erreicht. Bei zu großen Auslenkungen der Membran schlägt die Schwingspule an der Polplatte an oder springt aus dem Spalt bzw. die Membran zerreißt.
- Zu großer Effektivwert der Signalspannung: Die thermische Grenzen werden erreicht. Die Schwingspule heizt sich stark auf. Entweder löst sich dadurch der Kleber der Schwingspule oder die Isolation des Spulendrahtes schmilzt und es entsteht ein Kurzschluss.

Bei Messungen nach dem Standard der Audio Engineering Society (AES2-1884 Standard) wird als Testsignal rosa Rauschen verwendet, mit einem Crest-Faktor von 6 dB und einer Bandbreite von einer Dekade.¹⁰ Ein Tieftonlautsprecher würde zum Beispiel mit einem bandbegrenzten rosa Rauschen von 30 bis 300 Hz beurteilt, für einen Hochtöner könnte das Testsignal auf 180 Hz bis 18 kHz begrenzt werden. Der Test dauert zwei Stunden und nach dieser Zeit darf der Lautsprecher keinen Schaden aufweisen.¹¹

¹⁰ Dekade = Verzehnfachung der Frequenz z.B. ein Bereich von 100 Hz bis 1000 Hz

¹¹ vgl. Holtmeyer, 2004, Seite 3 und 4

Abstrahlcharakteristik

Angabe als Bündelungsgrad γ_Q

Der Bündelungsgrad γ_Q ist das Verhältnis der Abstrahlfläche einer idealen Kugelschallquelle zu der Strahlungsoberfläche eines gerichteten Lautsprechers:¹²

$$\gamma_Q = \frac{4\pi r^2}{A} \quad (\text{Formel 17.5})$$

$(4\pi r^2)$: Kugeloberfläche

A : Strahlungsoberfläche einer gerichteten Schallquelle

Tabelle 17.3: Lautsprecher-Bündelungsgrade γ_Q ¹³

Lautsprechercharakteristik	γ_Q
Kugelschallquelle	1
Einseitiger Strahler (Halbkugel)	2
Niere als ideale Richtcharakteristik	3
Gruppenstrahler (Arrays)	> 4

Angabe als Bündelungsmaß C

$$C = 10 \lg * \gamma_Q \quad (\text{Formel 17.6})$$

Einheit [dB]

Beispiel Bündelungsmaß einer Kugelschallquelle:

$$C_{\text{Kugel}} = 10 \lg * 1 = 0 \text{ dB}$$

Beispiel Bündelungsmaß eines Arrays:

$$C_{\text{Array}} = 10 \lg * 4 = 6 \text{ dB}$$

Das Bündelungsmaß wird auch (engl.): Directivity Index genannt.¹⁴

¹² vgl. Wirsum, 1991, Seite 150

¹³ vgl. Wirsum, 1991, Seite 150 und Ahnert und Reichardt, 1981, Seite 114

¹⁴ vgl. Ahnert und Reichardt, 1981, Seite 108

Grafische Darstellung als Polardiagramm

Beispiel: Abstrahlcharakteristik des Lautsprechers JF80z von EAW (Abb. 17.22).

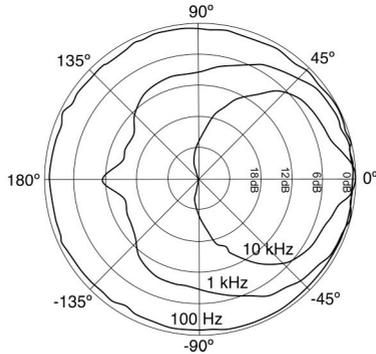


Abb. 17.22: Frequenzabhängigkeit der Abstrahlcharakteristik
Bildquelle: JF80z, 2005, Seite 4

Darstellung des Abstrahlverhaltens mit Isobarendiagrammen

In diesen Grafiken wird der Abstrahlwinkel über die Frequenz mit Hilfe von Schalldruck-Isobaren dargestellt.

Beispiel Lautsprecher E3 von d&b audiotechnik: Schalldruck-Isobaren für -6 dB und -12 dB bei normal montierten Hochtöner, d.h. für die Standardkonfiguration 90° horizontal (Abb. 17.23).

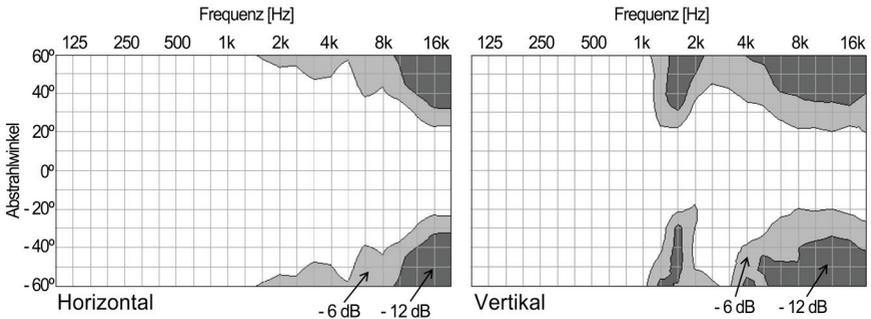


Abb. 17.23: Isobarendiagramme
Bildquelle: d&b audiotechnik (E3, 2003, Seite 6)

17.3. Anordnung und Kombination von Lautsprecherboxen

17.3.1. Aufstellung im Raum

Je nachdem, wo in einem Raum ein Lautsprecher installiert ist, hat dies Auswirkungen auf dessen abgestrahlte Schallintensität. Für die Berechnung der Schallintensität eines Lautsprechersignals kann folgende Formel angewandt werden:

$$\text{Schallintensität } I \text{ [W/m}^2\text{]} = \frac{\text{Schallleistung } P \text{ [W]}}{\text{Abstrahlfläche } A \text{ [m}^2\text{]}} \quad (\text{Formel 17.7})$$

Zur Vereinfachung des Sachverhaltes wird angenommen, dass der Lautsprecher als ideale Kugelschallquelle funktioniert. In der Praxis ist dies aber nur für tiefe Frequenzen zutreffend.

17.3.1.1. Lautsprecherbox geflogen oder auf Hochständer

Die Schallintensität verteilt sich gleichmäßig über die ganze Kugeloberfläche (Abb. 17.24):

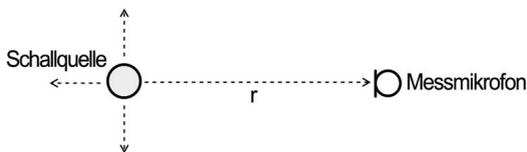


Abb. 17.24: Frei schwebende Schallquelle¹⁵

Berechnung der Schallintensität für diesen Fall:

$$I_1 = \frac{P}{4\pi r^2} \quad (\text{Formel 17.8})$$

17.3.1.2. Box auf dem Boden

Die Schallintensität verteilt sich jetzt nur noch auf die halbe Kugeloberfläche (Abb. 17.25):

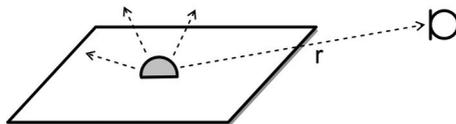


Abb. 17.25: Schallquelle auf einer Fläche¹⁶

¹⁵ vgl. JBL, 1999, Seite 3-1

¹⁶ vgl. JBL, 1999, Seite 3-1

$$I_2 = \frac{P}{\frac{1}{2} * 4\pi r^2} \quad (\text{Formel 17.9})$$

oder

$$I_2 = \frac{P}{2\pi r^2} \quad (\text{Formel 17.10})$$

Vergleich zum geflogenen Lautsprecher:

$$I_2 = 2 * I_1 \quad (\text{Formel 17.11})$$

→ Die Box ist um 3 dB_{SPL} lauter.

17.3.1.3. Box auf dem Boden und an einer Wand

Die Schallintensität verteilt sich hier auf ein Viertel der Kugeloberfläche (Abb. 17.26):

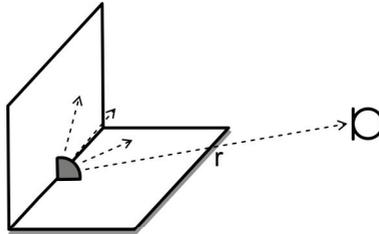


Abb. 17.26: Schallquelle auf dem Boden und an der Wand¹⁷

$$I_3 = \frac{P}{\frac{1}{4} * 4\pi r^2} \quad (\text{Formel 17.12})$$

oder

$$I_3 = \frac{P}{\pi r^2} \quad (\text{Formel 17.13})$$

Vergleich zum geflogenen Lautsprecher:

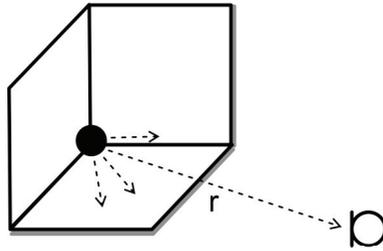
$$I_3 = 4 * I_1 \quad (\text{Formel 17.14})$$

→ Die Box ist um 6 dB_{SPL} lauter.

17.3.1.4. Box in einer Raumecke

Die Schallintensität verteilt sich auf ein Achtel der Kugeloberfläche (Abb. 17.27):

¹⁷ vgl. JBL, 1999, Seite 3-1

Abb. 17.27: Schallquelle in einer Ecke¹⁸

$$I_4 = \frac{P}{\frac{1}{8} * 4\pi r^2} \quad (\text{Formel 17.15})$$

oder

$$I_4 = \frac{2P}{\pi r^2} \quad (\text{Formel 17.16})$$

Vergleich zum geflogenen Lautsprecher:

$$I_4 = 8 * I_1 \quad (\text{Formel 17.17})$$

→ Die Box in der Ecke ist um 9 dB_{SPL} lauter.

17.3.2. Lautsprecherboxen nebeneinander oder aufeinander

Lautsprecher nebeneinander

Lautsprecher parallel nebeneinander aufzustellen ist ungünstig, da sich dann einige Zuhörer genau im Bereich zwischen den sich überlagernden Abstrahlcharakteristiken befinden. Für ein ausgeglichenes Klangbild kann in diesem Bereich aber nicht garantiert werden, dass es hier zu Überhöhungen oder Einbrüchen im Frequenzspektrum kommt. Lösung: Boxen mit einem (engl.) Splay Angle zueinander verwinkeln. Einige Hersteller versehen die Gehäuse ihrer Lautsprecher dafür mit schrägen Seiten. Oft ist damit sogar ein korrekter Splay Angle quasi schon „voreingestellt“ (Abb. 17.28).

¹⁸ vgl. JBL, 1999, Seite 3-1



Abb. 17.28: Lautsprecher mit Splay-Winkel

Lautsprecher aufeinander gestapelt (engl.: Stacking)

Generell tritt hier das gleiche Problem auf wie bei nebeneinander angeordneten Lautsprechern: Die Abstrahlflächen überlagern sich unvorteilhaft.

Man kann zwei Boxen allerdings so stapeln, dass die Hochtöner direkt übereinander liegen, d.h. die obere Box steht auf dem Kopf. Wenn die Hochtontreiber dadurch nahe genug zusammen kommen, kann durch eine akustische Kopplung sogar ein bis zu +6 dB_{SPL} größerer Pegel für hohe Frequenzen erreicht werden.

17.3.3. Linienstrahler (Line Arrays)

Line Arrays beruhen auf dem Prinzip der akustischen Kopplung einzelner, nahe zusammen angeordneten Lautsprechern. Das gesamte Array strahlt wie eine große Schallquelle. Line Arrays haben eine untere und obere Grenzfrequenz, und nur innerhalb dieser Grenzen funktioniert die akustische Kopplung.

Untere Grenzfrequenz f_{gu}

Der Abstand zwischen den einzelnen Wandlern der Mitteltöner bestimmt die untere Grenzfrequenz des Arrays:

$$f_{gu} = \frac{c}{2d} \quad (\text{Formel 17.18})$$

c : Schallgeschwindigkeit

d : Abstand der Wandler vom Zentrum zu Zentrum

Beispiel: Untere Grenzfrequenz bei 12“-Lautsprecher (305 mm Durchmesser):

$$f_{gu} = \frac{344 \text{ m/s}}{2 * 0,305 \text{ m}} = 564 \text{ Hz}$$

In der Praxis haben sich 8“-Lautsprecher bewährt mit einer theoretischen unteren Grenzfrequenz von ca. 850 Hz. Da dies meist nicht tief genug herunterreicht, müssen zusätzliche Subwoofer installiert werden.

Akustische Koppelung der Hochtöner

Auch hier bestimmt der Abstand der Wandler die Grenzfrequenz der akustischen Koppelung. Um den maximal möglichen Abstand der Hochtontreiber zu berechnen, wird die Formel umgestellt zu:

$$d = \frac{\lambda}{2} \quad (\text{Formel 17.19})$$

Der maximale Abstand der Hochtontreiber entspricht damit der halben Wellenlänge der höchsten Frequenz (Abb. 17.29).

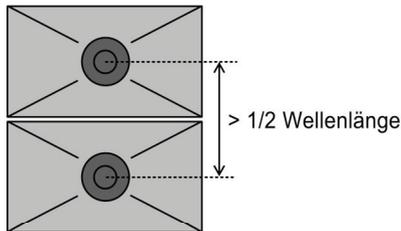


Abb. 17.29: Koppelung der Hochtöner

Beispiel: Damit 10 kHz noch akustisch gekoppelt werden, dürfen die Treiber nicht weiter als 1,7 cm auseinander liegen (Das ist die Hälfte der Wellenlänge von 3,4 cm). Konstruktionsbedingt ist dies aber selbst mit den schon sehr kleinen 0,5“-Treibern kaum möglich. Abhilfe: Spezielle Hochtönerhörner mit besonderer Schallführung durch einen sog. Waveformer, welcher den Schall sphärisch abstrahlen lässt (Abb. 17.30).

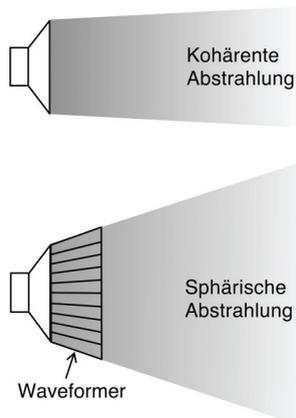


Abb. 17.30: Kohärente und sphärische Abstrahlung

Vergleich von Punktschallquelle und Line Array

Punktschallquelle: Die Schallwellen breiten sich kugelförmig aus.

Berechnung der Kugeloberfläche:

$$A = \pi * (2 * r)^2 \quad (\text{Formel 17.20})$$

r : Radius der Kugel

Bei Entfernungsverdoppelung wird die Schalleistung auf eine viermal so große Fläche verteilt, der Schalldruckpegel nimmt um 6 dB_{SPL} ab (Abb. 17.31).

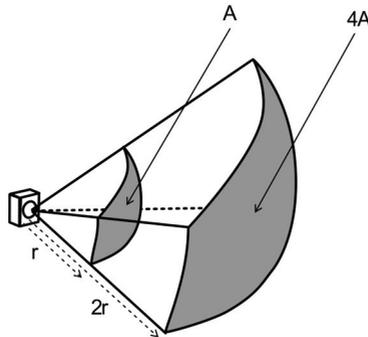


Abb. 17.31: Punkstrahler

Linienstrahler: Die Schallwellen breiten sich in Form eines Zylinders aus.

Berechnung der Zylinderoberfläche:

$$A = \frac{1}{2} \pi * (2 * r)^2 \quad (\text{Formel 17.21})$$

r : Radius des Zylinders

Bei Entfernungsverdoppelung wird die Schalleistung auf eine zweimal so große Fläche verteilt, der Schalldruckpegel nimmt um 3 dB_{SPL} ab (Abb. 17.32).

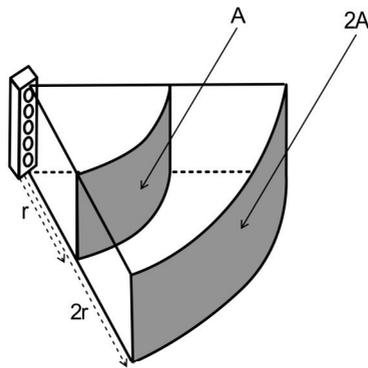


Abb. 17.32: Linienstrahler

Curving

Als (engl.:) Curving wird die Anpassung des Line Arrays an die zu beschallende Fläche durch verschiedene Winkel zwischen den einzelnen Lautsprechern bezeichnet. Dadurch wird nur das vertikale Abstrahlverhalten verändert, der horizontale Abstrahlwinkel bleibt unbeeinflusst.

Die oberen Lautsprecher des Arrays sind meist ohne oder mit kleiner Winklung montiert, dadurch wird die Schallenergie über eine relative weite Distanz gebündelt abgestrahlt. Die unteren Lautsprecher sind dagegen stärker angeschrägt. Die Bündelung ist weniger ausgeprägt, dafür können mit dem Array auch die Zuhörer in den ersten Reihen beschallt werden.

Anwendungsbeispiele

Abb. 17.33 zeigt ein Line Array mit Lautsprechern von Meyer Sound. Links hängt ein Array mit Lautsprechern vom Typ MILO. Der unterste Lautsprecher des Arrays ist ein MILO 120, welcher einen etwas größeren horizontalen Abstrahlwinkel aufweist im Vergleich zur den anderen Lautsprechern.

Rechts neben dem MILO-Array hängen die Subwoofer vom Typ 700HP. Zwei der insgesamt sechs Subwoofer zeigen nach hinten und werden über die Controller so angesteuert, dass die rückwärtig abgestrahlte Schallenergie durch Phasenüberlagerung eliminiert wird.

Zwei der so installierten Arrays wurden als L/R-Hauptsysteme bei der Tourproduktion „Best Of Musical 2007“ eingesetzt.



Abb. 17.33: Line Array von Meyer Sound

Bei dem in Abb. 17.34 gezeigten Line Array von d&b audiotechnik sind drei Subwoofer vom Typ Q-Sub über einem Q1-Array installiert. Unten hängt noch ein einzelner Q7-Lautsprecher. Im Bild nicht zu sehen sind die zusätzlichen Subwoofer vom Typ B2, die auf dem Boden stehen. Zwei Arrays dieser Art wurden als L/R-Hauptbeschallung bei der europäischen Tourproduktion von „Blue Man Group“ verwendet.

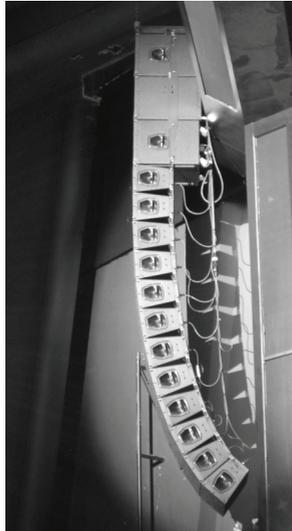


Abb. 17.34: Line-Array von d&b audiotechnik

17.4. Übungsaufgaben

Aufgabe 1:

Zwei Lautsprecher mit je 8Ω Impedanz werden parallel bzw. in Reihenschaltung betrieben.

Wie groß ist die Gesamtimpedanz Z_1 bei der Reihenschaltung?

Wie groß ist die Gesamtimpedanz Z_2 bei der parallelen Schaltung?

Aufgabe 2:

Herkömmliche Lautsprecher und Line Arrays unterscheiden sich u.a. in der Abnahme des Schalldruckpegels bezogen auf die Entfernung. Erkläre diesen Sachverhalt.

Aufgabe 3:

Wie ist der mathematische Zusammenhang von zugeführter Leistung und abgestrahltem Schalldruckpegel?

Aufgabe 4:

Welche Wandlerprinzipien werden verwendet für...

... Tieftöner?

... Mitteltöner?

... Hochtöner?

Aufgabe 5: (Frage bei der Abschlussprüfung Winter 2000 der IHK Berlin)

Für eine Konferenzveranstaltung sollen Lautsprecher zur Beschallung geflogen werden. Diese haben einen Kennschalldruckpegel von $94\text{dB}/1\text{W}/1\text{m}$ und werden mit 64W von den Leistungsverstärkern angefahren, da keine große Lautstärke, sondern eine homogene Schallverteilung gefordert ist. Die Lautsprecher strahlen mit $90^\circ \times 60^\circ$ ab. Es stellt sich die Frage, ob es akustisch sinnvoller ist, diese in 2m oder gar 5m über den Köpfen der Zuhörer aufzuhängen.

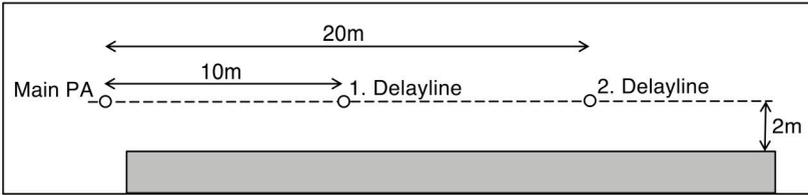
Zeige die Unterschiede beider Varianten durch Berechnung der Schallpegelverteilung in Ohrhöhe und zeichne die Ergebnisse in die zugehörigen Skizzen ein.



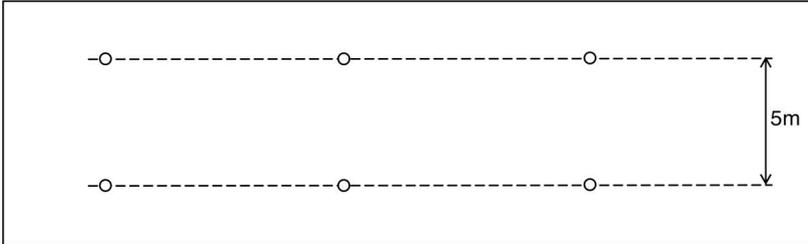
Literaturtipp:

Stark, Berndt: Lautsprecher Handbuch.
München: Richard Pflaum Verlag.

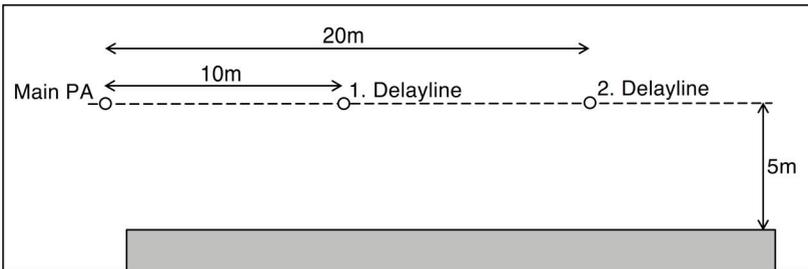
Seitenansicht Variante in 2m Höhe



Draufsicht Variante in 2m Höhe



Seitenansicht Variante in 5m Höhe



Draufsicht Variante in 5m Höhe

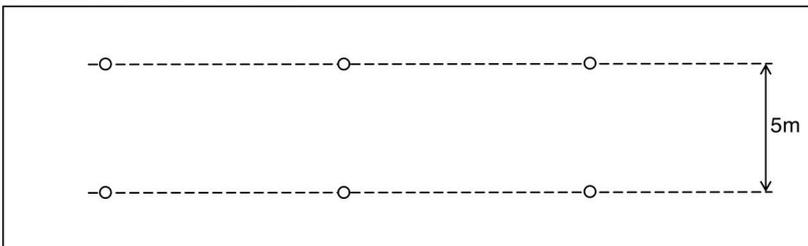


Abb. 17.36: Skizzen zur Aufgabe

18. Drahtlose Tonübertragung



Das Thema „Drahtlose Mikrofone“ sieht der Lehrplan für das zweite Lehrjahr vor.

18.1. Mikroport-Technik

Der Begriff „Mikroport“ ist eine Produktbezeichnung von Sennheiser, die inzwischen aber schon als Synonym für die drahtlose HF-Tonübertragung gilt. Natürlich gibt es auch andere Anbieter professioneller Drahtlostechnik, z.B. AKG, Shure, Beyerdynamic und weitere.

Die Anwender von Mikroport-Anlagen sind zum Beispiel:

- Rundfunk- und Fernsehanstalten
- Theater
- Mehrzweckhallen
- Universitäten (in Hörsälen)
- Firmen (bei Präsentationen oder Pressekonferenzen)
- Musiker bei Konzerten auf der Bühne

18.1.1. Sendefrequenzen

Funksignale

Ein Wechselspiel von elektrischen und magnetischen Feldern auf einem beidseitig offenen Leiter (Antenne) erzeugt eine elektromagnetische Welle, die sich durch den Raum bewegt. Die Wellenlänge von elektromagnetischen Wellen berechnet sich nach der bekannten Formel...

$$\lambda = \frac{c}{f} \quad (\text{Formel 18.1})$$

Einheit [m]

Wobei das „c“ hier für die Lichtgeschwindigkeit steht, mit der sich die elektromagnetischen Wellen in Luft und im Vakuum ausbreiten (Vakuum-Lichtgeschwindigkeit $c_0 = 299\,792\,458$ m/s).

Aufgrund verschiedener Wellenlängen werden Funksignale in unterschiedliche Bereiche aufgeteilt:¹

- Low Frequency (LF): bis ca. 300 kHz, Wellenlänge im Kilometerbereich, Anwendung: Langwellenradio
- Mid Frequency (MF): ca. 300 kHz bis 3 MHz, Wellenlänge zwischen 1 km und 100 m, Mittelwellenradio
- High Frequency (HF): ca. 3 bis 30 MHz, Wellenlänge 100 bis 10 m, Kurzwellenradio
- Very High Frequency (VHF): ca. 30 bis 300 MHz, Wellenlänge 10 bis 1 m, Richtfunk, UKW-Radio, terrestrisches analoges Fernsehen, drahtlose Mikrofone
- Ultra High Frequency (UHF): ca. 300 bis 3000 MHz, Wellenlänge 1 m bis 10 cm, Radioastronomie, Mobiltelefone, terrestrisches digitales Fernsehen, drahtlose Mikrofone

Gesetzliche Vorgaben in Deutschland

Im Telekommunikationsgesetz (TKG) ist festgelegt, dass es für jede Frequenznutzung eine Zuteilung durch eine Regulierungsbehörde, in diesem Fall der Bundesnetzagentur, bedarf. Die genehmigungsfähigen VHF- und UHF-Bereiche für drahtlose Mikrofone liegen in Kanälen der terrestrischen Fernsehübertragung:

- VHF von 174 bis 223 MHz = TV-Kanal 5 bis 11
- UHF von 470 bis 790 MHz = TV-Kanal 21 bis 37 und 39 bis 60

Für die UHF-Bereiche von 790 bis 814 MHz und 838 bis 863 MHz (TV-Kanäle 61 bis 63 und 67 bis 69) ist keine Anmeldung bei der Bundesnetzagentur notwendig. Allerdings sind hier die Frequenzen genau festgelegt, die von bestimmten Nutzergruppen verwendet werden dürfen. Einteilung der Nutzergruppen: Öffentlich-rechtliche Rundfunkanstalten (a), private Programmanbieter und -produzenten (b), sonstige professionelle Veranstalter wie z.B. Wanderbühnen (c) und weitere professionelle Anwender wie z.B. Musikgruppen (d). Innerhalb geschlossener Räume dürfen die Anwender der Nutzergruppe (e) wie z.B. Theater und Messen beliebige Frequenzen in den freien Frequenzbereichen bedarfsorientiert nutzen. Einzige Einschränkung ist hier, dass die genutzten Frequenzen mindestens 100 kHz von der Kanalgrenze entfernt sind und auf einem 25-kHz-Raster liegen. Drahtloses In-Ear-Monitoring und Kommandofunk fällt in die Nutzergruppe (f) und es gelten die gleichen Bestimmungen wie für drahtlose Mikrofone. Die Frequenznutzung durch

¹ vgl. Görne, 2007, Seite 140

drahtlose Mikrofone hat aber immer Vorrang, falls an einem Veranstaltungsort mehrere Anwender gleichzeitig Funktechnik einsetzen möchten. Neben den Frequenzen ist die maximale Strahlungsleistung der Sender festgelegt. Diese muss beschränkt sein auf 50 mW. Die maximal belegte Bandbreite darf 200 kHz nicht überschreiten.²

Eine sog. „Allgemeinzuteilung“, d.h. eine freie Frequenznutzung für drahtlose Mikrofone, die nicht an Nutzergruppen gebunden ist, gilt für den UHF-Bereich 863 bis 865 MHz. Die Anwender sind an keinen bestimmten Standard gebunden, allerdings muss die maximale Strahlungsleistung auf 10 mW begrenzt sein.³ Weiterhin gilt eine Allgemeinzuteilung für den UHF-Bereich 1795 bis 1800 MHz mit max. 50 mW und 200 kHz Bandbreite.⁴

Der UHF-Bereich von 2400 bis 2483,50 MHz ist prinzipiell ebenfalls für einen genehmigungsfreien Betrieb von drahtlosen Mikrofonen offen, allerdings werden diese Frequenzen inzwischen hauptsächlich für Wireless-LAN verwendet.⁵

Über die Suchfunktion der Webseite <http://www.bundesnetzagentur.de> (Suchbegriff „Drahtlose Mikrofone“) sind weitere Informationen verfügbar.

18.1.2. Signalweg einer Mikroportanlage

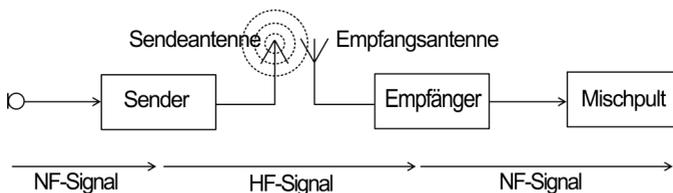


Abb. 18.1: Signalweg einer Funkübertragung

Erläuterung zur Abb. 18.1: Der Schall wird durch das Mikrofon in ein elektrisches Audiosignal umgewandelt. Der Mikroport-Sender wandelt dieses NF-Audiosignal in ein HF-Signal und strahlt dieses über die Sendeantenne ab. Über die Empfangsantenne gelangt das HF-Signal in den Mikroport-Empfänger, der wieder ein NF-Signal erzeugt, das über Kabel zum Mischpult geleitet wird.

18.1.3. HF-Modulation

Mikroports arbeiten mit Frequenzmodulation (FM). Dabei wird für ein Signal, das übertragen werden soll, jeweils eine aufeinander abgestimmte Kombination

² Vfg. 91/2005, gültig bis 31.12.2015

³ Vfg. 7/2006, gültig bis 31.12.2016

⁴ Vfg. 18/2006, gültig bis 31.12.2016

⁵ Vfg. 89/2003, gültig bis 31.12.2013

von Sender und Empfänger mit gleicher Frequenz benötigt. Sollen mehrere Signale übertragen werden, so sind mehrere Frequenzen notwendig.

Vorteil der Frequenzmodulation: Die Information des NF-Signals ist in der Frequenz des HF-Signals enthalten. Die Amplitude des HF-Signals kann schwanken, ohne dass die NF-Information verloren geht. D.h. Änderungen in der Stärke des Sendesignals haben keinen Einfluss auf die Übertragung, außer natürlich der Empfang bricht ganz ab.

Hub

Der Hub ist die Frequenzabweichung von der Trägerfrequenz. Die Größe dieser Abweichung wird durch die Amplitude des NF-Signals bestimmt. Aus dem maximalen Hub des HF-Signals ergeben sich die Abstände der einzelnen Trägerfrequenzen zueinander. Es wird dabei zwischen der Breitband- und der Schmalbandtechnik unterschieden (Abb. 18.2).

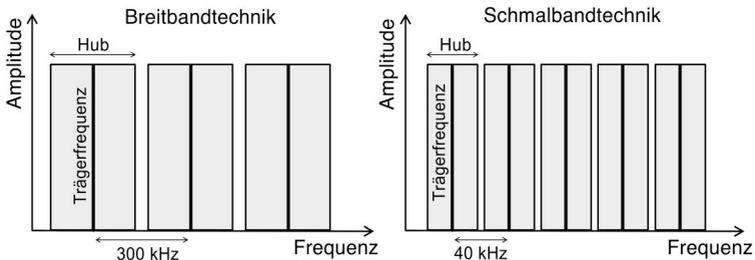


Abb. 18.2: Breitband- und Schmalbandtechnik

Bei der Breitbandtechnik sollten die Kanäle einen Mindestabstand von 300 kHz haben, um einen störungsfreien Betrieb zu ermöglichen. Es lassen sich nur wenige Kanäle innerhalb eines festgelegten Frequenzbereichs unterbringen. Anwendung der Breitbandtechnik: Übertragungen in Studio-Qualität z.B. für Sprache und Gesang.

Bei der Schmalbandtechnik haben die Kanäle einen kleineren Abstand von z.B. 40 kHz. In den gleichen Frequenzbereich passen damit mehr Kanäle. Anwendung der Schmalbandtechnik: Sprachübertragungen zur Kommunikation.

Unterscheidung von Nennhub und Spitzenhub:

- Nennhub = wird bei Vollaussteuerung des Senders erreicht.
- Spitzenhub = Maximalwert, der nicht überschritten werden darf, da sonst Nachbarkanäle gestört werden.

Zur Vermeidung eines zu großen Hubs haben die Sender eine Hubbegrenzung (Limiter) eingebaut.

18.1.4. Intermodulation und Frequenzplanung

Bei mehrkanaligen Mikroportanlagen ist darauf zu achten, dass es bei nicht aufeinander abgestimmten Sendefrequenzen zu Intermodulationsstörungen kommen kann (Abb. 18.3).

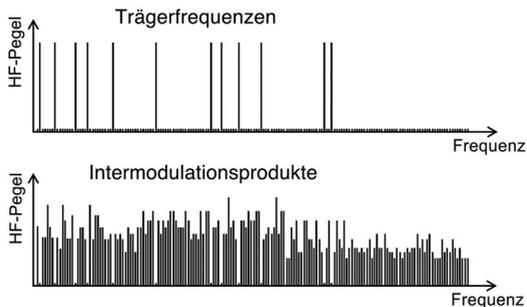


Abb. 18.3: Spektrum von Intermodulationsprodukten
Bildquelle: Sennheiser Revue, 2002, Seite 15

Intermodulation tritt in den Sendern und Empfängern auf. Sendefrequenzen mit hohen HF-Pegeln bilden ein Mischprodukt aus nichtlinearen Verzerrungen und es entstehen vollkommen neue Frequenzen, die unter Umständen direkt in andere Empfangskanäle fallen. Auf den gestörten Kanälen sind dann die typischen Zwischengeräusche im Hintergrund zu hören.

Nähern sich zwei Sendeantennen auf wenige Zentimeter (< 10 cm), so kann HF-Strahlung in umgekehrter Richtung in die Ausgangsstufe gelangen. Auch dadurch werden Störungen hervorgerufen.

Intermodulationsprodukte lassen sich bei bekannten Sendefrequenzen berechnen. Bei zwei Signalen ist diese Berechnung noch recht einfach. Für die Berechnung von Intermodulationen mehrkanaliger Anlagen gibt es geeignete Computerprogramme.

Berechnungsbeispiel Intermodulationsprodukte von zwei Trägerfrequenzen:

$f_1 = 808$ MHz und $f_2 = 810$ MHz

A: Harmonische der Grundfrequenz.

$$2f_1 = 2 * 808 \text{ MHz} = 1616 \text{ MHz}$$

$$2f_2 = 2 * 810 \text{ MHz} = 1620 \text{ MHz}$$

$$3f_1 = 3 * 808 \text{ MHz} = 2424 \text{ MHz}$$

$$3f_2 = 3 * 810 \text{ MHz} = 2430 \text{ MHz}$$

→ Die Harmonischen der Grundfrequenzen liegen außerhalb des Empfangsbereichs und stören daher nicht.

B: Einfache Summen- und Differenzfrequenzen

$$f_1 + f_2 = 808 \text{ MHz} + 810 \text{ MHz} = 1618 \text{ MHz}$$

$$f_2 - f_1 = 810 \text{ MHz} - 808 \text{ MHz} = 2 \text{ MHz}$$

→ Auch diese Frequenzen stören nicht.

C: Summen- und Differenzfrequenzen 3. Ordnung (IM 3)

$$2f_1 - f_2 = (2 * 808 \text{ MHz}) - 810 \text{ MHz} = 806 \text{ MHz}$$

$$2f_2 - f_1 = (2 * 810 \text{ MHz}) - 808 \text{ MHz} = 812 \text{ MHz}$$

→ Diese Frequenzen liegen innerhalb des Empfangsbereichs, d.h. würden weitere Sender auf 806 oder 812 MHz betrieben, könnten Störungen auftreten.

D: Intermodulationsprodukte höherer Ordnung

$$\text{IM } 5 = 3f_1 - 2f_2 (=804 \text{ MHz}) \quad \text{und} \quad \text{IM } 5 = 3f_2 - 2f_1 (= 814 \text{ MHz})$$

$$\text{IM } 7 = 4f_1 - 3f_2 (=802 \text{ MHz}) \quad \text{und} \quad \text{IM } 7 = 4f_2 - 3f_1 (= 816 \text{ MHz})$$

Abb. 18.4 verdeutlicht den Pegelabfall der Intermodulationsprodukte höherer Ordnung:

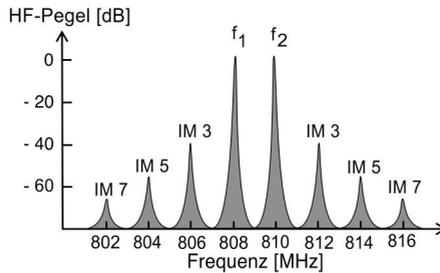


Abb. 18.4: Intermodulationsprodukte

18.1.5. Sender

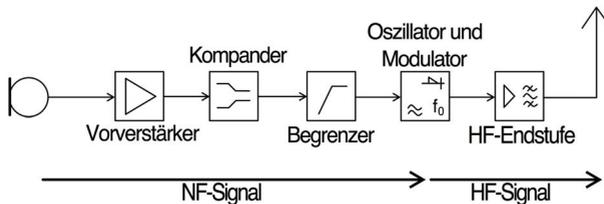


Abb. 18.5: Senderprinzip

Bildquelle: Sennheiser Revue, 2002, Seite 169

Erläuterung zur Abb. 18.5: Das Mikrofonsignal wird im Vorverstärker auf Leitungspegel gebracht. Die Kompanderschaltung komprimiert die Dynamik, um

Rauschen und Störungen auf der HF-Funkstrecke zu minimieren. Der Begrenzer setzt eine feste Obergrenze für die Dynamik des NF-Signals, damit der Hub des HF-Signals einen festgelegten Bereich nicht überschreitet. Durch den Oszillator wird eine hochfrequente Schwingung erzeugt. Das NF-Signal dient als Steuerspannung für die Frequenzänderung des Schwingkreises (=Modulation). Durch Frequenzvervielfachung wird die eigentliche Sendefrequenz erreicht. Die HF-Endstufe verstärkt das HF-Signal und über die Sendeantenne wird dann das HF-Signal abgestrahlt.

Komponder

Funkstrecken haben ein deutliches Eigenrauschen. Um dennoch gute Klangqualität zu erreichen, kann ein Kompondersystem eingesetzt werden. Die Dynamik des NF-Signals wird vor der Übertragung eingengt und im Empfänger die ursprüngliche Dynamik wieder hergestellt. Sennheiser nennt dieses Verfahren „HiDyn plus“ (Abb. 18.6).

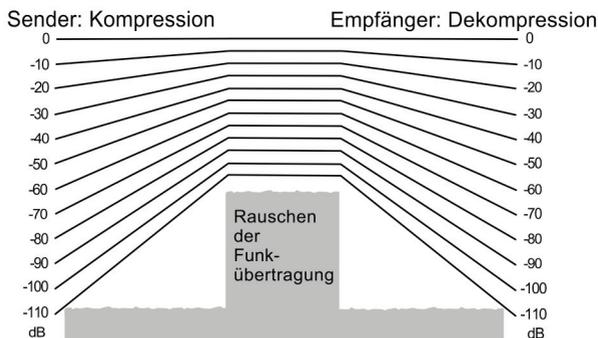


Abb. 18.6: Komponderprinzip

Bildquelle: Sennheiser Revue, 2002, Seite 19

Ohne Kompondersystem wird ein Geräuschspannungsabstand von ca. 60 dB erreicht, mit HiDyn plus kommt man auf einen Wert von annähernd 110 dB. Andere Hersteller nutzen eigene Systeme zur Rauschunterdrückung. Diese sind u.U. nicht kompatibel.

Hand- und Taschensender

Bei der Mikroporttechnik kommen zwei Arten von Mikrofonen bzw. Sendern zum Einsatz: Handmikrofone mit integrierten Sendern und Miniaturmikrofone, die an Taschensender angeschlossen sind (Abb. 18.7).

Bei einem Handsender sind Mikrofon, Sender und Antenne in einem Gerät integriert. Es gibt Handsender mit dynamischen Kapseln oder Kondensatorkapseln mit verschiedenen Richtcharakteristiken. Die bevorzugte Anwendung ist die Übertragung von Sprache und Gesang.

- Vorteile: Einfach in der Handhabung, Nahbesprechungseffekt nutzbar
- Nachteil: Nur wirklich sinnvoll für Personen, die im Umgang mit Mikrofonen geübt sind
- Günstige Alternative: Normales Handmikrofon mit XLR-Anstecksender

Taschensender mit Miniaturmikrofon: Mikrofon und Sendeantenne werden über Anschlussbuchsen an einen Taschensender angeschlossen. Anwendungsbeispiele für Taschensender: Beim Fernsehen als Ansteckmikrofon, im Theater als „unsichtbare“ Mikrofonierung. Statt einem Mikrofon kann auch ein elektroakustisches Instrument (z.B. eine E-Gitarre) angeschlossen werden.

- Vorteil von Taschensendern: Kleines Mikrofon, dadurch kaum sichtbar. Sender kann unter der Kleidung versteckt getragen werden → erhöhte Mobilität der Akteure.
- Nachteil: Sender und Mikrofon müssen getrennt gekauft werden → nicht so kostengünstig wie ein Handsender.



Abb. 18.7: Handsender und Taschensender mit Miniaturmikrofon
Sennheiser SKM 5000 und SK50

18.1.6. Antennen

Dipol

Die einfachste Bauweise für eine Antenne ist der sog. Dipol. Dies kann eine ausziehbare Stabantenne sein oder auch nur ein gerader Draht. Der Dipol als Empfangsantenne empfängt das vom Sender abgestrahlte elektromagnetische Feld nur optimal, wenn er parallel zur Sendeantenne ausgerichtet ist. Wenn also die Sendeantenne senkrecht getragen wird, dann muss auch die Empfangsantenne senkrecht angebracht sein. In geschlossenen Räumen gibt es durch Reflexionen aber auch Änderungen in der Polarisation des elektromagnetischen Feldes. Ein

quer ausgerichteter Dipol empfängt daher einen um nur ca. -3 bis -6 dB geringeren HF-Pegel.

Ein Dipol muss in der Länge abgestimmt sein. Optimal ist die halbe Wellenlänge der Empfangsfrequenz. Man spricht dann auch von einem $\lambda/2$ -Dipol. Für den UHF-Bereich ist die Empfangsantenne ca. 30 cm lang (Abb. 18.8).

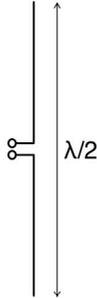


Abb. 18.8: Dipol

Bildquelle: Albrecht et al., 1995, Seite 191

Halbdipol

Wenn ein Gegengewicht vorhanden ist, kann die Hälfte des Dipols eingespart werden. Ein Gegengewicht kann dabei der Erdboden, eine Stahlplatte oder ein Metallstativ sein (Abb. 18.9).

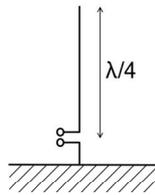


Abb. 18.9: Halbdipol

Bildquelle: Albrecht et al., 1995, Seite 192

Ground-Plane Antenne

Die Gegengewichte sind hier Metallstäbe. Ground-Plane-Antennen empfangen unsymmetrisch, d.h. bei senkrechter Aufstellung befindet sich der beste Empfangsbereich oberhalb der Metallstäbe (Abb. 18.10).

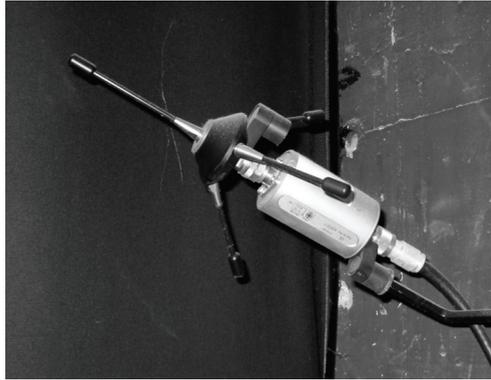


Abb. 18.10: Ground-Plane Empfangsantenne

Richtantenne (Logarithmisch-Periodische Antenne)

Eine Richtantenne ist aus mehreren Dipolen mit unterschiedlichen Längen und Abständen zusammengesetzt. Der Abstrahlwinkel wird in [°] angegeben, manchmal auch als Vorne- / Hinten-Dämpfung in [dB].

Richtantennen sind oft breitbandig, d.h. es wird ein großer Frequenzbereich abgestrahlt bzw. empfangen, Beispiel: Die Sendeantenne Sennheiser A 2003-UHF ist für Frequenzen von 450 bis 960 MHz ausgelegt (Abb. 18.11). Sie wird z.B. für drahtloses In-Ear-Monitoring eingesetzt.



Abb. 18.11: Richtantenne
Sennheiser A 2003-UHF

18.1.7. Antennenkabel

Beim Anschluss der Antenne an den Empfänger (oder Sender) wird mit Leistungsanpassung gearbeitet. Die Impedanz der Antenne und des Antenneneingangs müssen dabei übereinstimmen. Üblich sind 50 Ω

Wellenwiderstand. Es gibt Antennenkabel mit verschiedenen Dämpfungen (z.B. RG58, RG213 oder RG218) wie in Tabelle 18.1 aufgeführt.

Tabelle 18.1: Dämpfungswerte verschiedener Antennenkabel⁶

Frequenz:	RG58:	RG213:	RG218:
100 MHz	17,0 dB / 100 m	7,0 dB / 100 m	2,9 dB / 100 m
500 MHz	39,0 dB / 100 m	17,0 dB / 100 m	8,1 dB / 100 m
800 MHz	51,0 dB / 100 m	23,0 dB / 100 m	11,2 dB / 100 m

Die in der Tabelle angegebenen Dämpfungswerte beziehen sich auf 100 m Kabellänge bei einer Temperatur von 20° C.

Antennenkabel mit geringerer Dämpfung sind bei sehr langen Kabelwegen vorzuziehen. Ein häufig verwendetes Antennenkabel für UHF und VHF ist z.B. das doppelt geschirmte H2000 von der Firma Belden, das ähnliche Dämpfungswerte wie ein RG218-Kabel hat.⁷ Der Durchmesser über den Außenleiter beträgt ca. 8 mm. Als Steckverbinder wird ein sog. N-Stecker montiert (Abb. 18.12).

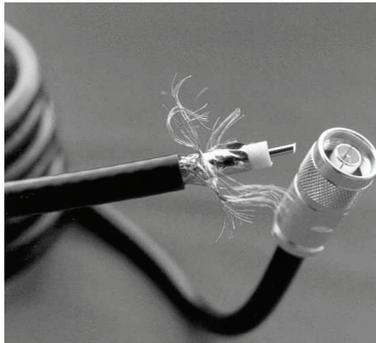


Abb. 18.12: Antennenkabel mit N-Stecker (Belten H2000)

Bildquelle: Kabel Kusch, <http://www.kabel-kusch.de>

18.1.8. Antennen-Booster

Falls die Dämpfung der Leitung zu hoch sein sollte, können auch Antennen-Booster eingesetzt werden. Der Booster sollte dabei direkt hinter der Empfangsantenne angebracht sein, und nicht etwa am Empfänger, da sonst das Leitungsrauschen mitverstärkt wird (Abb. 18.13).

⁶ Quelle für die Daten: <http://www.helukabel.de> → Programm → Kabel und Leitungen → Koaxialkabel (Seitenaufruf Oktober 2008)

⁷ vgl. http://www.kabel-kusch.de/Koaxkabel/H2000/h2000_frnc.htm (Oktober 2008)



Abb. 18.13: Booster

18.1.9. Antennensplitter

Bei mehrkanaligen Anlagen werden Empfangsantennen eingesetzt, die auf einen bestimmten Frequenzbereich abgestimmt sind, z.B. jeweils eine Antenne pro TV-Kanal. Das HF-Signal der jeweiligen Antenne wird über einen Splitter an die einzelnen Empfänger verteilt.

Es gibt Antennensplitter in passiver und aktiver Ausführung, wobei passive Signalverteilung nur für kleinere Anlagen mit 3 bis 4 Kanälen und kurze Antennenleitungen von weniger als 10 m in Frage kommt. Bei Diversity-Anlagen sind zwei Splitter notwendig. Zu Beachten ist die Dämpfung des HF-Signals bei der Verteilung: Bei einem passiven Splitter mit einem Eingang und drei Ausgängen wird das Signal bereits um ca. -6 dB abgeschwächt.

Abb. 18.14 zeigt den HF-Signalfloss eines großen Mikroportsystems, welches bei einem Musical zum Einsatz kam.

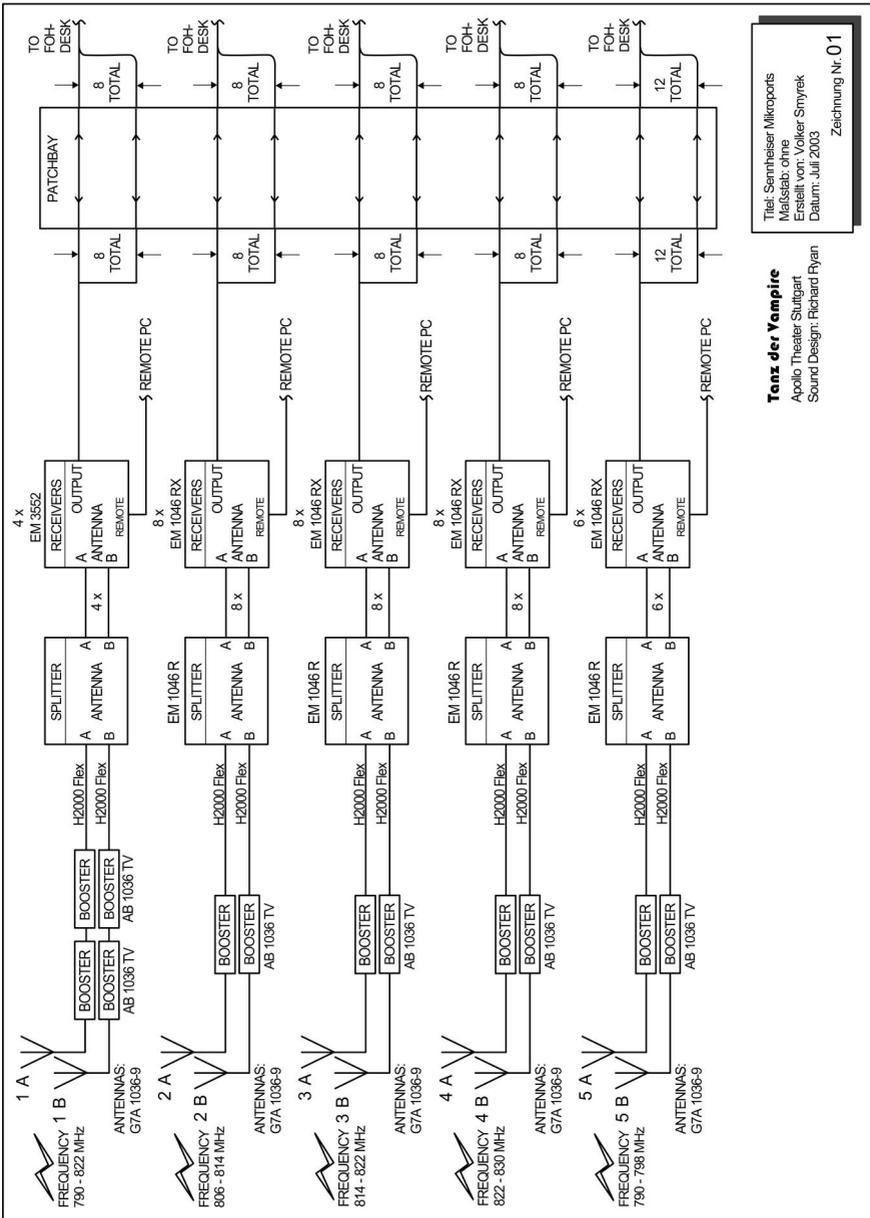


Abb. 18.14: HF-Signalfuss eines Mikroportsystems mit 44 Sendern

18.1.10. Empfänger

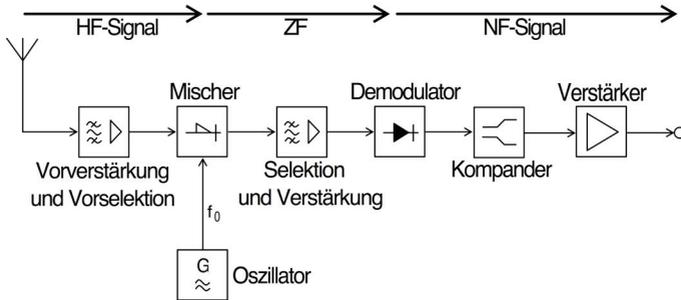


Abb. 18.15: Empfängerprinzip

Bildquelle: Sennheiser Revue, 2002, Seite 174

Erläuterung zur Abb. 18.15: In der HF-Vorstufe wird das empfangene Frequenzgemisch durch ein Bandpassfilter selektiert und der Bereich der Empfangsfrequenz vorverstärkt. Unterschiedliche HF-Pegel werden hier angeglichen. Im Mischer wird die Empfangsfrequenz auf eine Zwischenfrequenz (ZF) von 10,7 MHz umgesetzt. Der Demodulator gewinnt aus dem ZF-Signal ein niederfrequentes Signal. In der Kompander-Baugruppe wird die ursprüngliche Dynamik des NF-Signals wiederhergestellt. Der NF-Verstärker bringt dann das Signal auf Line-Pegel.

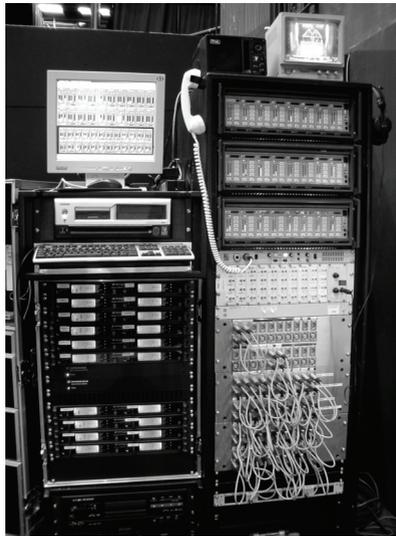


Abb. 18.16: Empfänger, Remote-PC, Vorhöreinrichtung und Steckfeld

18.1.11. Diversity-Verfahren

Eine Empfangsantenne, die im Raum installiert ist, empfängt nicht nur das direkt vom Sender ausgestrahlte HF-Signal, sondern auch durch Wände reflektierte Signale. Wenn ein direktes und ein reflektiertes HF-Signal mit gleichem Pegel aber entgegengesetzter Phase an der Empfangsantenne eintreffen, so löschen sich diese Signale aus. Es entsteht ein sog. Funkloch, es kommt zu Dropouts im Empfänger (Abb. 18.17).

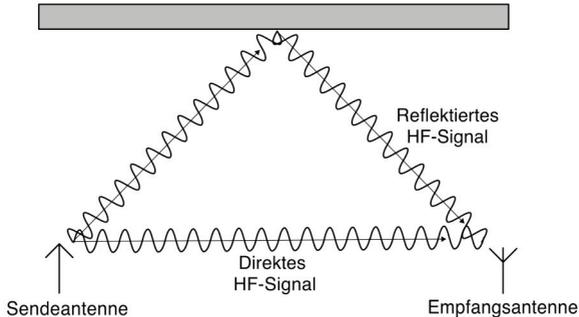


Abb. 18.17: Mehrwege-Empfang

Eine zweite Antenne an einem anderen Ort im Raum liegt dabei eventuell außerhalb dieses Funkloches. Genau das führt zum Prinzip des Diversity-Verfahrens. Hier erfolgt ein Vergleich der HF-Pegel zweier Empfangsantennen, wobei zum Demodulator im Empfänger immer nur das ZF-Signal mit dem höheren Pegel durchgeschaltet wird. Dadurch sollen Dropouts möglichst vermieden werden. Abb. 18.18 zeigt den Aufbau eines Diversity-Empfängers. Es gibt hier zwei komplette Empfangszüge; ein Komparator schaltet das Audiosignal des Empfängers mit dem höheren ZF-Pegel weiter.

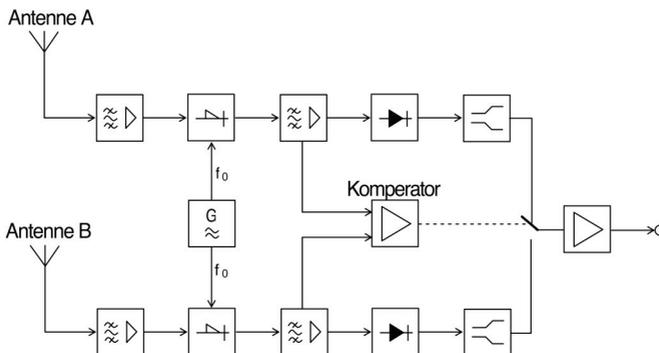


Abb. 18.18: Diversity-Prinzip

Bildquelle: Sennheiser Revue, 2002, Seite 175

18.1.12. Squelch

Ist ein Mikroportsender ausgeschaltet, so können im dazugehörigen Empfänger u.U. Intermodulationen höherer Ordnung mit geringem Pegel empfangen werden. Mit dem Parameter „Squelch“ kann der Empfänger darauf eingestellt werden, dass das NF-Signal nur weitergeschaltet wird, wenn das HF-Signal einen definierten Pegel überschreitet. Störsignale werden mit dieser Schaltung damit ausgeblendet.

18.2. Infrarot-Technik

Die IR-Übertragung ist eine weitere Alternative zur kabelgebundenen Anlagentechnik. Signalträger ist dabei moduliertes, für den Menschen unsichtbares Infrarotlicht. IR-Anlagen werden überwiegend eingesetzt für Dolmetscher-Anlagen und Informationssystemen in Museen.

Eine Sonderanwendung sind Hörbehinderten-Anlagen in Theatern. Ein Hörgerät kann Störgeräusche z.B. vom Publikum oder einer Lüftung nicht vom Nutzschall unterscheiden. Störgeräusche sind daher für Hörbehinderte sehr viel unangenehmer als für normal Hörende. Eine Verbesserung ist möglich, wenn man Nutzern von Hörgeräten ein Audiosignal anbietet, das möglichst frei von Störschall ist.⁸ Daher wird eine separate Abmischung der Vorstellung über Infrarotsender im Saal übertragen. Die Infrarottechnik bietet hier gegenüber der drahtlosen HF-Übertragung den Vorteil, dass die Reichweite auf den Zuschauerbereich beschränkt bleibt. Da unsichtbares Infrarotlicht verwendet wird, gibt es keine optischen oder elektrischen Störungen. Deshalb können Infrarotsender ohne Probleme zusätzlich zu den drahtlosen VHF- und UHF-Anlagen betrieben werden.⁹

18.2.1. Signalweg einer IR-Anlage

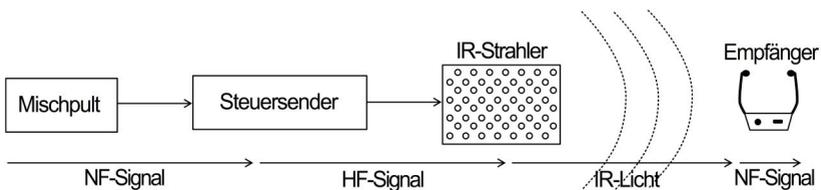


Abb. 18.19: Signalweg IR-Technik

Erläuterung zur Abb. 18.19: Von der Quelle gelangt über ein Audiokabel das NF-Signal mit Leitungspegel zum Steuersender. Dieser moduliert eine HF-Trägerfrequenz mit der Information des NF-Signals. Über eine koaxiale

⁸ vgl. Boye und Herrmann, 1989, Seite 231

⁹ vgl. Dickreiter, 1997, Band 1, Seite 225

Kabelverbindung wird dieses HF-Signal dem IR-Strahler zugeführt. Spezielle Dioden im Strahler emittieren Infrarotlicht, das dann vom Empfänger aufgefangen wird. Im Empfänger wird das Lichtsignal in ein Audiosignal zurückgewandelt.

18.2.2. IR-Modulation

Ein Signal, das über eine Infrarot-Sendediode ausgestrahlt werden soll, muss über die Intensität moduliert sein. Es wäre möglich, ein Audiosignal mit der Bandbreite von 20 Hz bis 20 kHz direkt zu modulieren, d.h. das Licht im Takt der anliegenden Frequenz auf und abschwellen zu lassen. Allerdings senden Leuchtstofflampen ein starkes, oberwellenreiches 100-Hz-Signal aus, das dann die Übertragung stören würde. Um von diesen niedrigen Frequenzen wegzukommen, ist eine Trägerung des NF-Signals erforderlich.

Bei der IR-Übertragung wird eine kombinierte Amplituden- und Frequenzmodulation verwendet. Der Diodenstrom wird durch einen HF-Hilfsträger intensitätsmoduliert. Die Hilfsfrequenz wird dann wiederum mit dem NF-Signal frequenzmoduliert (Abb. 18.20).¹⁰

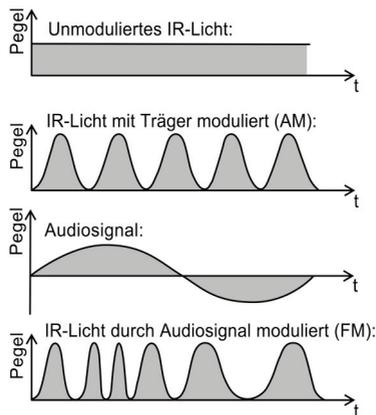


Abb. 18.20: IR-Modulation

Bildquelle: Sennheiser Revue, 1999, Seite 119

¹⁰ vgl. Albrecht et al., 1995, Seite 210

Unterscheidung IR-Breitband- und -Schmalbandtechnik

IR-Breitbandtechnik:

- Hub = +/- 50 kHz
- Genormte Trägerfrequenzen: 95 kHz und 250 kHz bzw. 2,3 und 2,8 MHz für Zweikanal- bzw. Stereoübertragung
- Bandbreite NF-Signal: 20 Hz bis 20 kHz

IR-Schmalbandtechnik:

- Hub = +/- 7 kHz
- Mehrkanalige Anlagen mit bis zu 32 Kanälen auf genormten Trägerfrequenzen
- Bandbreite NF-Signal: 50 Hz bis 8 kHz

18.2.3. Probleme bei IR-Übertragung

Nur bei einer Sichtverbindung zwischen Strahler und Empfänger bestehen optimale Übertragungsbedingungen. Mauern, Holz, dichte Vorhänge usw. verhindern eine Ausbreitung des Infrarotlichts. Glas lässt Infrarotlicht dagegen passieren, spiegelnde Flächen reflektieren es vollständig.

Starke Kunstlichtlampen mit mehr als 2000 Lux bzw. Leuchtstofflampen mit mehr als 10 000 Lux und direkte Sonneneinstrahlung beeinflussen die Infrarot-Übertragung. Bei abgeschaltetem Strahler kann eventuell ein stark einfallender Langwellensender in den Empfängern gehört werden.

18.2.4. Anlagenteile der IR-Technik

18.2.4.1. Steuersender

Der Steuersender verstärkt das anliegende NF-Signal und moduliert es auf die Trägerfrequenz.

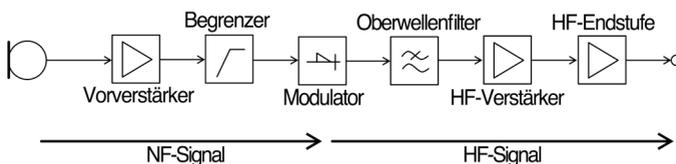


Abb. 18.21: Prinzipaufbau IR-Steuersender

Bildquelle: Sennheiser Revue, 1999, Seite 119

Erläuterung zur Abb. 18.21: Nach einer Vorverstärkung und Begrenzung des NF-Signals erfolgt die Frequenzmodulation. Ein Oberwellenfilter verhindert das Auftreten von zu starken Oberwellen, die bei der FM entstehen. Das verstärkte HF-Signal liegt dann an der Ausgangsbuchse an.

18.2.4.2. Strahler

Im Strahler emittieren Sendedioden Infrarotlicht mit einer Wellenlänge von 880 nm bzw. 950 nm, je nach verwendetem Diodentyp.¹¹ Es sind mehrere Strahler notwendig, um einen Raum diffus auszuleuchten. Dadurch kann in jedem Punkt des Raumes ein guter Empfang gewährleistet werden. Sollte das Rauschen im Empfänger zu groß sein, muss die Aufstellung der Strahler optimiert oder die Anzahl der Strahler erhöht werden.

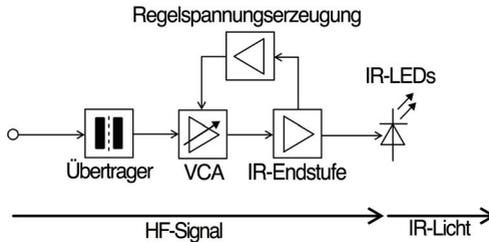


Abb. 18.22: Prinzipaufbau IR-Strahler
Bildquelle: Sennheiser Revue, 1999, Seite 120

Erläuterung zur Abb. 18.22: Der Übertrager sorgt für eine galvanische Trennung, um Brummschleifen zu verhindern. Ein VCA steuert die Eingangsspannung der Infrarot-Endstufe, die wiederum die Intensität der Sendedioden regelt.

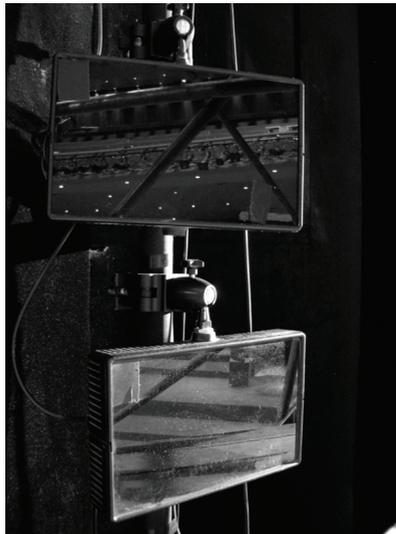


Abb. 18.23: Strahler Sennheiser SZI 1219

¹¹ vgl. Albrecht et al., 1995, Seite 208

18.2.4.3. Empfänger

Über eine Sammellinse mit optischem Filter wird nur Infrarotlicht zu einer lichtempfindlichen Empfangsdiode durchgelassen. Nach der Demodulation liegt das ursprüngliche NF-Audiosignal vor. Es gibt Empfangsgeräte mit integrierten Ohrhörern oder mit einer Anschlussbuchse für Hörgeräte.

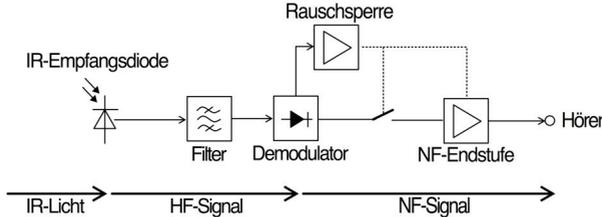


Abb. 18.24: Prinzipaufbau IR-Empfänger
Bildquelle: Sennheiser Revue, 1999, Seite 124

Erläuterung zur Abb. 18.24: Nach einer Bandpassfilterung des HF-Signals erfolgt die Demodulation. Die Rauschsperr verhindert das Aufrauschen des Empfängers bei unzureichender Empfangssignalstärke. Die NF-Endstufe verstärkt das Signal für einen Kopfhörer.

Beispiel Empfänger Sennheiser HDI 91 und HDI 407:

- HDI 91: Kinnbügelempfänger
- HDI 407: Empfänger mit Anschlussbuchse für Kopfhörer oder Hörgerät
- Breitbandtechnik, Rauschsperr
- extrem leicht (ca. 40 g incl. Akku)



Abb. 18.25: Empfänger Sennheiser HDI 91 und HDI 407

18.3. Übungsaufgaben

Aufgabe 1: (Frage bei der Abschlussprüfung Sommer 2001 der IHK Erfurt)

In welchem Frequenzbereich liegen die Trägerfrequenzen einer drahtlosen Mikrofonanlage im VHF-Bereich?

Aufgabe 2:

Bei einer Konferenzbeschallung werden zwei Mikroportsender mit den Frequenzen 760,000 MHz und 774,100 MHz eingesetzt. Ein Kamerateam möchte bei dieser Veranstaltung ein drahtloses Reportagemikrofon mit der Trägerfrequenz 788,125 MHz einsetzen. Berechne die Intermodulationsfrequenzen 3. Ordnung für die beiden Mikroportsender. Kann das Reportagemikrofon zusätzlich in Betrieb genommen werden, oder ist davon abzuraten?

Aufgabe 3:

Erkläre den Begriff „Squelch“.

Aufgabe 4:

Recherchiere: Wie ist eine Dolmetscheranlage in Infrarotsendetechnik aufgebaut?

Aufgabe 5:

Erkläre mit einfachen Worten: Wie funktioniert die Frequenzmodulation (FM)?



Literaturtipp:

Albrecht, Frank-Werner, Mayer-Fasold, C., Veit, Ivar und Korthals, Thomas: Beschallungstechnik.

(Kapitel „Drahtlose Hochfrequenz Tonübertragungstechnik“ und „Drahtlose Infrarot-Tonübertragungstechnik“)

Renningen-Malmsheim: Expert Verlag.

19. Kommunikationsanlagen



Die Unterweisung in die Funktion von Intercom-Anlagen ist laut Rahmenlehrplan für das zweite Lehrjahr vorgesehen.

19.1. Kabelgebundene Systeme

19.1.1. Partylines

Der Begriff „Partyline“ bedeutet, dass jeder Gesprächsteilnehmer mit allen anderen Teilnehmern auf der gleichen Leitung kommunizieren kann. Die Hör- und Sprechstellen (engl.: Remote Stations) sind über eine Kabelreihe miteinander verbunden (engl.: Daisy Chain). Ein zentrales Netzteil versorgt alle Stationen mit einer Speisespannung.

Partyline-Systeme werden u.a. von den Herstellern RTS und Clearcom gebaut. Exemplarisch soll das Prinzip anhand einer Clearcom-Anlage aufgezeigt werden.

19.1.1.1. Clearcom-Sprechstelle

Abb. 19.1 zeigt den Signalfluss in einer Clearcom-Sprechstelle:

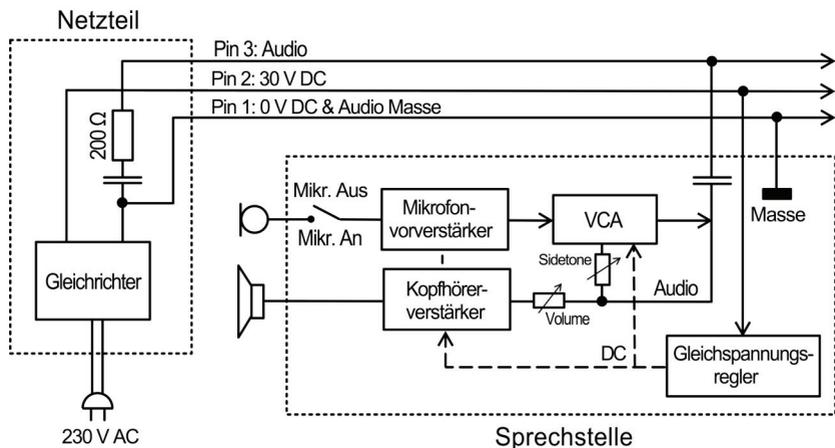


Abb. 19.1: Clearcom Prinzipschaltung¹

Für den Anschluss werden symmetrische Audioleitungen mit XLR-Stecker verwendet, wobei auf Pin 1 die gemeinsame Masse mit 0 V Potential anliegt, über Pin 2 gehen 30 V Gleichstrom und über Pin 3 wird das Audiosignal geleitet.

¹ vgl. Telex, 2002, Seite 33

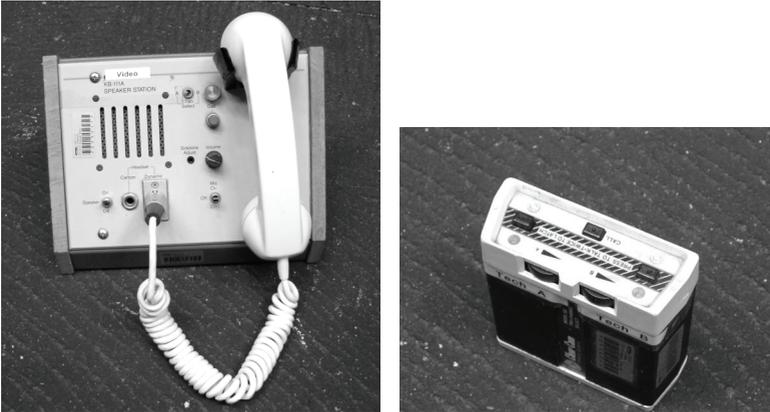


Abb. 19.2: Clearcom-Sprechstelle und -Belt pack

19.1.1.2. Einfaches Clearcom-System

Ein sehr einfaches Clearcom-System besteht aus nur einer einzigen Partyline, die über ein zentrales Netzteil mit Strom versorgt wird. Über Splitter wird das Signal parallel zu den Sprechstellen verteilt (Abb. 19.3).

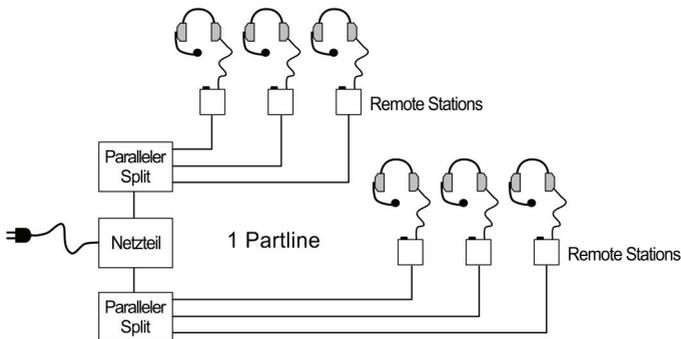


Abb. 19.3: Einfaches Clearcom System²

19.1.1.3. Komplexes Clearcom-System

Wird zusätzlich eine Master Station verwendet, dann können mehrere Partylines gleichzeitig betrieben werden. An die Master Station in Abb. 19.4 sind acht Partylines angeschlossen. Weitere Remote Stations können wiederum über parallele Splitter angebinden werden (nicht eingezeichnet). Der Bediener der Master Station kann auf alle angeschlossenen Partylines zugreifen, während Mitglieder einer Partyline nur untereinander kommunizieren können.³

² vgl. Telex, 2002, Seite 37

³ vgl. Wittels, 2008, Seite 20

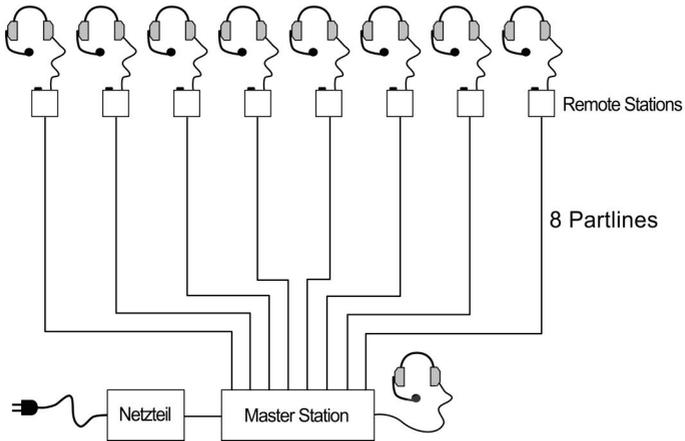


Abb. 19.4: Komplexes Clearcom System⁴

An der Master Station können die einzelnen Partylines zu Gruppen zusammengefasst werden. Vier Gruppen mit der Benennung A, B, C und D sind möglich. Eine Partyline kann aber auch *keiner* Gruppe zugeordnet sein, sie funktioniert dann als eine sog. private Linie unabhängig von der Master Station (Abb. 19.5).



Abb. 19.5: Clearcom Master Station mit zwei Netzteilen

⁴ vgl. Telex, 2002, Seite 43

19.1.2. Clearcom Matrix

Eine Matrix hat n-Eingänge und m-Ausgänge. Von Clearcom gibt es ein Matrixmodul mit $n = 8$ Eingängen und $m = 40$ Ausgängen. Das setzen von Koppelpunkten in der Matrix erfolgt über Schieberegler. Eingangsseitig liegen die jeweiligen Partylines auf, die zu verschiedenen Remote Stations geschaltet werden können (Abb. 19.6 und 19.7).

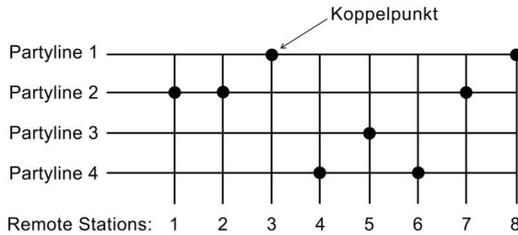


Abb. 19.6: Kommunikationsmatrix

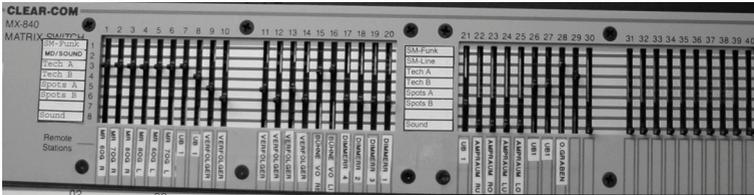


Abb. 19.7: Clearcom 8x40 Matrix

Die weitere Signalverteilung nach der Matrix erfolgt dann zweckmäßigerweise über ein Steckfeld mit symmetrischen XLR-Kabelverbindungen (Abb. 19.8).

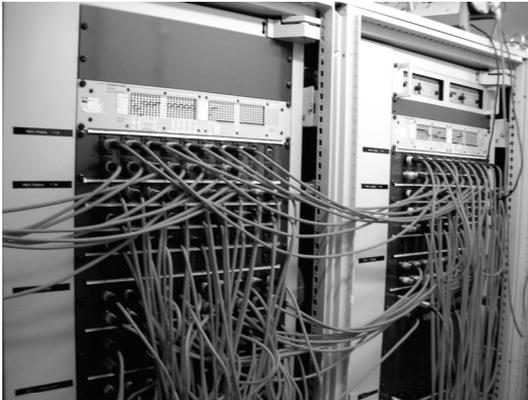


Abb. 19.8: Zentrales Clearcom-Steckfeld

19.1.3. Digitale Systeme

Das zentrale Element eines digitalen Intercom-Systems ist eine Matrix mit diversen digitalen aber auch analogen Schnittstellen. Prinzipiell kann eine digitale Intercom einfach nur ein Partyline-System nachbilden, aber meist ist der Leistungsumfang sehr viel größer:

- Zusätzliche Audiofunktionen wie z.B. Pegelanpassung der Ein- und Ausgänge, Noise Gate und Filter für jeden Teilnehmer-Kanal
- Beschriftung der Sprechasten an den Remote Stations mit LCD-Displays
- Signalverteilung z.B. über XLR- und BNC-Kabel (AES/EBU), ein Glasfaser-Netzwerk (MADI) oder CAT-5 mit RJ-45-Stecker
- Abgesetzte Sprechstellen über ISDN- oder IP-Codecs
- Anbindung von analogen und digitalen Partylines und Funk-Systemen
- GPI (= General Purpose Interface), z.B. zur Signalgebung
- Gruppen- und Konferenzschaltungen
- Schneller Wechsel von vorprogrammierten Konfigurationen
- Beispiele: Drake 4000, Riedel ARTIST, Delec ORATIS.

19.2. Drahtlose Systeme

19.2.1. Simplex-Funk

Der Begriff „Simplex“ bedeutet, dass es nur eine Frequenz für das Senden und Empfangen gibt. Demnach ist nur ein Wechselsprechen möglich, d.h. die Teilnehmer können nicht zeitgleich miteinander Kommunizieren. Aufgrund dessen ist auch eine gewisse Funkdisziplin notwendig.



Abb. 19.9: Motorola Funkgeräte

Die Geräte von Motorola (Abb. 19.9) werden sehr häufig bei Veranstaltungen verwendet, so dass hier inzwischen der Begriff „Motorola“ schon als Synonym für ein Simplex-Funkgerät gilt. Die Handfunkgeräte der GP-Serie haben je nach Ausstattung 16 bis 255 Kanäle. Die Akkubetriebsdauer wird mit bis zu 13 Stunden angegeben.

19.2.2. Duplex-Funk

„Duplex“ bedeutet, dass Senden und Empfangen auf zwei verschiedenen Frequenzen möglich ist. Somit ist zeitgleiches Sprechen und Hören kein Problem mehr. Abb. 19.10 zeigt als Beispiel ein drahtloses Beltpack des Herstellers Telex.



Abb. 19.10: Telex Beltpack mit Headset

Mit einer Telex-Basis-Station können vier drahtlose Beltpacks auf jeweils zwei Kanälen kommunizieren (Abb. 19.11 und 19.12). Werden mehr Beltpacks bei einer Veranstaltung benötigt, müssen entsprechend mehrere Basis-Stationen zusätzlich installiert werden. Über ein Interface können auch kabelgebundene Partyline-Systeme z.B. von Clearcom oder RTS angebunden werden.

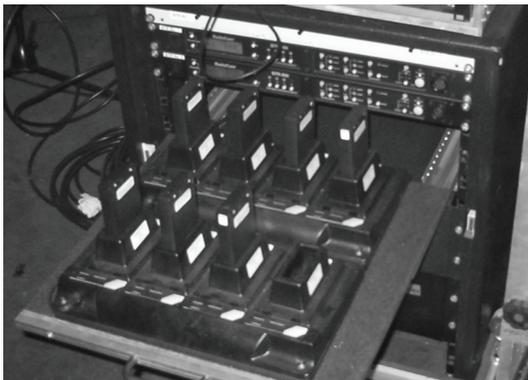
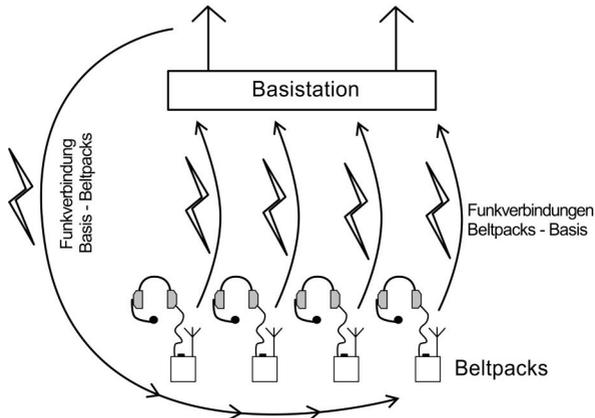


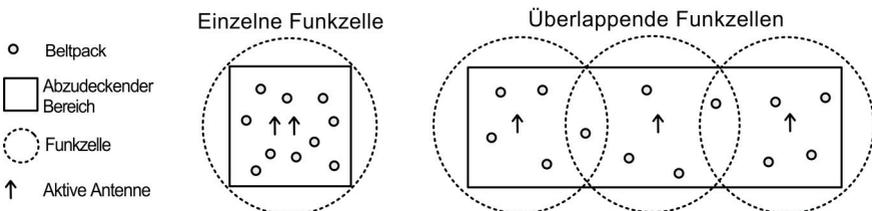
Abb. 19.11: Ladegeräte, dahinter im Rack zwei Basis-Stationen

Abb. 19.12: Drahtlose Intercom (Telex)⁵

19.2.3. Digital-Duplex-Funk

Beispiel: FreeSpeak (Telex / Drake)

Dieses System funktioniert nach dem Prinzip des Cell-Broadcast, ähnlich wie bei GSM-Mobiltelefonen (Abb. 9.13). Die Übertragung erfolgt auf genehmigungsfreien Frequenzen im Gigahertz-Bereich; In Deutschland liegen diese Frequenzen zwischen ca. 1,8 und 2,5 GHz.

Abb. 19.13: FreeSpeak Cell Broadcast (Telex)⁶

Über eine zusätzliche digitale Matrix zur Signalverteilung sind bis zu 200 Beltpacks gleichzeitig nutzbar. Anschlussmöglichkeiten für kabelgebundene Partyline-Systeme sind ebenfalls vorhanden.

⁵ vgl. Telex, 2002, Seite 17

⁶ vgl. <http://www.drake-uk.com> → Products → FreeSpeak (Oktober 2008)

19.3. Übungsaufgaben

Aufgabe 1:

Was ist eine Partyline-Intercom?

Aufgabe 2:

Neben den Partylines von Clearcom werden oft auf die von RTS eingesetzt. Was ist der Grundlegende Unterschied zwischen den beiden Systemen? Recherchiere dazu z.B. im Internet oder in Bedienungsanleitungen.

Aufgabe 3:

Erkläre die Begriffe Simplex und Duplex.

Aufgabe 4:

Drahtlose Kommunikationsanlagen müssen angemeldet werden, wenn sie auf genehmigungspflichtigen Frequenzen betrieben werden. Welche Behörde ist für die Frequenzzuteilung in Deutschland zuständig?



Literaturtipp:

Telex: Handbook of Intercom Systems Engineering.
Burnsville, USA: Telex Communications.

Download des Handbuchs als PDF über die Webseite
<http://www.telexradiocom.com>

(In die Suchfunktion „Handbook of Intercom Systems Engineering“ eingeben, der Downloadlink wird dann angezeigt)

20. Beschallungsanlagen



Das Lesen und Erstellen von Beschallungsplänen und die Installation von Beschallungsanlagen sind im ersten und zweiten Lehrjahr vorgesehen.

20.1. Konzepte für Beschallungsanlagen

Wolfgang Ahnert und Frank Steffen unterscheiden in ihrem Fachbuch „Beschallungstechnik“ drei Grundlegende Beschallungskonzepte:¹

1. Zentrale Beschallungsanlagen
2. Zentral gestützte Beschallungsanlagen
3. Die dezentrale Beschallung

Im Folgenden werden wir uns diese Konzepte kurz ansehen. Als Anwendungsbeispiel dient eine Sprachbeschallung in einem Saal mit Parkettsitzplätzen und einem Rang.

20.1.1. Zentrale Beschallung

Die Lautsprecher sind bei der zentralen Beschallung in der Nähe der Aktionsfläche, in diesem Fall der Bühne, angeordnet. Eine Mono-Schallampel (engl.: Center Cluster) hängt mittig über der Bühne. Zusätzlich ist ein Simulationsstrahler im Rednerpult eingebaut (Abb. 20.1).

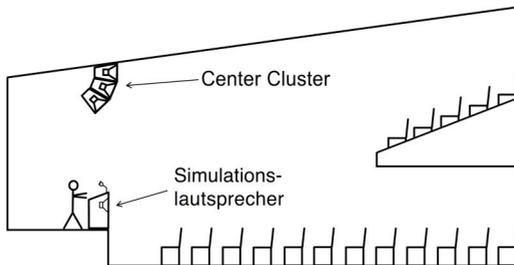


Abb. 20.1: Zentrale Beschallung

Der Simulationsstrahler unterstützt durch eine Stärkung des Originalsignals die Lokalisation besonders für die ersten Sitzreihen. Auf eine Verzögerung des Center Clusters kann verzichtet werden, wenn die Originalschallquelle bzw. der Simulationsstrahler laut genug ist und die Distanz vom Center Cluster zu den

¹ vgl. Ahnert und Steffen, 1993, Seite 245 bis 261

Zuhörern größer ist als der Abstand des Publikums zur Originalschallquelle (Gesetz der erste Welle)²

Unterteilte Zentralbeschallung

Eine zentrale Beschallungsgruppe kann auch in Teilgruppen installiert werden. Letztlich führt dies zu der üblichen L/R-Hauptbeschallung, wobei hier die Lautsprecher im Portal neben der Bühne positioniert sind.

Vorteil der unterteilten Zentralbeschallung: Dadurch wird erst eine stereophone Beschallung möglich. Allerdings kommt es zu einer Fehllokalisierung für die Zuhörer nahe am Portal. Besonders, wenn die Lautsprecher sehr niedrig angebracht sind und daher näher am Zuhörer sind als die Originalschallquellen.

20.1.2. Zentrale gestützte Beschallung

Hier wird eine zentrale Beschallung durch Stützlautsprecher (engl.: Delay Line) ergänzt (Abb. 20.2). Delay Lines sind oft sinnvoll für Sitzplätze unterhalb eines Ranges, da hier der Direktschall der Portallautsprecher teilweise abgeschattet wird. Durch angepasste Laufzeiten müssen Echos über die Delay Line verhindert werden. Berechnung der dafür notwendigen Verzögerungszeit:

$$\Delta t = \frac{s_1 - s_2}{c} + 1 \text{ bis } 30 \text{ ms wegen Haas - Effekt} \quad (\text{Formel 20.1})$$

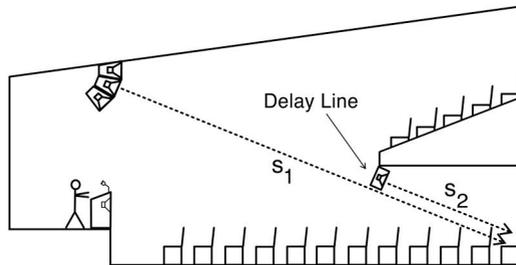


Abb. 20.2: Zentrale gestützte Beschallung

20.1.3. Dezentrale Beschallung

In großen und halligen Räumen ist eine dezentrale Beschallung die beste Lösung, da hier jeder Zuhörer in unmittelbarer Nähe zu einem Lautsprecher sitzt und somit viel Direktschall eintrifft. Das Beispiel in Abb. 20.3 zeigt eine Beschallung mit Lautsprechern in den Rückenlehnen der Stühle. Jeder Lautsprecher ist dabei direkt auf den jeweiligen Zuhörer gerichtet. Um eine optimale Lokalisation der Originalschallquelle zu erreichen, sollte jeder Lautsprecher eine eigene Verzögerungszeit haben.

² s. Kap. 4.2.4.1. „Gesetz der ersten Welle“

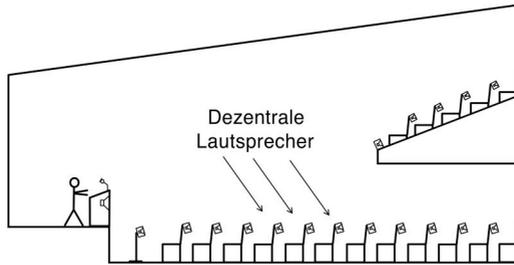


Abb. 20.3: Dezentrale Beschallung

Weitere Anwendungsbeispiele für eine dezentrale Beschallung: Dezentrale Schallsäulen in Kirchen, Bahnhofshallen mit einer großen Anzahl von Deckenlautsprechern oder Konferenzanlagen mit eingebauten Lautsprechern in den Sprechstellen an jedem Sitzplatz.

Ein Nachteil der dezentralen Beschallung ist der große Installationsaufwand.

20.2. Konzertbeschallung

20.2.1. Prinzipieller Signalfluss einer P.A.

Abb. 20.4 zeigt den Signalfluss einer einfachen Beschallungsanlage mit L/R-Hauptlautsprechern, die als 3-Wege-Systeme ausgeführt sind. In der Regel wird bei Konzerten eine unterteilte Zentralbeschallung aufgebaut. Nur in sehr großen Veranstaltungshallen kommen auch zusätzliche Delay Lines zum Einsatz.

Am FOH-Platz befindet sich das Saalmischpult, die Stromversorgung für das Pult (welche redundant ausgelegt sein sollte) und die Sideracks. In den Sideracks sind externe Effekte oder Zuspeler in 19“-Bauweise untergebracht wie zum Beispiel Delays, Hallgeräte, Kompressoren, Gates, EQs, CD-Player etc.

An der Stagebox auf der Bühne liegen die einzelnen Wege des Multicores auf. Die auf die Stagebox gesteckten Snakes wiederum sind Unterverteilungen mit zusammengefassten Wegen z.B. für eine Instrumentengruppe.

Das Monitoring erfolgt bei diesem einfachen Setup vom FOH-Pult aus. Ein Ausspielweg wird zu einem Verstärker für zwei Monitorlautsprecher geleitet. Um Rückkopplungsfrequenzen bedämpfen zu können, ist ein EQ im Monitorweg eingeschleift.

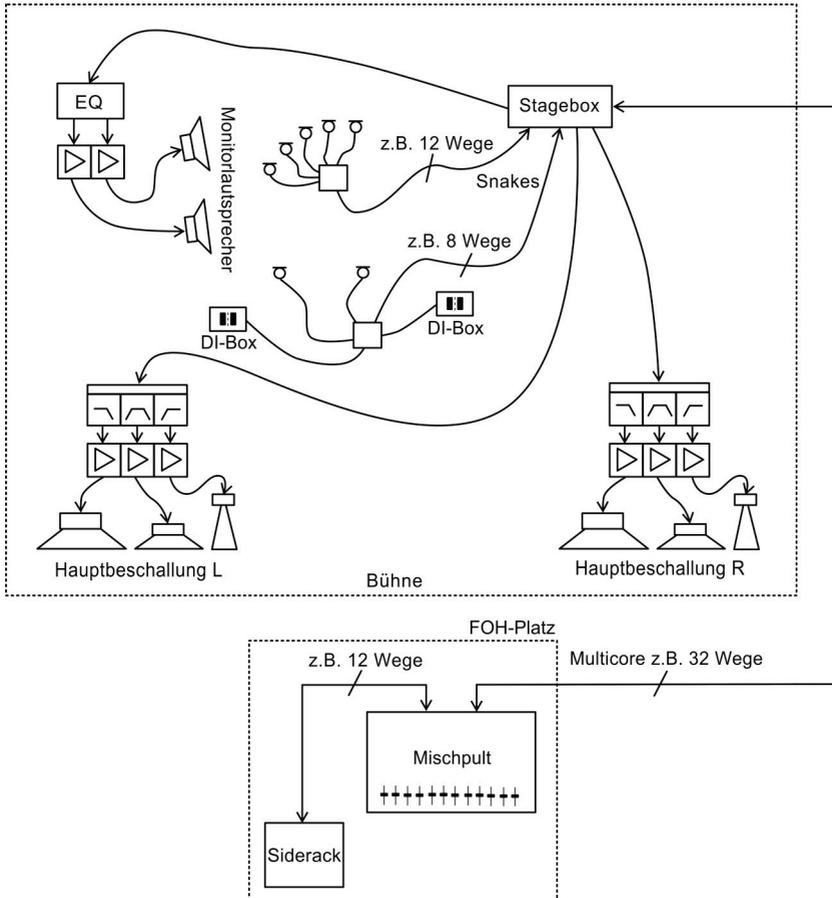


Abb. 20.4: Prinzip einer P.A.

20.2.2. Anordnung der FOH-Lautsprecher

- L/R-Hauptbeschallung: 2- oder 3-Wege-Systeme; Inzwischen meist als abgehängte Line-Arrays (Abb. 20.5)
- Subwoofer zur Tieftonwiedergabe. Bei kleineren Anlagen gibt es auch aufeinander abgestimmte Kombinationen von Topteilen und Subwoofern
- Nearfills: An der Bühnenvorderkante; Einsatz vor allem bei sehr breiten Bühnen
- Outfills: Beschallen die Randbereiche links und rechts der Hauptlautsprecher (z.B. bei einer kleinen Bühne in einer breiten Halle)
- Delay-Line: Stützlautsprecher für den hinteren Bereich vor allem in großen und langen Veranstaltungshallen

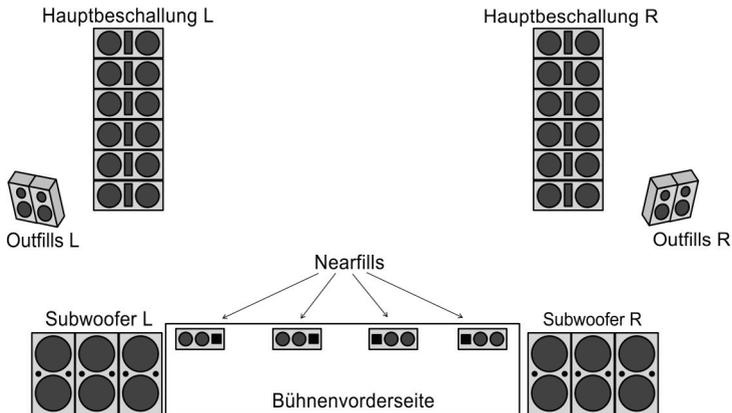


Abb. 20.5: Lautsprecher einer Konzertbesprechung

20.2.3. Monitoring

20.2.3.1. Mix vom FOH-Pult

Bei kleineren Konzerten ist es die Regel, Pre-Fader geschaltete Ausspielwege des Saalmischpultes für den Monitormix zu verwenden. Leider bleiben dann weniger Auxiliaries für Effekte. Zudem ist bei vielen Pulten der Pre-Fader-Weg nach dem EQ angeordnet, d.h. Klangregelungen für den FOH-Mix wirken sich auch auf die Monitormischung aus. Kompressoren, die für die FOH-Mischung nötig sind (z.B. auf Gesang und Bass), erhöhen im Monitorweg die Rückkopplungsgefahr. Weiterer Minuspunkt: Die Kommunikation von den Musikern zum Techniker am FOH-Platz gestaltet sich oft schwierig.³

20.2.3.2. Monitorpult

Bei großen Konzerten steht zusätzlich ein Monitormischpult auf der Bühne. Der Techniker, der dieses Pult bedient, steht im direkten Kontakt zu den Musikern und kann schnell auf deren Änderungswünsche eingehen. Da am Monitorpult alle Eingangssignale getrennt aufliegen, haben Klangänderungen am Monitormix keine Auswirkungen auf die FOH-Mischung. Zudem ist ein paralleles und schnelles Arbeiten beim Soundcheck möglich.⁴

Sämtliche Eingangssignale müssen für beide Pulte gesplittet werden. Die einfachste Variante ist eine parallele Signalverteilung über einen sog. Y-Split (Abb. 20.6). Nachteil des Y-Splits: Die Signalquellen werden von zwei parallelen Eingangswiderständen abgeschlossen, es ergibt sich dadurch eine insgesamt niedrigere Gesamteingangsimpedanz. Eventuell kann es dadurch zu einer

³ vgl. Pieper, 1996, Seite 167 und Ebner, 2002, Seite 268

⁴ vgl. Ebner, 2002, Seite 277

Fehlanpassung kommen, die zur Signaldämpfung und Höhenverlust führt. Um unerwünschte Ausgleichsströme zu vermeiden, darf die Phantomspeisung nur an einem Pult eingeschaltet sein.⁵

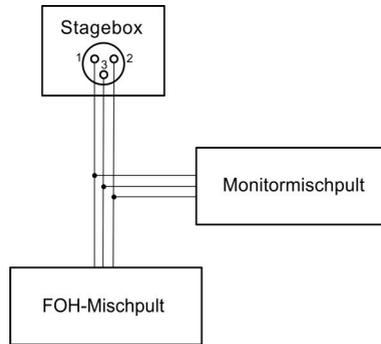


Abb. 20.6: Einfache parallele Signalverteilung (Y-Split)⁶

Um Brummschleifen zu vermeiden, sollten Trennübertrager verwendet werden. Aktive Splitter ermöglichen zudem eine Phantomspeisung für Kondensatormikrofone (Abb. 20.7). Erhältlich sind Splitter mit bis zu 24 Eingängen. Pro Weg kann es dann z.B. drei Ausgänge geben. Meistens sind die ersten beiden Ausgänge galvanisch über einen Trafo getrennt, der dritte ist ein paralleler Abgriff.

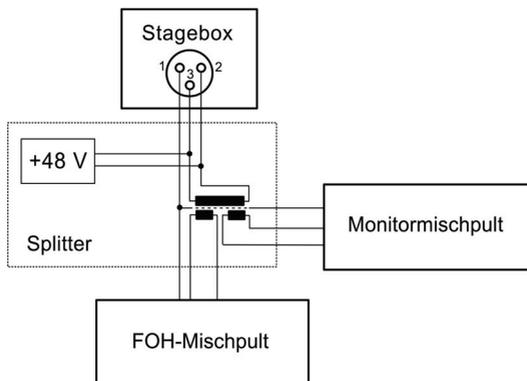


Abb. 20.7: Split über Trenntrafo und mit Phantomspeisung⁷

⁵ vgl. Pieper, 1996, Seite 171

⁶ vgl. Pieper, 1996, Seite 170

⁷ vgl. Pieper, 1996, Seite 169

20.2.3.3. Monitorlautsprecher

Wedges

Ein Wedges ist eine abgeschrägte Ausführung einer Lautsprecherbox, die auf dem Boden steht. Es gibt sie mit 12“- oder 15“-Tieftöner und mit 1“- oder 2“-Horn. Aktive Wedges haben oft einen „Slave“-Ausgang für den Anschluss einer zweiten passiven Box.⁸ Ein oder zwei Wedges werden für jeweils einen Musiker auf der Bühne eingeplant.

Problematik von Rückkopplungen: Der Lautsprecherschall sollte aus der Richtung kommen, für die das Mikrofon am unempfindlichsten ist. D.h. bei Mikrofonen mit Nierecharakteristik eine rückwärtige Positionierung der Wedges, bei Hyper- und Supernieren eine seitliche Position.

Sidefills

Sidefills sind paarweise links und rechts der Bühne abgehängt oder auf Stativen in Ohrhöhe angebracht und beschallen die komplette Bühne von beiden Seiten mit gleichem Pegel.

Drumfills

Drumfills sind Fullrange-System mit guter Basswiedergabe, damit vor allem die Kickdrum gut wiedergegeben wird. Allerdings sollte ein zu großer Anteil tiefer Frequenzen im Monitormix aufgrund der Gefahr von Rückkopplungen vermieden werden.⁹

20.2.3.4. In-Ear-Monitoring (IEM)

Beim In-Ear-Monitoring tragen die Künstler Kopfhörer oder Ohrhörer, über die sie einen individuellen Monitormix hören. Die beste Lösung sind angepasste Otoplastiken mit integrierten Ohrhörern, die als Ein-, Zwei oder Drei-Wege-System erhältlich sind (Abb. 20.8).

Neben kabelgebundenen Kopfhörerverstärker werden drahtlose IEM-Systeme im VHF-Bereich verwendet.¹⁰

Prinzipiell ist ein spezieller Mix für das IEM notwendig:

- Pegelbegrenzung durch einen Limiter (Gehörschutz!)
- Ein an die Ohrhörer angepasstes Klangbild
- Viele Künstler wünschen eine sog. „More Me“-Mischung, d.h. sie wollen ihr Instrument oder ihre Stimme lauter hören als den Rest

⁸ vgl. Pieper, 1996, Seite 172 und 173

⁹ vgl. Ebner, 2002, Seite 278

¹⁰ s. Kap. 18. „Drahtlose Tonübertragung“

- Eventuell bietet sich ein sog. Dual-Mono-Mix an. Hier ist das Mischverhältnis von zwei separaten Signalen am Empfänger einstellbar
- Zusätzliche Audience-Mikrofone für den Raumeindruck. Dies ist vor allem wichtig, wenn auf beiden Ohren geschlossene Otoplastiken getragen werden, die eine Außendämpfung bis zu ca. 25 dB haben

Vorteile des IEM: Eventuell werden keine oder zumindest weniger Monitorlautsprecher benötigt und damit reduziert sich die Bühnenlautstärke. Es gibt weniger Übersprechen in die Mikrofone und damit keine Rückkopplungen. Insgesamt verbessert sich damit auch die Transparenz der FOH-Mischung.¹¹



Abb. 20.8: Otoplastiken für InEar-Monitoring

20.3. Theaterbeschallung

Die Aufgabe einer Theaterbeschallung ist es, das Bühnengeschehen zu unterstützen. Dabei ist die Wechselwirkung mit dem Bühnenbild und der Beleuchtung zu beachten. Das Klangbild ist immer als Ganzes zu betrachten und bei Detailänderungen muss immer wieder die Gesamtwirkung überprüft werden. Die Erschaffung eines Klangbildes für eine Szenerie ist oft ein Kompromiss zwischen künstlerischem Anspruch und den technischen Möglichkeiten.¹² Schon bei der Konzeption einer Beschallungsanlage muss auf die verschiedenen Anforderungen einer bestimmten Sparte eingegangen werden.¹³

¹¹ vgl. Pieper, 1996, Seite 174

¹² vgl. Curdt, 2005, Vorlesung Sounddesign für eine Theateraufführung, Seite 5

¹³ vgl. Curdt, 2005, Vorlesung Sounddesign für eine Theateraufführung, Seite 1

Tabelle 20.1: Sparten im Theater

Sparte	Tontechnische Anforderungen (Beispiele)
Schauspiel	Geräuscheinpielungen, ev. auch Sprachverstärkung
Oper	Effekt- und Geräuscheinpielungen
Operette	Verstärkung von Gesang und manchmal auch des Orchesters
Musical	Sämtliche Schallquellen werden mikrofoniert und verstärkt
Tanztheater	Zum Beispiel Einspielung eines vorproduzierten Playbacks

20.3.1. Theatermischpulte

Spezielle Anforderungen an ein Theatermischpult:

- Mehrere VCA- oder DCA-Gruppen
- Eine Statische Automation (Szenenspeicher)
- Eventuell eine abgesetzte Bedieneinheit für die Proben, um das Klangbild an verschiedenen Plätzen im Saal beurteilen zu können
- Bei großen Produktionen oft zusätzliche Monitormischpulte und Submischer für Vormischungen
- Forderungen gemäß der DIN 15905-1 (Tontechnik in Theatern und Mehrzweckhallen): Mindestens acht Ausgänge, Ausgangspegel +6 dB_U, Ausgangsimpedanz $\leq 40 \Omega$

20.3.2. Lautsprecher für die Saalbeschallung

In Theatern ist eine fest installierte Beschallungsanlage die Regel. Übliche Konfigurationen sind hierbei:

- L/R-Hauptbeschallung mit Subwoofern und Center Cluster
- Frontfills
- Infills
- Downfills
- Oft mehrere Delay Lines (z.B. für Parkett und Ränge)
- Zusätzliches Surroundsystem

Beispiel: Beschallungsanlage in einem Theatersaal mit einem Rang (Abb. 20.9 und 20.10):

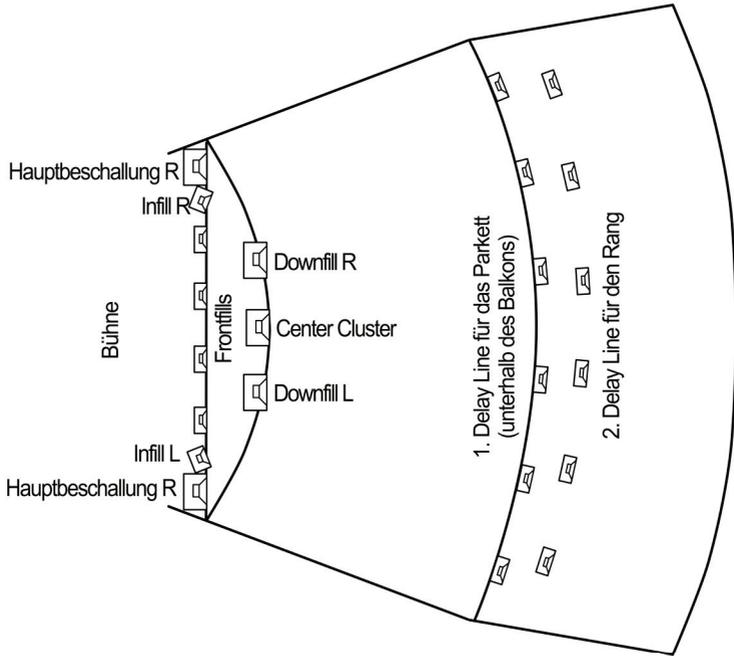


Abb. 20.9: Lautsprecher in einem Theatersaal (Draufsicht)

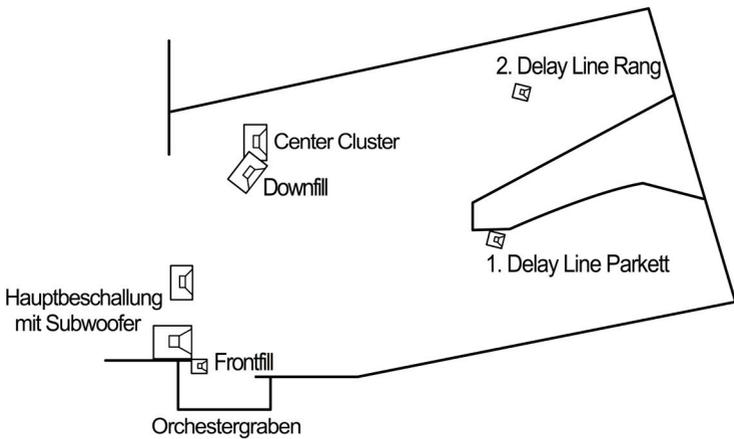


Abb. 20.10: Lautsprecher in einem Theatersaal (Seitenansicht)

20.3.3. Lautsprecher für die Bühnenbeschallung

Die Lautsprecher auf der Bühne sind oft in verschiedene Beschallungszonen eingeteilt z.B. in Downstage, Midstage und Upstage (Abb. 20.11).

Zusätzlich können Effekt-Lautsprecher für Geräuscheinspielungen in das Bühnenbild integriert werden. Ein Offstage-Monitoring in den Gassen und auf den Seitenbühnen erleichtert die Orientierung für Darsteller, die sich gerade umziehen oder auf ihren Einsatz warten.

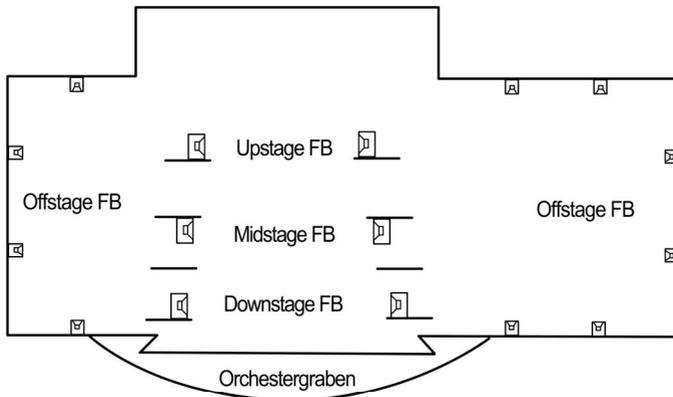


Abb. 20.11: Bühnenlautsprecher (Draufsicht)

20.3.4. Monitoring für Orchestermusiker

In Orchestergräben finden sich zunehmend sog. Personalmixer mit Kopfhörern oder IEM-Ohrhörern (Abb. 20.12).



Abb. 20.12: Personalmixer (Otztronic) unter dem Notenpult

Da diese Personalmixer nur eine begrenzte Anzahl an Kanälen haben (z.B. 16 oder 24) erfolgt eine Vormischungen von Instrumentengruppen durch ein zusätzliches Monitormischpult.

Manchmal sind auch zusätzliche Lautsprecher im Orchestergraben notwendig für die Übertragung von elektronischen Instrumenten. Keyboard-Spieler verwenden z.B. oft aktive Monitorlautsprecher in unmittelbarer Nähe ihres Instrumentes.

20.4. Einmessen von Beschallungsanlagen

20.4.1. Elektrisches Einmessen

Für Beschallungsanlagen sollten die gleichen Qualitätsanforderungen gelten wie für Studioanlagen im Rundfunk.¹⁴ Diese sind in IRT-Pflichtenheften festgelegt. Demnach können Leitungen und Anlagen überprüft werden auf:

- Durchgang und Leitungsdämpfung
- Polarität
- Symmetrie erdfreier Leitungen
- Übersprechen
- Störpegelabstand
- Korrekte elektrische Pegel
- Korrekte Schaltfunktionen in den Mischpulten
- Verzerrungsfreiheit

20.4.2. Akustisches Einmessen

Beim akustischen Einmessen werden drei Parameter aufeinander abgestimmt:

- Die Schalldruckpegelverteilung im Raum
- Der Wiedergabefrequenzgang und die Verständlichkeit an verschiedenen Hörerplätzen
- Die Rückkopplungssicherheit der Anlage

Die Messungen und Korrektoreinstellungen sollten in der Aufführungslautstärke erfolgen und noch bevor ein Soundcheck mit den Künstlern stattfinden. Andernfalls werden die Kanal-EQ der einzelnen Mikrofonwege zur Kompensation einer ungenügend eingestellten Beschallungsanlage „missbraucht“.¹⁵

¹⁴ vgl. Ahnert und Steffen, 1993, Seite 306 und 307

¹⁵ vgl. Görne, 2007, Seite 232 und 233

20.4.2.1. Schalldruckpegelverteilung

Die Messung des Schalldruckpegels erfolgt an mehreren Punkten im Raum. Das anregende Signal ist ein breitbandiges rosa Rauschen und die Messergebnisse werden mit der A-Filterkurve bewertet. Es ist möglich, ein ganzes Beschallungssystem zu messen oder auch nur einzelne Lautsprechergruppen. Die Differenz zwischen dem niedrigsten und höchsten gemessenen Schalldruckpegel sollte kleiner als 6 dB_A sein.¹⁶

20.4.2.2. Wiedergabefrequenzgang

Die Messung des Frequenzgangs erfolgt im jeweiligen Hauptversorgungsbereich der einzelnen Lautsprechergruppen. Zur Vermeidung von Fehlmessungen durch Interferenzen (z.B. aufgrund von Reflexionen von den Wänden) sind mehrere Messungen an verschiedenen Punkten im Hauptversorgungsbereich notwendig. Als Testsignal dient auch hier ein breitbandiges rosa Rauschen. Wenn das Testsignal über das Mischpult geleitet wird, ist zugleich eine Miterfassung von linearen Verzerrungen im Übertragungsweg möglich. Es werden Messgeräte mit Echtzeitanalyse eingesetzt (z.B. Meyersound SIM oder SMART). Die bei der Messung angezeigten Überhöhungen und Absenkungen im Frequenzgang werden durch inverse Filterkurven in den System-EQs ausgeglichen.¹⁷

20.4.2.3. Rückkopplung

Rückkopplung im technischen Sinn bedeutet, dass das Ausgangssignal eines Verstärkersystems wieder auf den Eingang des Systems geführt wird. Spricht man in der Akustik von Rückkopplung, so meint man die Mitkopplung im System Mikrofon-Verstärker-Lautsprecher (Abb. 20.13).

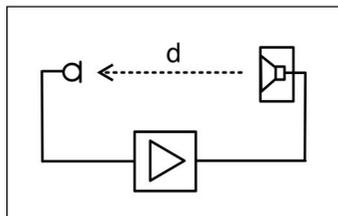


Abb. 20.13: Akustische Rückkopplung

Damit es zur Rückkopplung kommt, müssen folgende Bedingungen erfüllt sein:¹⁸ Die Verstärkung muss größer als 1 sein und die Phasenverschiebung muss ein ganzzahliges Vielfaches von 360° sein. Phasenverschiebungen treten durch Filter und EQ auf, aber auch durch die Laufzeit des Schalls.

¹⁶ vgl. Ahnert und Steffen, 1993, Seite 309 und Fasold und Veres, 2003, Seite 152

¹⁷ vgl. Ahnert und Steffen, 1993, Seite 312

¹⁸ vgl. Ebner, 2002, Seite 265

Berechnung von Koppelfrequenzen:¹⁹

$$f_n = n * \frac{c}{d} \quad (\text{Formel 20.2})$$

f_n : Koppelfrequenz

n : beliebige ganze Zahl (1, 2, 3, ...)

c : Schallgeschwindigkeit

d : Abstand Mikrofon – Lautsprecher

Die Koppelfrequenzen sind also vom Schallweg und der Schallgeschwindigkeit abhängig. Die Schallgeschwindigkeit ändert sich wiederum mit der Temperatur und Luftfeuchtigkeit. Das bedeutet, dass sich die Koppelfrequenzen verändern, wenn:

- d sich ändert (bewegtes Mikrofon):
 - Kleine Distanz = hohe Koppelfrequenz
 - Große Distanz = tiefe Koppelfrequenz
- c sich ändert:
 - Publikum erwärmt den Raum = Höhere Koppelfrequenz

Vermeidung von Rückkopplungen

Zuerst erfolgt eine Analyse durch Messverfahren wie beim Wiedergabefrequenzgang oder einfacher und schneller ist die Erfassung durch das Gehör. Anschließende Gegenmaßnahmen: Den Pegel reduzieren, Mikrofone mit Richtwirkung einsetzen, Mikrofon näher an die Schallquelle bringen, Koppelfrequenzen mit schmalbandigen Filtern dämpfen.²⁰

20.4.2.4. Messung der Sprachverständlichkeit

Eine Messung der Sprachverständlichkeit wird oft nur bei großen und umfangreichen Festinstallationen vorgenommen. Hier daher nur ein kurzer Überblick verschiedener Messverfahren:²¹

Silbenverständlichkeit

Hörtest mit Versuchspersonen; Wiedergabe von Prüfsilben (Logatomen) über die Beschallungsanlage. Die Zuhörer schreiben auf, was verstanden wurde. Werden z.B. von 100 Logatomen 64 richtig erkannt, ergibt das eine Silbenverständlichkeit

¹⁹ Quelle für die Formel: Weinzierl, 2008, Seite 506

²⁰ vgl. Ahnert und Steffen, 1993, Seite 316

²¹ vgl. Ahnert und Steffen, 1993, Seite 330 und Ahnert und Reichardt, 1981, Seite 60ff

von 64%. Als sehr gut gelten 90% und mehr. 80% wären noch gut und unter 30% ist als sehr schlecht zu bewerten.

Articulation Loss of Consonants (Al_{Cons})

Der Al_{Cons}-Wert Gibt als Prozentsatz wieder, wie viele (Test-)Worte bzw. Konsonanten nicht richtig verstanden wurden.²² Mit Hilfe der folgenden Formel lässt sich der Wert auch berechnen.²³

$$Al_{Cons} \approx 0,65 * \left(\frac{s}{r_H} \right)^2 * RT_{60} \quad [\%] \quad (\text{Formel 20.3})$$

s : Entfernung Schallquelle – Zuhörer [m]

r_H : Hallradius [m]

RT₆₀ : Nachhallzeit [s]

Tabelle 20.2: Auswertung der Al_{Cons}-Werte

< 5%	Ausgezeichnete Verständlichkeit
5 bis 10%	Gute Verständlichkeit
10 bis 15%	Ausreichende Verständlichkeit
> 15%	Unbrauchbare Verständlichkeit

Speech Transmission Index (STI)

Für den STI werden insgesamt 98 Einzelmessungen mit unterschiedlichen Modulationsfrequenzen durchgeführt. Aus der Abnahme des Amplitudenmodulationsgrades jedes Messwertes wird dann der STI berechnet.

Rapid Speech Transmission Index (RASTI)

Die Ermittlung eines RASTI erfolgt als Echtzeitmessungen mit speziellen Messgeräten und Analyseprogrammen z.B. von Brüel & Kjaer.

20.4.3. Subjektive Kontrolle

Wichtig neben allen objektiven Messmethoden ist immer auch die anschließende subjektive Überprüfung des Klangbildes an verschiedenen Hörerplätzen.

Das Klangbild muss an das dramaturgische Gesamtbild angepasst werden und eine gute Möglichkeit dafür bieten die Proben mit den Originalschallsignalen. Nicht zu vergessen ist auch die anschließende Kontrolle während der Aufführung mit Zuschauern im Saal.

²² vgl. ZVEI, 1999, Seite 35

²³ Quelle für die Formel: Fasold und Veres, 2003, Seite 150

20.5. Installations- und Beschallungspläne

20.5.1. Bühnenanweisungen

Die einfachste Art eines „Beschallungsplans“ dürfte die Bühnenanweisung (engl.: Technical Rider) sein. Eine Bühnenanweisung gehört zum Anhang eines Konzertvertrages und ist damit ein fester Bestandteil dieses Vertrages. Von der Band bzw. deren Techniker werden die Anforderungen an Bühnen-, Licht- und Tontechnik aufgelistet, die der Veranstalter zu erbringen hat. Bei einem Auftritt in einem kleinen Club mit ca. 200 Zuschauern sind die technischen Anforderungen andere als bei einem Konzert in einer Halle mit 2000 Zuschauern. Deshalb sind verschiedene Bühnenanweisungen für unterschiedliche Auftrittsorte bzw. Zuschauerzahlen sinnvoll. Es folgen einige konkrete Beispiele für den Inhalt einer Bühnenweisung.

Anforderungen an den Bühnenaufbau:

- Fest verbundene, waagrecht montierte Bühnenelemente
- Abmessungen der Spielfläche (z.B. mindestens 6 x 4 m)
- Abmessungen eines Schlagzeugpodestes (z.B. 2 x 2 m)
- Mindestbelastbarkeit der Bühne (z.B. 250 kg/m²)
- Sicherheitsanforderungen gemäß der Berufsgenossenschaftlichen Verordnungen (BGV) und Versammlungsstättenverordnung (VstVO) müssen eingehalten werden

Strom:

- Anzahl und Absicherung der Anschlüsse (z.B. auf der Bühne zweimal 32A CEE und am FOH-Platz einmal 32A CEE)
- Installation gemäß den VDE-Bestimmungen
- Der Zugang zum Sicherungskasten muss gewährleistet sein

FOH-Platz:

- Abmessungen und Standort (z.B. 3 x 3 m, mittig vor der Bühne im hinteren Drittel des Saales)
- Absperrungen z.B. durch Drängelgitter
- Regenschutz für den FOH-Platz bei Open-Air-Konzerten

Mischpult:

- Kanalbelegung (Welche Mikrofone auf welchen Kanal?)
- Effektgeräte (Belegung der Ausspielwege und Inserts)

„Dynamite Rockers“: Tontechnische Bühnenanweisung

Anforderung für eine Halle mit ca. 500 Zuschauern

Mischpultbelegung:

Kanal	Signal	Quelle	Insert	Bemerkungen
1	Kick	Shure SM91B	Comp. & Gate	
2	Kick	Shure e602	Comp. & Gate	Kleines Stativ
3	Snare von oben	Shure SM57	Gate	Kleines Stativ
4	Snare von unten	Shure SM57	Gate	Kleines Stativ
5	HiHat	Neumann KM140		
6	Tom 1	Electro Voice ND408A	Gate	
7	Tom 2	Electro Voice ND408A	Gate	
8	Tom 3	Electro Voice ND408A	Gate	
9	Ride	Neumann KM140		
10	OH L	Neumann KM140		
11	OH R	Neumann KM140		
12	Bass	DI-Box	Comp.	
13	Guitar 1	Sennheiser e606		
14	Guitar 2	Sennheiser e606		
15	Keyboard L	DI-Box		
16	Keyboard R	DI-Box		
17	Leslie oben L	Shure SM57		
18	Leslie oben R	Shure SM57		
19	Leslie unten	Sennheiser MD421		Kleines Stativ
20	Lead Singer	Shure Beta 87	Comp.	
21	Back Vocal 1	Shure Beta 87	Comp.	
22	Back Vocal 2	Shure Beta 87	Comp.	
23				
24	Talkback	SM58 mit Schalter		
25 & 26	Vox Reverb L/R	PCM 81 (1)		Send = Aux 5 Post Fader
27 & 28	Room L/R	PCM 81 (2)		Send = Aux 6 Post Fader
29 & 30	Tap-Delay L/R	SPX 990		Send = Aux 7 Post Fader
31 & 32	FX L/R	SPX 1000		Send = Aux 8 Post Fader

Monitormix:

Pre-Fader Auxiliary	Mix für wen?	Lautsprecher / IEM	Wo?
1	Drums	1x Drumfill	Drumriser
2	Guitars & Bass	3x Wedge	2x Stage Left, 1x Stage Right
3	Keyboard	1x Wedge	Stage Right
4	Lead Vox	InEar Lead Singer	InEar-Sender nahe der Bühne

Für alle Monitorwege sind graphische Terzband-EQ's vorzusehen.

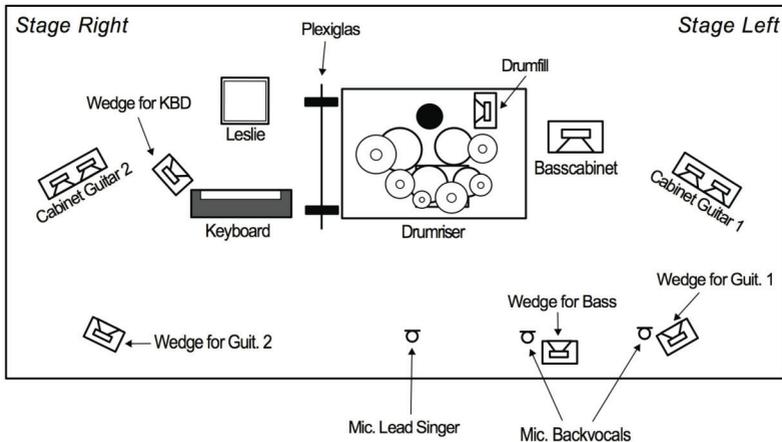
Mischpult Minimalanforderungen:

- 32 Kanäle
- 8 Subgruppen
- Stereosumme
- 8 Ausspielwege (4 Pre Fader / 4 Post Fader)

Abb. 20.14: Beispiel Bühnenanweisung (erste Seite)

Siderack FOH:

- 3x zweikanaliger Kompressor
- 3x zweikanaliges Gate
- 1x SPX 990 (oder Delay mit Tap-Taster)
- 1x SPX 1000
- 2x PCM 81
- CD-Player

Aufteilung der Bühne:**Bühne:**

Die Bühne muss den Vorschriften der BGV C1 entsprechen.

Mindestgröße: 8m x 6m

Drumriser: 3m x 2m (Höhe 20 cm)

Strom:

Es sind für die Tontechnik auf der Bühne und am FOH-Platz ausreichende und vom Lichtstromnetz getrennte Stromanschlüsse vorzusehen.

Mikrofonstative:

15 Stative, davon 4 in kleiner Ausführung. Bevorzugt Tellerstative.

Alle Stative im einwandfreien Zustand; d.h. alle Schrauben sollten ohne Werkzeug zu benutzen sein.

PA und Monitor-Lautsprecher:

Voll funktionsfähiges, dem Raum entsprechend dimensioniertes Beschallungssystem.

Vorzugsweise d&b audiotechnik, Nexo oder Meyer Sound.

Abb. 20.15: Beispiel Bühnenanweisung (zweite Seite)

20.5.2. Beschallungspläne

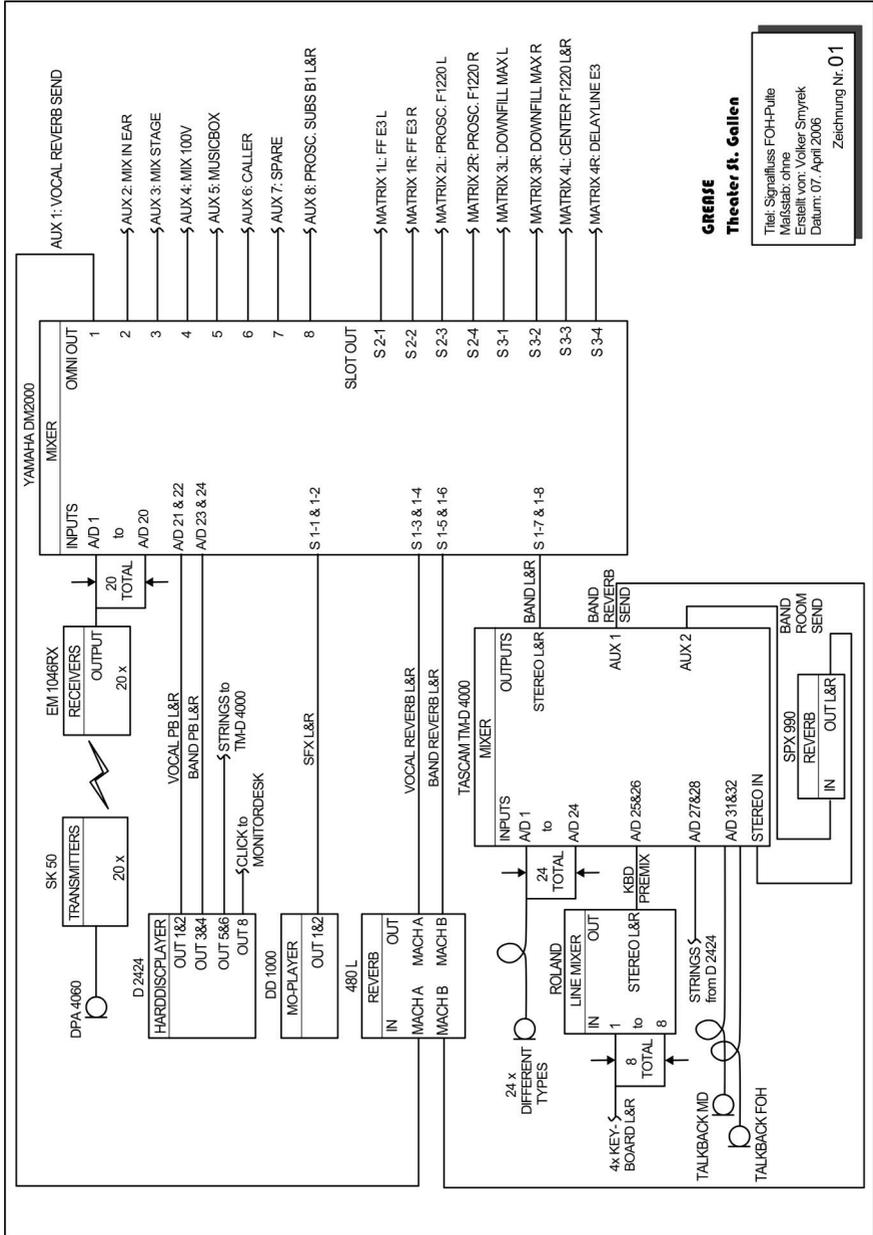
Bei größeren Veranstaltungen oder beim Einrichten von fest installierten Beschallungsanlagen wird eine einfache Bühnenanweisung nicht mehr ausreichen. Vielmehr wird hier ein detaillierter Beschallungsplan erstellt. Dieser sollte dann alle Informationen enthalten, die nötig sind ein System schnell und sicher aufzubauen und fehlerfrei zu Betreiben.

Beschallungsplan für ein Musical

Manche Sound Designer schreiben regelrechte Handbücher, besonders für große Produktionen, die Ensuite gespielt werden, d.h. bei Aufführungen über mehrere Monate oder Jahre an einem festen Spielort. Die tontechnische Dokumentation ist demnach also sehr umfangreich und beinhaltet zum Beispiel:

- Signalflusspläne als Blockschaltbilder
- Kabel- und Anschlusslisten
- CAD-Zeichnungen mit den Positionen und Ausrichtung der Lautsprecher
- Einen Mikrofonierungsplan, eventuell auch mit Bildern oder Skizzen von der genauen Position der Mikrofone
- Aufzeichnungen zu den Einstellungen des Mischpultes und der Effektgeräte
- Eine Cue-Liste und ein kommentiertes Skript für den Operator am Mischpult

Als Beispiel folgt ein kleiner Ausschnitt aus der Dokumentation des Sound Designs des Musicals „Grease“, das 2006 im Theater St. Gallen aufgeführt wurde.



GREISE
Theater ft. Gallen
 Titel: Signalfuss FOH-Pulte
 Metallstab: ohne
 Erstellt von: Volker Sinyek
 Datum: 07. April 2006
 Zeichnung Nr. 01

Abb. 20.16: Beispiel Signalfussplan

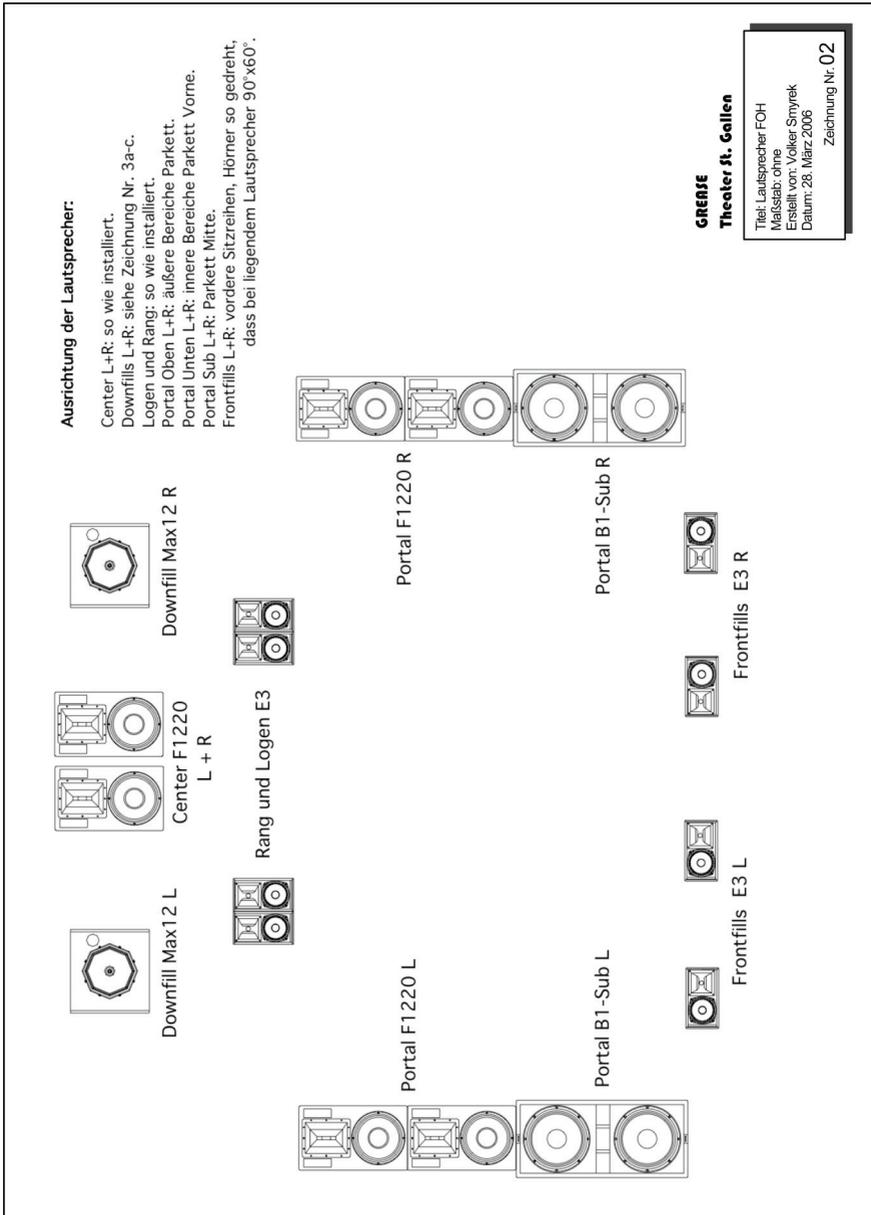


Abb. 20.17: Beispiel Lautsprecher FOH

Tabelle 20.3: Beispiel Kanalbelegung

TASCAM TM-D 4000			
Layer #	A/D #	Signal	Source
1	1	Kick	D112
	2	Snare upper	SM57
	3	Snare lower	SM57
	4	HiHat	MKH40
	5	OH L	MKH40
	6	OH R	MKH40
	7	Tom Tom 1	D4
	8	Tom Tom 2	D4
	9	Floor Tom	D6
	10	E-Bass 1	DI
	11	E-Bass 2	DI
	12	E-Bass 3	DI
	13	E-Guitar 1	e509
	14	E-Guitar 2	POD Line
	15	KBD 1 L	DI
	16	KBD 1 R	DI
TASCAM TM-D 4000			
Layer #	A/D #	Signal	Source
2	17	Trumpet	MD421
	18	Trombone	MD421
	19	Sax 1	MD421
	20	Sax 2	e602
	21	Percussion 1	ND468
	22	Percussion 2	KM140
	23	Percussion 3	MKH40
	24	Percussion 4	MKH40
	25	KBD 2 L	PreMixer L
	26	KBD 2 R	PreMixer L
	27	Strings L	D2424 Out 5
	28	Strings L	D2424 Out 6
	29	-	-
	30	-	-
	31	Talkback MD	SM58 (Switch)
	32	Talkback FOH	SM58 (Switch)

Tabelle 20.4: Beispiel Ausspielwege

YAMAHA DM2000				
Aux #	Mix	Out	To	Remarks
1	Vocals	Omni 1	Lexicon 480 In A	Insert: Compressor
2	Vocals Playback	Omni 2	Monitordesk	InEar
3	Band	Omni 3	Monitordesk	Stage
4	Band	Omni 4	100V	Stage
5	SFX	Omni 5	Musicbox	Only in Cue #31
6	Caller	Omni 6	Callerdisk	-
7	-	Omni 7	-	Spare
8	Band	Omni 8	Prosc. Subs B1	Mono to L&R

Tabelle 20.5: Beispiele Busse

YAMAHA DM2000			
Bus #	Signal	Delay	Localisation
1	Principal Vocals & Vox Rev L	-	Center
2	Principal Vocals & Vox Rev R	-	
3	Ensemble Vocals A.1	0 ms	Left
4	Ensemble Vocals A.2	1,90 ms	
5	Ensemble Vocals B.1	11,90 ms	Right
6	Ensemble Vocals B.2	10,00 ms	
7	Band & Band Rev L	-	Center
8	Band & Band Rev R	-	

Tabelle 20.6: Beispiel Matrix-Mischung

	Frontfills L	Frontfills R	Prosc. L	Prosc. R	Downfill L	Downfill R	Center	Delay Line
	Out 1L	Out 1R	Out 2L	Out 2R	Out 3L	Out 3R	Out 4L	Out 4R
Bus 1	-12 dB	-	0 dB	-	0 dB	-	-1,5 dB	-1,5 dB
Bus 2	-	-12 dB	-	0 dB	-	0 dB	-1,5 dB	-1,5 dB
Bus 3	-15 dB	-	0 dB	-	0 dB	-	0 dB	0 dB
Bus 4	-	-15 dB	-	0 dB	-	0 dB	-	-
Bus 5	-15 dB	-	0 dB	-	0 dB	-	-	-
Bus 6	-	-15 dB	-	0 dB	-	0 dB	0 dB	0 dB
Bus 7	-20 dB	-	-3 dB	-	-3 dB	-	-9 dB	-9 dB
Bus 8	-	-20 dB	-	-3 dB	-	-3 dB	-9 dB	-9 dB

Tabelle 20.7: Beispiel Multicore-Belegung

Multicore Receiver City to FOH-Desk		
Line #	Source	Destination
1	RF-01 DANNY	DM 2000 A/D 1
2	RF-02 ROGER	DM 2000 A/D 2
3	RF-03 KENICKIE	DM 2000 A/D 3
4	RF-04 SONNY	DM 2000 A/D 4
5	RF-05 DOODY	DM 2000 A/D 5
6	RF-06 EUGENE	DM 2000 A/D 6
7	RF-07 VINCE	DM 2000 A/D 7
8	RF-08 SPARE (GOD)	DM 2000 A/D 8
9	RF-09 SANDY	DM 2000 A/D 9
10	RF-10 MARTY	DM 2000 A/D 10
11	RF-11 FRENCHY	DM 2000 A/D 11
12	RF-12 JAN	DM 2000 A/D 12
13	RF-13 RIZZO	DM 2000 A/D 13
14	RF-14 CHA CHA	DM 2000 A/D 14
15	RF-15 PATTY	DM 2000 A/D 15
16	RF-16 LYNCH	DM 2000 A/D 16
17	RF-17 ENSEMBLE M1	DM 2000 A/D 17
18	RF-18 ENSEMBLE M2	DM 2000 A/D 18
19	RF-19 ENSEMBLE F1	DM 2000 A/D 19
20	RF-20 ENSEMBLE F2	DM 2000 A/D 20

Tabelle 20.8: Beispiel Einspielungen

Clicktracks D2424					
PGM #	Title	Track 1&2	Track 3&4	Track 5&6	Track 8
1	Alma Mater	Vocals	-	-	Click
2	Summer Nights	-	-	-	Click
3	Summer N. Playout	-	-	-	Click
4	Magic Changes	-	-	-	Click
5	WAXX-Jingle 1	-	Jingle	-	-
6	WAXX-Jingle 2	-	Jingle	-	-
7	Greased Lightnin'	Vocals	-	-	Click
8	Greased L. Reprise	Vocals	-	-	Click
9	We Go Together	Vocals	-	-	Click
...					
13	Sandy	-	-	Strings	Click
...					
17	Drive-In Movie	-	SFX	-	Click

- 3 -

Cue 04 **Alma Mater 2**

A = Male, B = Female, C = Vocal PB, D = Others Ensemble
(Der letzte Ton geht über in die Instrumentalversion der Originalfassung von „We Go Together“, während sich nach und nach die Fotos als Jalonise heben und man dahinter die realen Hauptfiguren der Show sieht: MARTY, ROGER, RIZZO, FRENCHY, DOODY, JAN, KENCKIE, SONNY, SANDY und DANNY stehen in der selben Pose wie ihre älteren Alter Egos, die nun langsam nach unten verschwinden. Jeder der Protagonisten ruft seinen Namen, Choreographie, während der sich der Zwischenvorhang „2006“ hebt.)

A, B, C
ALLE:

WE GO TOGETHER
LIKE RAMA LAMA LAMA
KADINGA DE DING E DONG!
REMEMBERED FOREVER
AS SHOOBOP SHIA WADDA WADDA
YIPPTY BOOM DE BOOM
CHANG CHANG CHANGITY CHANG SHOO BOP
THAT'S THE WAY IT SHOULD BE!

+ D

WE'RE FOR EACH OTHER LIKE
A WOP BA – BA LU MOP A WOP BAM BOOM
JUST LIKE MY BROTHER IS
SHAS-NA- NA-NA-NA-NA-NA-NA
YIPPTY DIP DE DOOM
CHANG CHANG CHANGITY CHANG SHOO BOP
THAT'S THE WAY IT SHOULD BE
THAT'S THE WAY IT SHOULD BE
THAT'S THE WAY IT SHOULD BE
OH YEAH!

Cue 05 **Szene 2a – 2b**

Applaus. Im Playoff gehen alle anseer. SONNY und ROGER ab.

SZENE 2:
(Während der folgenden Szenen betreten alle Schüler nach und nach die Bühne, um in das Schulgebäude zu gehen.)

Szene 2a:
(ROGER und SONNY beim schwarzen Brett.)

4 SONNY *(seufzt) Oh nein!! Ich hab schon wieder die alte Lynch in Englisch!! Ich halt's nicht aus!*

2 ROGER *Du hast es nicht anders verdient!*

4 SONNY *Halt's Maul, langes Elend!*

- 4 -

2 ROGER *(lachend) Und hat dich dein Vater heute Morgen wenigstens wieder ordentlich verprügelt?*

4 SONNY *Klar, macht er jedes Jahr zu Schulanfang. Damit ich aufwache.*

2 ROGER *Kluger Mann, der kennt sich aus.*

(Sie studieren weiter das schwarze Brett)

Szene 2b:
(Lichtwechsel, DOODY und FRENCHY treten von SL auf.)

DOODY *Frenchy, jetzt sind wir ja doch schon ein ganzes Jahr zusammen und drum finde ich, dass es...doch eigentlich kein Problem wäre...wenn wir auch mal andere Leute...treffen...würden...weil...dann wissen wir nachher ganz sicher, dass wir nur uns lieben und...also, nicht, dass es da jetzt irgendeinen Zweifel gäbe...oder?*

11 FRENCHY *(nach einer kurzen Pause) Ich find, das ist eine saublere Idee.*

5 DOODY *(erleichtert) Genau. Vergiss es. Das ist ja saublod!*

(FRENCHY geht SF ab, DOODY bleibt sitzen)

Cue 06 **Szene 2c**

Szene 2c:
(Lichtwechsel, SONNY und ROGER beim schwarzen Brett.)

4 SONNY *Also, ich weiß nicht, wie ich unter den Voraussetzungen das letzte Schuljahr überstehen soll!*

2 ROGER *Wie kommst du drauf, dass es dein letztes ist?*

4 SONNY *Freiwillig geh ich hier nicht in die Verlängerung.*

2 ROGER *Bei deinen Noten geht das ganz von alleine.*

4 SONNY *Wieso? In Bis hab ich 'ne Eins – zumindest im praktischen Teil *(macht innotmäßige Geräusche)*.*

(KENCKIE tritt SF auf)

3 KENCKIE *(zu SONNY) Na, immer am Üben, was?*

4 SONNY *H! Kenicksle!*

2 ROGER *Ja, wen haben wir denn da?*

Abb. 20.18: Beispiel Mischerskript (Auszug)

20.5.3. Signalflusspläne nach dem Sound Graphics Standard

Das United States Institute for Theatre Technology (USITT) definiert in seinem Sound Graphics Standard Richtlinien für die graphische Darstellung von Zeichenelementen für Signalflusspläne. Ein PDF-Dokument mit der ausführlichen Beschreibung des Sound Graphic Standards unter folgendem Link abgerufen werden (Letzter Seitenaufruf Oktober 2008):

http://www.usitt.org/commissions/sound/Documents/070123_USITT_Sound_Graphics_Standards_DRAFT.pdf

Ein Diagramm für den Signalfluss liest sich von links nach rechts. Links sind die Signalquellen und rechts die Signalsenken. Ein grundlegendes Zeichenelement ist ein beliebiges Audiogerät, welches vereinfacht als rechteckiger Block dargestellt wird (engl.: Device Block). Neben den Beschriftungen der Ein- und Ausgänge wird zusätzlich der Name bzw. die Typenbezeichnung über dem Block angefügt (Abb. 20.19).

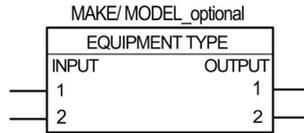


Abb. 20.19: Audiogerät
Bildquelle: USITT, 2007, Seite 2

Verbindungen zwischen zwei Geräten werden dann wie in Abb. 20.20 gezeichnet:

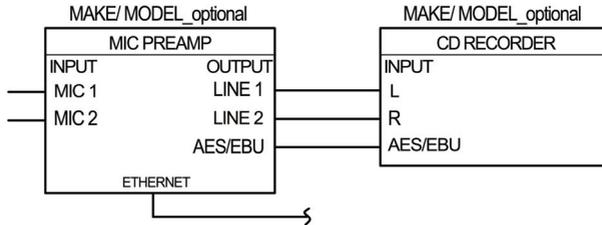


Abb. 20.20: Verbindung zwischen zwei Geräten
Bildquelle: USITT, 2007, Seite 2

Zusätzlich können auch die Art des Kabels und die Steckertypen beschriftet werden (Abb. 20.21):

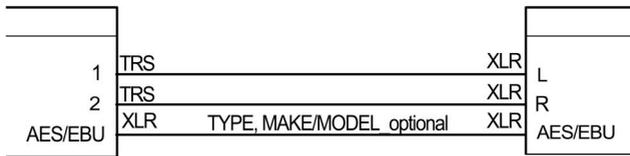


Abb. 20.21: Beschriftung der Verbindungen
Bildquelle: USITT, 2007, Seite 3

Mehrere Leitungen bzw. Ein- und Ausgänge können mit einer Klammer zusammengefasst werden wie in Abb. 20.22. Eine runde Klammer steht dabei für einen Multipin-Stecker eines Multicores. Eine eckige Klammer bedeutet, dass einzelne Leitungen zusammengebunden sind (Kabelpeitsche).

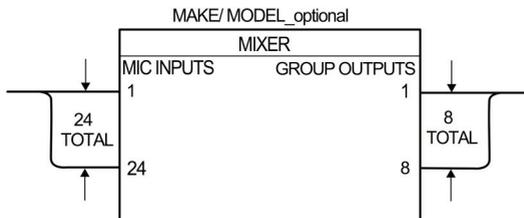


Abb. 20.22: Zusammengefasste Leitungen
Bildquelle: USITT, 2007, Seite 3

Ein Audiosteckfeld kann wie in Abb. 20.23 gezeichnet werden:

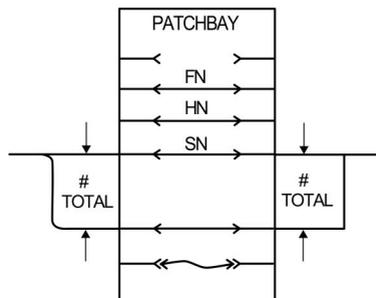


Abb. 20.23: Steckfeld
Bildquelle: USITT, 2007, Seite 4

Erläuterung der Steckfeldbeschriftungen:

- FN (Fully Normalled) = Vollnormalisiert. Die Anschlüsse in der oberen und unteren Reihe (Aus- und Eingänge) sind miteinander verbunden. Bei Verwendung von Klinkenbuchsen haben beide Anschlüsse eine Trennklinke
- SN (Sleeve Normalled). Im Prinzip dieselbe Funktion wie bei vollnormalisierten Klinkenbuchsen, allerdings wird hier nicht nur der Tip und der Ring getrennt, sondern zusätzlich auch die Masse. Dies kann sinnvoll sein, um Brummschleifen zu verhindern
- HN (Half Normalled) = Halbnormalisiert. Nur die untere Eingangsbuchse ist als Trennklinke ausgeführt. Der Ausgang in der oberen Reihe kann als paralleler Split abgegriffen werden
- NN (No Normals) = Offen bzw. nicht normalisiert. Keine Verbindung von Ein- und Ausgang

Abb. 20.24 zeigt Darstellungen von Leistungsverstärkern mit unterschiedlicher Beschaltung (Stereo, Parallel Mono und Bridged):

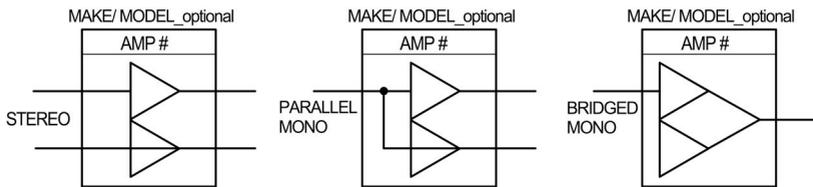


Abb. 20.24: Stereo-Leistungsverstärker
Bildquelle: USITT, 2007, Seite 6

Die Symbole für passive und aktive Lautsprecher sehen aus wie in Abb. 20.25:

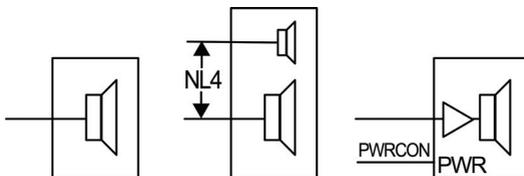


Abb. 20.25: Passiver LS, passiver Zweigege-LS und aktiver LS
Bildquelle: USITT, 2007, Seite 7

Darstellung von Mikrofonen und Mikroports (Abb. 20.26 und 20.27):

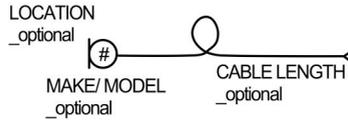


Abb. 20.26: Kabelgebundenes Mikrofon
Bildquelle: USITT, 2007, Seite 7

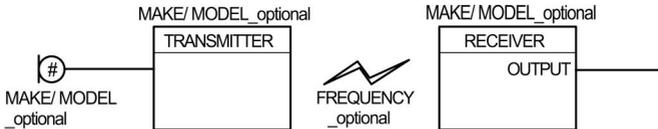


Abb. 20.27: Mikroport
Bildquelle: USITT, 2007, Seite 7

Zusätzlich können auch die Mikroport-Antennen eingezeichnet werden (Abb. 20.28):

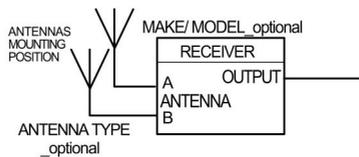


Abb. 20.28: Empfangsantennen
Bildquelle: USITT, 2007, Seite 7

Es finden sich in diesem Buch zwei Beispiele von einfachen Schaltbildern, welche mit USITT-Symbolen erstellt wurden: Die Abb. 18.14 im Kapitel 18 „Drahtlose Tonübertragung“ und Abb. 20.16 in diesem Kapitel.

20.6. Übungsaufgaben

Aufgabe 1:

Es wurde in diesem Handbuch schon mehrfach angesprochen, dass Delay-Lautsprecher ein verzögertes Signal in Bezug auf die Hauptbeschallung erhalten müssen. In der Regel werden aber auch die Lautsprecher der Hauptbeschallung (und alle anderen Systeme) verzögert. Warum?

Aufgabe 2:

Welche Faktoren bestimmen die Koppelfrequenzen bei einer Beschallungsanlage?

Aufgabe 3:

Im Foyer eines Theaters findet die Produktpräsentation einer Versicherung statt. Zeichne mit USITT-Symbolen einen Signalflussplan für die Beschallungsanlage mit folgenden Komponenten:

- Zwei drahtlose Mikrofone Ansteckmikrofone (Mikrofon DPA 4060 mit Sennheiser-Sender SK5012 und Empfänger 3532, Sendefrequenzen: 799,200 und 810,400 MHz)
- Zwei drahtgebundene Mikrofone auf Stativ an einem Rednerpult (Schoeps CMC5)
- Ein CD-Player
- Ein Laptop mit Stereo-Soundkarte. Der Anschluss an das Mischpult erfolgt über eine zweikanalige DI-Box
- Mischpult: DDA CS-3
- Die Stereo-Ausgänge des Pultes gehen auf die Hauptbeschallung: Zwei passive Lautsprecher Meyer Sound UPA-1 mit den entsprechenden Controllern Typ M1A und Yamaha H5000-Verstärkern
- Aux 1 geht auf einen aktiven Subwoofer (Meyer Sound USW-1P)
- Aux 2 geht auf einen aktiven Monitorlautsprecher (Meyer Sound USM-1P)



Literaturtipps:

Ahnert, Wolfgang und Steffen, Frank: Beschallungstechnik.
Stuttgart: Hirzel Verlag.

Pieper, Frank: Das P.A. Handbuch.
München: Gunther Carstensen Verlag.

21. Medieneinsatz



Der Einsatz von Bild-, Ton- und Datenmedien und der Anschluss an Netze ist ein Thema im dritten Lehrjahr.

21.1. Prinzipieller Aufbau eines Computers

Die einzelnen Baugruppen auf der Hauptplatine (engl.: Mainboard) eines Computers sind durch Datenbusse miteinander verbunden. Abb. 21.1 zeigt die Bus-Architektur eines Rechners am Beispiel eines Mainboards mit PCI- und PCI-Express-Bussen:

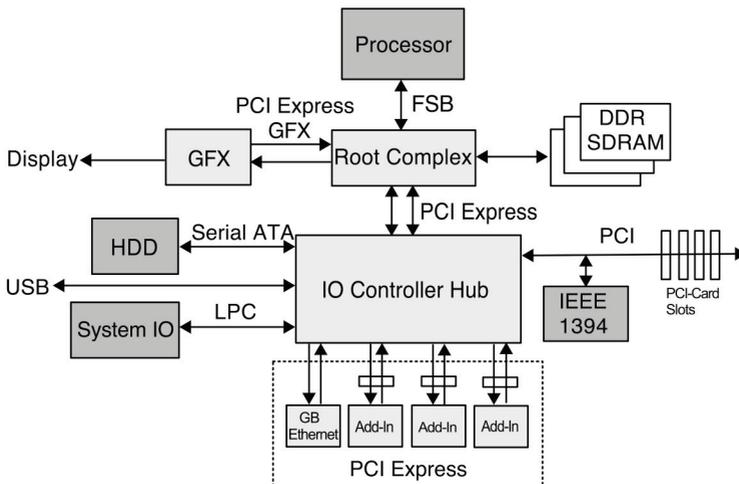


Abb. 21.1: Bus-Architektur eines Mainboards
Bildquelle: Scantec, <http://www.scantec.de>

- Processor: Wird auch kurz CPU (Central Processor Unit) genannt
- FSB = Front Side Bus; Interner Datenbus) zwischen CPU und dem Root Complex
- Root Complex: Umsetzung der CPU-Befehle für den PCI-Express-Bus
- GFX = Graphics-Interface; Die Grafikkarte wandelt die Daten für die Darstellung auf einem Monitor oder einen Projektor. Anschlüsse: VGA (Video Graphics Array) und/oder DVI (Digital Visual Interface). Bei Grafikkarten für professionelle Videobearbeitung können auch Anschlüsse für RGB-, oder Y/C-Video vorhanden sein¹

¹ s. Kap. 22.1. „Videosignale“

- DDR SDRAM = Double Data Rate Synchronous Dynamic Random Access Memory; Arbeitsspeicher des Computers
- IO Controller Hub: Verbindung zwischen verschiedenen Komponenten auf der Hauptplatine in einer sternförmig orientierten Struktur (I = Input; O = Output)
- PCI = Peripheral Component Interconnect; Datenbus der Steckplätze für PCI-fähige Karten, z.B. Netzwerk- und Soundkarten
- PCI Express: Nachfolgestandard des PCI-Busses mit höherer Datenübertragungsrate
- Serial ATA = Serial Advanced Technology Attachment; Datenbus zwischen dem Prozessor und der Festplatte
- HDD = Hard Disc Drive; Festplatte
- USB = Universal Serial Bus; Zum Anschluss externer Geräte
- IEEE 1394: Firewire Interface zum Anschluss externer Geräte
- LPC = Low Pin Count; Interface für weitere Komponenten auf dem Mainboard, z.B. Management der Lüftergeschwindigkeit oder der Daten der Tastatur und Maus
- System IO: Physikalische Anschlüsse für die Ein- und Ausgabemedien, d.h. Tastatur und Maus

21.2. Anschluss an Netze

21.2.1. Netz-Topologien

Netz-Topologien werden unterschieden zwischen...

1. Physikalische Topologie = Struktur der Verbindung zwischen mehreren Computern
2. Logische Topologie = Beschreibung des Datenflusses zwischen den Computern

21.2.1.1. Physikalische Topologien

Bus-Topologie (engl.: Daisy Chain)

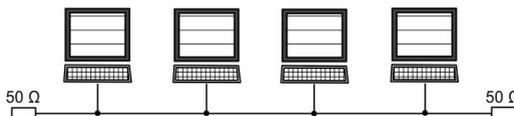


Abb. 21.2: Bus-Topologie

Hier sind alle Geräte in Reihe an ein Hauptkabel angeschlossen (Abb. 21.2). Es kann allerdings immer nur ein Teilnehmer Daten senden, die anderen sind

während dessen blockiert. Die Datenübertragung erfolgt nach dem Prinzip „Carrier Sense Multiple Access / Collision Detection“, kurz: CSMA/CD. Die Netzwerkteilnehmer erkennen eine Kollision von Daten am Signalpegel. Der nächstliegende Teilnehmer einer Datenkollision sendet ein spezielles Signal, den sog. Jam-Block, welcher allen anderen Teilnehmern diese Störung mitteilt. Alle Teilnehmer stellen jetzt das Senden von Daten ein. Nach Ablauf einer gewissen Zeit (unterschiedlich und zufällig) fangen die Netzwerkteilnehmer wieder an zu senden.²

Bei Ausfall eines Teilnehmers hat dies keine Auswirkung auf das Netz, wird aber der Bus unterbrochen, dann hat das den Ausfall des ganzen Netzes zur Folge.

Abschlusswiderstände an den Bus-Enden: Bei Verwendung eines Koaxial-Netzwerkkabels kommt es ohne Terminierung zur Reflexion am Kabelende aufgrund des unendlich hohen Widerstandes. Eine ungestörte Datenübertragung wird erst möglich, wenn das Signal am Kabelende durch den Abschlusswiderstand „vernichtet“ wird.³

Ring-Topologie

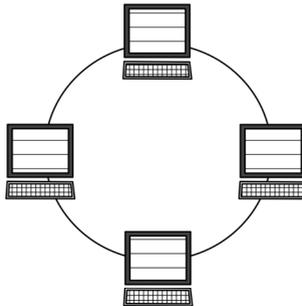


Abb. 21.3: Ring-Topologie

Bei der Ring-Topologie ist jedes Endgerät mit zwei anderen verbunden, d.h. es entsteht ein geschlossener Ring (Abb. 21.3). Alle Stationen funktionieren als Verstärker (Repeater) und somit sind auch lange Distanzen zur Datenübertragung möglich. Damit mehrere Teilnehmer gleichzeitig Daten senden und empfangen können, ist ein eindeutiges Adressierungsverfahren notwendig. Ist ein Teilnehmer gestört, dann fällt das ganze Netz aus. Um dies zu verhindern, gibt es eine sog. Protection-Umschaltung. Hierbei wird der „Arbeitsweg“ in einer bestimmten Drehrichtung um den Ring geführt (z.B. im Uhrzeigersinn), der Ersatzweg in entgegengesetzter Drehrichtung. Ein Ringleitungsverteiler wechselt bei einem gestörten Endgerät die Richtung der Datenübertragung.

² vgl. Schreiner, 2007, Seite 42

³ vgl. Schreiner, 2007, Seite 177

Stern-Topologie

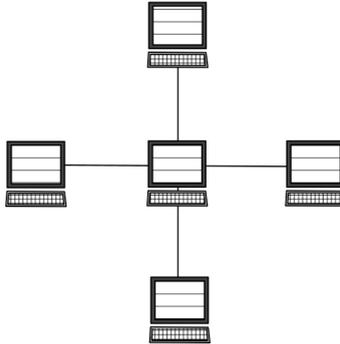


Abb. 21.4: Stern-Topologie

Bei einer Stern-Topologie gibt es einen zentraler Teilnehmer (Abb. 21.4). Dies muss nicht unbedingt ein vollständiger Computer sein, sondern eventuell auch nur ein Hub oder Switch. Ein Nachteil, der sich daraus ergibt: Fällt der zentrale Teilnehmers aus, dann hat das den Ausfall aller Verbindungen zur Folge. Als Schutzmaßnahme wird daher oft ein zweiter redundanter zentraler Teilnehmer eingerichtet. Ein Ausfall eines Endgerätes hat dagegen keine Auswirkungen auf den Rest des Netzes.

Dezentrale Strukturen

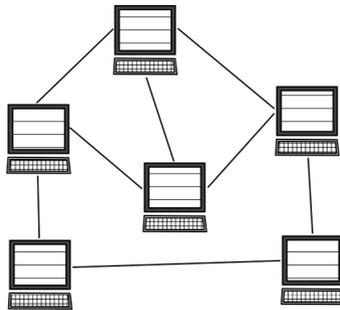


Abb. 21.5: Dezentrale Netztopologie

Dezentrale Topologien werden auch vermaschte Netze genannt. Jedes Endgerät ist mit mindestens einem anderen Teilnehmer, meist aber mit mehreren verbunden (Abb. 21.5). Man spricht von einem vollständig vermaschten Netz, wenn jeder Teilnehmer mit jedem verbunden ist. Beim Ausfall eines Rechners werden die Daten einfach auf einen anderen Weg umgeleitet (=Routing), damit ist eine dezentrale Struktur die sicherste Netzwerktopologie.

21.2.1.2. Logische Topologien

Eine logische Topologie definiert die Art, wie die Daten innerhalb des Netzes geleitet werden. Die logische Topologie kann von der physikalischen abweichen.

Beispiel Ethernet: Physikalisch kann ein Ethernet-Netzwerk als Bus oder Stern aufgebaut sein, logisch ist es aber immer eine Bus-Topologie. Auch die logische Topologie eines Wireless Local Area Network (WLAN) ist immer eine Bus-Topologie.

21.2.2. OSI-Schichtenmodell

Das OSI-Schichtenmodell wurde 1984 von der International Standardization Organisation (ISO) entwickelt, um eine einheitliche Rahmenbedingung zu schaffen, damit Computer mit verschiedenster Hardware und Betriebssystemen miteinander in Netzen kommunizieren können. Es definiert die Komponenten der Datenkommunikation und ordnet diese zu bestimmten logischen Schichten (Abb. 21.6).

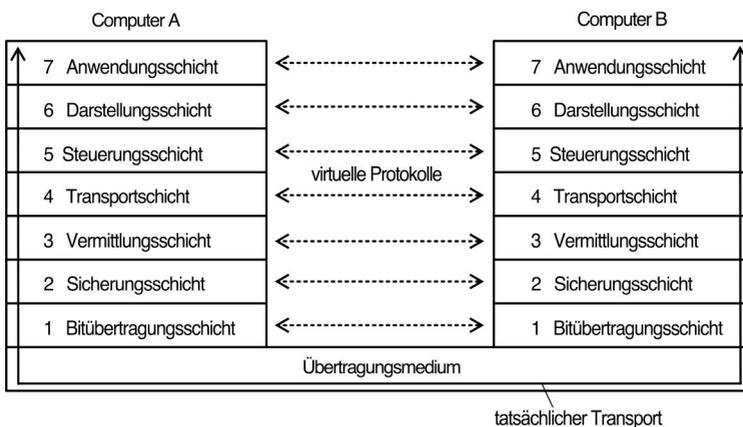


Abb. 21.6: OSI-Modell

Innerhalb einer Schicht findet eine virtuelle Kommunikation über sog. Protokolle statt. Der reale Weg der Daten geht dabei allerdings durch die Schichten und über das Übertragungsmedium. Nicht alle Implementierungen der Schichten halten sich in der Praxis an das OSI-Modell, da es eben nur ein Modell ist und sozusagen eine Empfehlung darstellt. Allerdings kann es erst einen ungestörten und grenzenlosen Datenaustausch geben, wenn alle Hard- und Softwareentwickler die gleichen Protokolle benutzen.

Erläuterungen zu den einzelnen OSI-Schichten:⁴

- Schicht 1: Bitübertragung und Übertragungsmedium (engl.: Physical Layer)
 - Festlegung von Spannungen, Frequenzen, Modulationsverfahren und Bit-Synchronisation für das entsprechende Übertragungsmedium wie z.B. Kupferkabel, Glasfaser oder eine Funkübertragung

⁴ vgl. Steinmetz, 2000, Seite 407ff und Schreiner, 2007, Seite 4

- Definition von Local Area Network (LAN), Metropolitan Area Network (MAN) und Wide Area Network (WAN)
- Schicht 2: Sicherung (engl.: Data Link Layer)
 - Fehlererkennung und -korrektur der übertragenen Daten
 - Flusssteuerung und Synchronisation der Datenblöcke
 - Festlegung der physikalischen Hardware-Adresse: Medium Access Control (MAC)
- Schicht 3: Vermittlung (engl.: Network Layer)
 - Transport eines Datenpakets, Vermittlung, Wegewahl (Routing), Fehlerbehandlung, Netzmanagement, logische Adressierung
 - Beispiel: Internet Protocol (IP)
- Schicht 4: Transport (engl.: Transport Layer)
 - Datenmultiplex und Dienstgütemerkmale
 - Kommunikation zwischen dem Netzwerk und einer Anwendung
 - Prozess-zu-Prozess-Verbindungen z.B. Aufbau einer virtuellen Verbindung in einem Virtual Private Network (VPN)
 - Transmission Control Protocol (TCP)
- Schicht 5: Kommunikationssteuerung (engl.: Session Layer)
 - Garantiert das Bestehen einer Verbindung durch Anforderung, Aufbau, Kontrolle und Koordination von Sitzungen und Datenströmen. Stellt die Verbindung bei Unterbrechungen wieder her
 - Beispiele: Punkt-zu-Punkt- oder Multicast-Verbindungen
- Schicht 6: Darstellung (engl.: Presentation Layer)
 - Umsetzung der lokalen Datenformate in standardisierte Formate für den Transport. Zum Beispiel haben Intel- und Motorola-Prozessoren unterschiedliche Darstellungsarten für die Daten
 - Kodierungs-, Konvertierungs- und Kompressionsverfahren
 - Beispiele: ASCII, TIFF und MPEG
- Schicht 7: Anwendungen (engl.: Application Layer)
 - Interaktion mit der Anwendungs-Software, welche eine Netzübertragung anfordert
 - Beispiel: File Transfer Protocol (FTP)

21.2.3. Ethernet

Ein Ethernet ist durch die Norm IEEE 802.3 standardisiert und umfasst die OSI-Schichten eins und zwei. Ethernet ist ein busbasiertes Netz und die Datenübertragung erfolgt nach dem vorher beschriebenen CSMA/CD-Prinzip. Allerdings ist auch ein Vollduplex-Modus möglich, bei dem die Zugriffsauflösung durch einen oder mehrere Switches erfolgt.

Hub und Switch:⁵

- Hub = Verteiler, der die Datenströme zu den parallel angeschlossenen Zielrechnern lenkt. Nachteil: Kollisionen bei hohen Datenaufkommen, die Datenrate sinkt dabei
- Switch = Intelligenter Verteiler mit einem internen Hochleistungsbus oder einer Matrix, die den Datenstrom leiten. Vorteil: Abnahme der Datenkollisionen

Datenpakete im Ethernet

Im Ethernet erfolgt die Übertragung mit Datenpaketen wie in Tabelle 21.1 dargestellt.

Tabelle 21.1: Ethernet-Paket

Ethernet-Paket								
Präambel	SFD	Ethernet-Frame						
		MAC-Adresse Empfänger	MAC-Adresse Sender	VLAN	Typ-Feld	Daten	Füllfeld	Prüfsumme
7 Byte	1 Byte	6 Byte	6 Byte	4 Byte	2 Byte	64 bis 1500 Byte	variabel	4 Byte

Aufbau des Ethernet-Datenpaketes:

- Präambel: Sieben Bytes mit einer alternierenden Bitfolge (10101010...)
- SFD = Start Frame Delimiter; Ein Byte mit der Bitfolge 10101011 zeigt das Ende der Präambel an
- MAC-Adressen von Empfänger und Sender sind jeweils sechs Byte lang
- VLAN = Virtual Local Area Network; Vier Bytes, die anzeigen, ob ein virtuelles Netzwerk innerhalb eines physikalischen Netzes genutzt wird
- Typ-Feld: Zwei Byte lang. Welche Nutzdaten werden übertragen? (z.B. Internet Protocol, AppleTalk, Novell u.a.).

⁵ vgl. Mueller, 2004, Seite 245 und Schreiner, 2007, Seite 54 und 56

- Daten: 46 bis 1500 Bytes für die eigentlichen Nutzdaten
- Füllfeld: Die Minimalgröße des gesamten Ethernet-Frames beträgt 64 Byte, sind die Nutzdaten zu kurz, müssen Füll-Bytes eingefügt werden.
- Prüfsumme: Vier Bytes, die zur Fehlererkennung durch den Empfänger herangezogen werden

Die Geschwindigkeit der Datenübertragung variiert in verschiedenen Ethernet-Netzwerken:

- 10 Mbit/s (Koaxialkabel mit 50 Ω , Twisted-Pair CAT-5 oder Glasfaser)
- 100 Mbit/s (Twisted-Pair CAT-5 oder Glasfaser)
- 1 Gigabit (Twisted-Pair CAT-5 oder Glasfaser)
- 10 Gigabit (Twisted-Pair CAT-7 oder Glasfaser)

Eine Audioübertragung in Echtzeit ist über Ethernet machbar, wenn jeder Teilnehmer über einen eigenen Switch geleitet wird (sternförmige Verkabelung), Dann steht jeder Station die volle Datenrate zur Verfügung. Weiterhin sollte für die Audioübertragung mindestens ein Fast Ethernet oder besser ein Gigabit-Ethernet genutzt werden. Über Twisted-Pair-Kabel (Abb. 21.7) ist auch eine Stromversorgung der Endgeräte möglich.



Abb. 21.7: RJ45-Stecker an einem Twisted-Pair-Kabel (CAT-5)

21.2.4. Audionetze

Die digitale Audionetzwerktechnik hat gegenüber einer analogen Signalverteilung einige Vorteile:

- Ein Audiosignal ist überall im Netzwerk verfügbar
- Neben Audio können Steuer- und Zusatzdaten verteilt werden
- Es ist ein beliebiges Routen der Daten im Netzwerk möglich

Audionetze können zum einen ethernetkompatibel sein, d.h. auf handelsübliche Computer mit Ethernettechnik basieren oder es werden

proprietäre (herstellerspezifische) Systeme angeboten. Die Übertragung der Audiodaten erfolgt dann z.B. mit dem AES/EBU- oder MADI-Protokoll.

21.2.4.1. Ethernetkompatible Netzwerke

EtherSound (Digigram):

Die Signalverteilung im EtherSound-Netz erfolgt mit handelsüblichen Ethernet Switches. Über Twisted-Pair CAT-5 werden bidirektional 64 Audiokanäle mit 24 Bit und 48 kHz oder 32 Kanäle mit 24 Bit und 96 kHz übertragen. Die Latenz beträgt 125 μ s bei 48 kHz. Jedes weitere Gerät im Netz verlängert die Latenz um 1,4 μ s. Bei einer Bus- oder Ring-Topologie ist eine Signalübertragung bis 100 Meter gesichert. Über einen Switch ist auch eine Stern-Topologie möglich, allerdings ist bei dann die Verbindung nicht mehr vollständig bidirektional (Abb. 21.8 und 21.9).

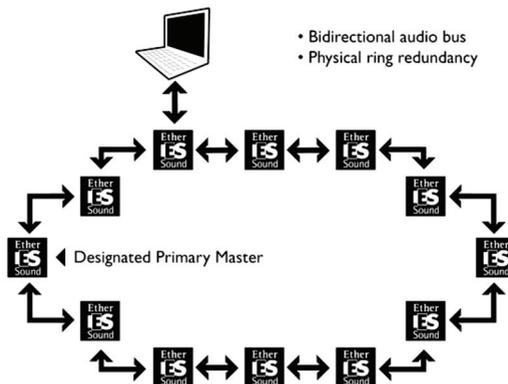


Abb. 21.8: Ethersound mit Ring-Topologie

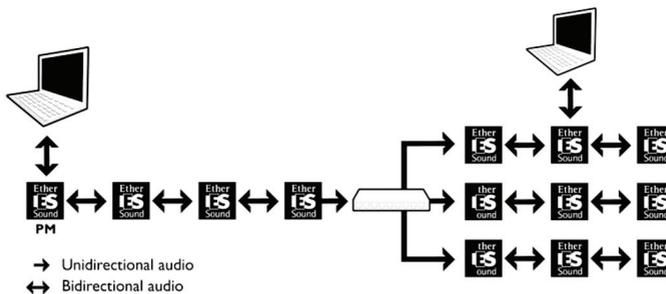


Abb. 21.9: Ethersound mit kombinierter Bus- und Stern-Topologie

Bildquellen: Digigram, <http://www.ethersound.com>

CobraNet (Cirrus Logic):

Ein CobraNet kann mit Twisted-Pair CAT-5 oder Lichtwellenleiter verkabelt werden. Bei einem Fast Ethernet werden bidirektional 64 Audiokanäle mit 20 Bit und 48 kHz übertragen. Wird ein Gigabit-Ethernet genutzt, dann können sogar bis zu 700 Audiokanäle mit maximal 32 Bit und 192 kHz bei einer Datenrate von 43 Gbit/s verteilt werden. Es gibt konstante Latenzen für mittlere, große und sehr große Anlagen (1,33 ms, 2,66 ms und 5,33 ms). Eine Sterntopologie mit doppelten Verbindungen garantiert eine hohe Ausfallsicherheit. Ein Gerät im Netz funktioniert als Master für die Netzwerksynchronisation, wenn dieses ausfällt, übernimmt ein anderer Netzteilnehmer die Taktfunktion. Weiterhin ist im CobraNet Power over Ethernet zur Stromversorgung der angeschlossenen Geräte möglich.

21.2.4.2. Proprietäre Systeme

A-Net (Aviom):

Für ein A-Net wird eine Verkabelung mit Twisted-Pair CAT-5e empfohlen. Das „e“ steht für Enhanced; d.h. es gelten höhere Anforderungen an Kabellänge und Übersprechen. Eine sichere Signalübertragung ist dann bis max. 120 Meter gewährleistet. Für längere Wegstrecken kann ein MMF-Lichtwellenleiter mit einer Reichweite von bis zu 2 Kilometern zum Einsatz kommen.

In einem A-Net werden 64 Audiokanäle mit 24 Bit und 48 kHz parallel übertragen. Mögliche Datenformate sind AES/EBU, MIDI, GPIO, RS 232 und RS 422. Die Latenz beträgt in einem A-Net konstante 460 μ s. Als Topologien können Bus, Stern oder Kombinationen davon aufgebaut werden. Die Konfiguration eines A-Net ist über Hardware (Abb. 21.10) und Software möglich. Über das Netzkabel läuft auch eine Gleichstromversorgung, allerdings kann diese nur von der jeweils ersten Station in der Signalkette genutzt werden. Alle weiteren Geräte benötigen ein eigenes Netzteil.



Abb. 21.10: Aviom A-Net Input Module

RockNet (Media Numerics)

Wird für ein RockNet ein CAT-5 eingesetzt, dann ist eine Datenübertragung bis zu 150 m gesichert, mit einem zusätzlichen Repeater bis 450 m. Es kann auch eine Verbindung über SMF-Lichtwellenleiter bis zu 2 Kilometer hergestellt werden. Die Konfiguration des RockNet erfolgt über Hardware: Pro Input Device

sind acht Audio-Eingänge und -Ausgänge verfügbar. Insgesamt können 160 Audiokanäle mit 24 Bit und 48 kHz verteilt werden.

Audio wird im AES/EBU-Format übertragen, daneben können parallel sog. Auxiliary-Daten gesendet werden. Es ist eine Bus- und Ringtopologie möglich. Eine Besonderheit des RockNet ist die Gain-Kompensation: Eine Veränderung der Eingangsverstärkung an einem digitalen Mischpult z.B. zur FOH-Beschallung führt zu einer gegenläufigen Regelbewegungen bei einem zweiten angeschlossenen Pult z.B. dem Monitormischer (Abb. 21.11).

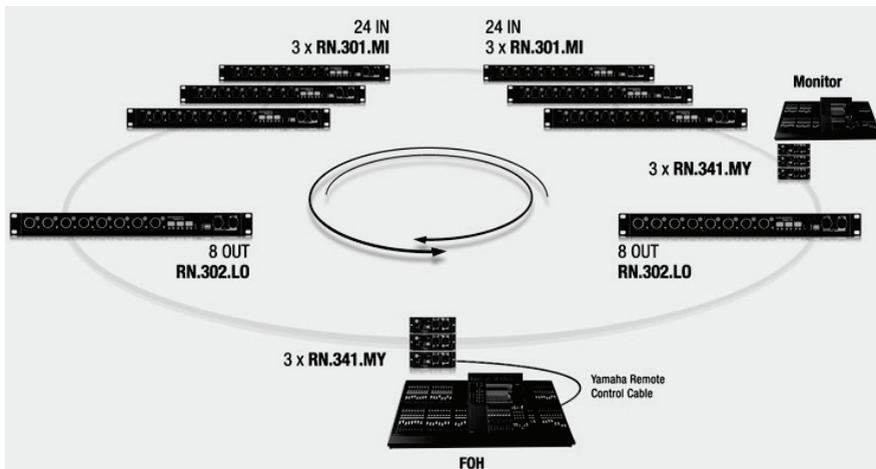


Abb. 21.11: RockNet Ring-Topologie

Bildquelle: Media Numerics, <http://www.medianumerics.com>

Optocore (Optocore GmbH)

Das Konzept von Optocore beruht auf Stageboxen, die auf der Bühne und am FOH-Platz stehen. Es sind aber auch Steckkarten für digitale Pulte erhältlich. Werden für das Optocore-Netz MMF-Lichtwellenleitern genutzt, dann ist eine Reichweite von ca. 700 Metern möglich, mit SMF-Lichtwellenleitern sogar bis zu 70 Kilometer.

Das Optocore-Netz hat eine konstante Latenz von 41,6 μ s. Es sind 512 Audiokanäle bei einer Samplingrate von 48 kHz möglich (1 Gbit/s). Übertragen werden folgende Daten: AES/EBU, MADI, Digitales Video, RS 232, RS 422, DMX und das Ethernetprotokoll. Durch eine Ringtopologie zwei paralleler Leitungen ist eine hohe Ausfallsicherheit gewährleistet (Abb. 21.12).

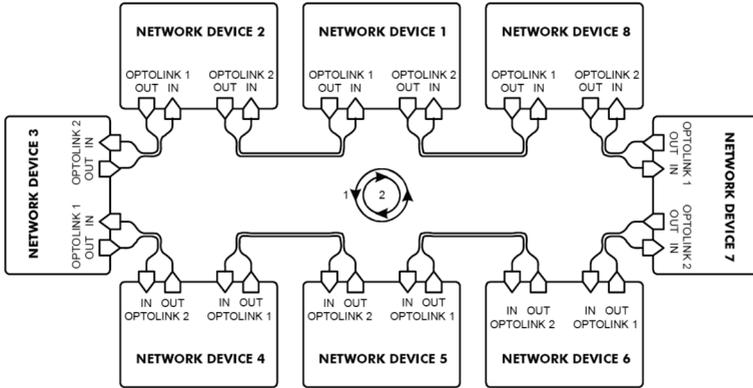


Abb. 21.12: Optocore-Netzwerk

Bildquelle: Optocore, <http://www.optocore.com>

Nexus (Stagetec)

Das Netzwerk- und Kreuzschienensystem Nexus ist als Zeitmultiplex-Bussystem aufgebaut. Jedes Basisgerät verfügt über einen Audiodatenbus mit 256 Time Slots, d.h. es können parallel 256 verschiedene Signale geführt werden. Diese „Zeitfenster“ werden entsprechend dem Datenaufkommen dynamisch vergeben. Die Eingangsbaugruppen wandeln anliegende Audiosignale in ein internes Datenformat und legen die Daten in die Time Slots des Audiobusses. Die Ausgangsbaugruppen lesen diese Daten wieder aus.

Das Nexus-Basisgerät steuert und überwacht alle Ein- und Ausgangsbaugruppen und verwaltet die Steuerinformationen des Audionetzwerkes. Das Routing erfolgt über eine Matrix mit 4096 Eingängen x 4096 Ausgängen. Es gibt von Stagetec verschiedene Mischpultsysteme, die in ein Nexus-Netzwerk integriert werden können (z.B. Aurus, Auratus, Triacon und Cantus).

Die Topologie eines herkömmlichen Nexus-Netzwerkes ist eine dezentrale Struktur. Mit einem zusätzlichen Nexus-Star-Router ist auch eine Sterntopologie möglich. Die Signalverteilung erfolgt durch redundante, doppelt ausgelegte Lichtwellenleiter. Die Signale der beiden LWL werden mit Prüfsummen auf Bitfehler getestet und das empfangende Gerät entscheidet dann, welches ankommende Signal weiter verwendet wird. Die Kommunikation zwischen den Basisgeräten ist bidirektional und je Richtung können 128 Audiokanäle übertragen werden. Die Latenz beträgt für alle Signale konstant 6 Samples.

Es gibt Digital-Audio-Karten für AES/EBU, S/P-DIF, ADAT, MADI, TDIF, SDIF-2, Y2 und Embedded Audio für digitales Video (SDI). Neben Audiosignalen mit max. 24 Bit und 96 kHz können Zusatzdaten verteilt werden, wie z.B. MIDI oder andere Steuersignale. Im Nexus-Netz lassen sich auch

komprimierte Datenformate wie DTS, AC3 und MPEG verteilen. Zusätzlich ist eine Mehrkanaltonübertragung mit Dolby E möglich.

AES50 (Klark Teknik / Midas)

AES50 ist eine sog. High Resolution Multichannel Audio Interconnection (HRMAI), die ursprünglich von Sony für die Übertragung von DSD-Audio entwickelt wurde.⁶ Der Systemtakt resultiert daher wie bei DSD auf einem 64-fachen Oversampling, (z.B. 2.8224 MHz bezogen auf eine Samplingrate von 44,1 kHz). AES50 wird inzwischen von Midas in das Mischpultsystem XL8 integriert (Abb. 21.13).

AES50-Netzwerke gibt es in den zwei Varianten Super- und Hyper-MAC:

- Super-MAC: Bis 48 Audiokanäle bidirektional über CAT-5
- Hyper-MAC: Bis 384 Audiokanäle bidirektional über CAT-5, CAT-6 oder Lichtwellenleiter

Die Reichweite des Netzwerkes beträgt 100 m mit CAT-5 und bis zu 500 m mit MMF-Lichtwellenleiter. Das System hat AES/EBU-Eingänge und -Ausgänge. Weiterhin können durch eine Tunnelung auch USB- und Ethernetdaten übertragen werden. Die Latenz liegt bei 70 μ s pro Netzteilnehmer, die typische Latenz für ein komplettes System beträgt max. 2 ms. Es findet eine Fehlerkorrektur auf der Empfängerseite statt. Jedes angeschlossene Pult hat eine eigenständige Gain-Regelung der A/D-Wandler in den Stageboxen.

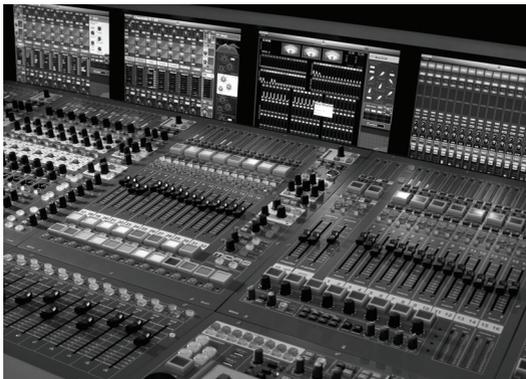


Abb. 21.13: Midas XL8

Bildquelle: Midas, <http://www.midasconsoles.com>

⁶ s. Kap. 12.3. „Pulse Width Modulation (PWM)“

21.3. Audioaufnahme und -speicherung

21.3.1. Soundkarten

Aufgrund der zunehmenden Prozessor- und Speicherleistung eignet sich inzwischen fast jeder handelsübliche PC oder Apple Computer für die Audiotbearbeitung. Bei einer professionellen Verwendung ist eine qualitativ gute Soundkarte unabdingbar (Abb. 21.14).

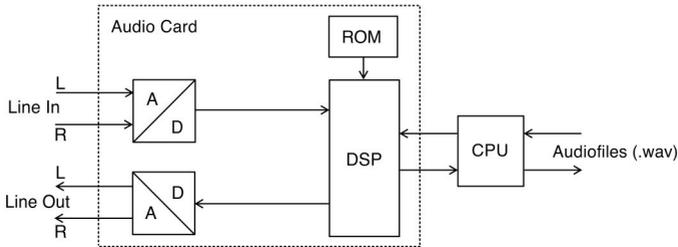


Abb. 21.14: Prinzip einer Soundkarte⁷

DSP : Digital Sound Processor

ROM : Read Only Memory; Arbeitsanweisungen für den DSP

Interne Soundkarten

- Soundchip auf der Hauptplatine: Meist nicht zu empfehlen, da u.U. die Gesamtleistung des Systems beeinträchtigt wird und oft eine schlechte Klangqualität gegeben ist. Auch gibt es meist nur wenige Anschlüsse, z.B. Stereo Line Out und Mic/Line In.
- Steckkarten für PCI-Bus: Bessere Klangqualität und weitere Anschlüsse für analoge und digitale Audiosignale. Es sind Soundkarten für Surroundanwendungen erhältlich z.B. für 5.1 oder 7.1 und oft ist auch ein MIDI-Interface integriert.

Externe Soundmodule

Auf dem Markt sind inzwischen zahlreiche Soundmodule für den Anschluss über USB 2.0 oder Firewire erhältlich. Mehrkanalige Interfaces z.B. mit 8 Ein- und Ausgangskanälen sind gängig.

Wiedergabe von MIDI-Dateien:

Die Wiedergabe von MIDI-Dateien erfolgt entweder über eine Wave-Table-Synthese, d.h. Klangbeispiele (Samples) verschiedener Musikinstrumente sind im ROM-Chip abgelegt und werden bei Bedarf abgespielt. Oder es wird die FM-

⁷ vgl. White, 1998, Seite 162 und 163

Synthese angewandt, bei der ein zusätzlicher FM-Synthese-Chip auf der Soundkarte mit bestimmten Algorithmen ein Instrument nachbildet.⁸

21.3.2. Speichermedien für Audiodateien

21.3.2.1. Compact Disc Digital Audio (CD-DA)

Die CD Digital Audio wurde 1982 von Phillips und Sony entwickelt. Die Spezifikationen dazu sind im sog. Red Book festgelegt. Die CD ist ein als Langzeitspeicher ausgelegtes optisches Speichermedium. Ein Laser mit einer Wellenlänge von 780 nm tastet die Oberfläche der CD ab, welche die digitalen Daten in Form von winzigen Erhebungen (Lands) und Vertiefungen (Pits) enthält. Beim Übergang von Pit zu Land und umgekehrt ändert sich das Reflexionsverhalten der verspiegelten CD-Oberfläche. Ein Fotodetektor registriert die Lichtänderung des reflektierten Laserstrahls und erzeugt eine entsprechende Ausgangsspannung. Die Pits und Lands sind nur ca. 0,6 µm Breit, die Länge variiert, da diese die digitale Information darstellt (Abb. 21.15). Die Spuren haben einen Abstand von ca. 1,6 µm. Die Abtastgeschwindigkeit beträgt 1,2 m/s bei einer konstanten Bahngeschwindigkeit.⁹

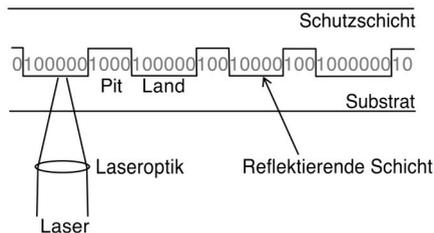


Abb. 21.15: Schnitt durch eine CD

21.3.2.2. Compact Disc Recordable (CD-R)

Die Compact Disc Recordable ist eine einmal beschreibbare CD. Die Spezifikationen sind im Yellow und Orange Book festgelegt, z.B. die Definition des Dateisystems nach ISO 9660. Standard sind CD-R Rohlinge mit 700 MB Speicherkapazität (ca. 80 Minuten Audio), manchmal werden auch Rohlinge mit 800 MB verwendet (ca. 90 Minuten Audio).

21.3.2.3. Digital Versatile Disc Recordable (DVD±R)

Seit 1997 ist die DVD als Nachfolger der CD auf dem Markt. Ursprünglich wurde die DVD als Massenmedium für Videodaten entwickelt, sie wird aber inzwischen auch für die Audiodistribution eingesetzt (DVD-Audio). Die Daten werden mit dem Dateisystem UDF (Universal Disc Format) gespeichert, das eine

⁸ vgl. White, 1998, Seite 164 und 165

⁹ vgl. Schmidt, 2000, Seite 422

Weiterentwicklung von ISO 9660 ist. Der Laser hat für die DVD eine Wellenlänge von 650 nm. Der Abstand der Spuren beträgt nur 0,74 μm und die Abtastgeschwindigkeit ist 4 m/s höher als bei der CD. Es können daher wesentlich mehr Daten gespeichert werden, auch aufgrund dessen, da eine DVD die Daten auf beiden Seiten und in maximal vier Schichten (Layern) tragen kann (Abb. 21.16).¹⁰

Speicherkapazitäten:

- DVD-5: SS/SL 4,7 GB
- DVD-9: SS/DL 8,5 GB
- DVD-10: DS/SL 9,4 GB
- DVD-18: DS/DL 17,1 GB

Single Side (SS); Double Side (DS); Single Layer (SL); Double Layer (DL)

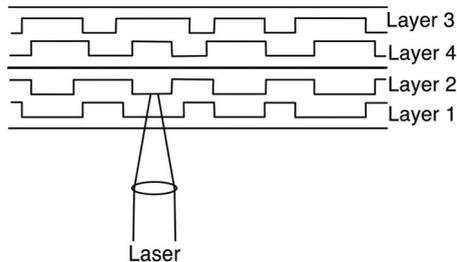


Abb. 21.16: Schnitt durch eine DVD (DS/DL)

21.3.2.4. Festplatten

Festplatten sind Aluminiumplatten, die beidseitig mit einer Magnetschicht aus einer Kobaltlegierung versehen sind. Bei diesem magnetischen Speichermedium liegt die digitale Information als magnetischer Flusswechsel vor. Die Schreib-Lese-Köpfe schweben auf einem dünnen Luftpolster in einem Abstand zur Platte von weniger als 50 nm. Die Daten sind in Spuren, Zylinder und Sektoren auf der Platte verteilt.

Zugriffszeit, Datentransferrate und Kapazität sind die Parameter, nach denen eine Festplatte beurteilt wird. Es sind ständig steigende Kapazitäten verfügbar. Bei den ersten Festplatten waren es nur wenige MByte, heutzutage gibt es schon einige Terrabyte. Festplatten sind intern im Computer eingebaut und sind auch als Wechselfestplatten mit USB- oder Firewire-Anschluss verfügbar. Standardgrößen: 3,5“ für Desktopcomputer, 2,5“ für Notebooks (Abb. 21.17) und 1,8“ für MP3-Player.

¹⁰ vgl. Schmidt, 2000, Seite 425

Die Datenrate und Ausfallsicherheit kann durch Kombination mehrerer Festplatten erhöht werden (RAID = Redundant Array of Independent Discs):¹¹

- RAID 0 (Stripe): Ein RAID-Controller verteilt die Daten auf mehrere Festplatten. Noch keine Ausfallsicherheit, aber eine höhere Datenrate
- RAID 1 (Mirror): Die Daten werden parallel auf mehrere Festplatten geschrieben. Volle Ausfallsicherheit

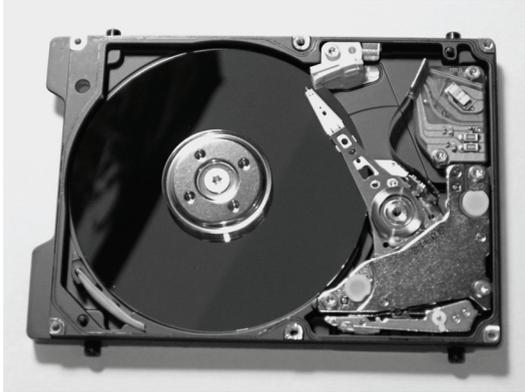


Abb. 21.17: Notebook-Festplatte

21.4. Audiodateien

21.4.1. Unkomprimierte Audiodateien

Dateiformate für unkomprimiertes digitales Audiomaterial sind z.B. Wave, AIFF und SoundDesigner.

Wave (.wav):

- Entwickelt von Microsoft und IBM
- Erweiterung des Resource Interchange File Format (RIFF), welches für das Betriebssystem Windows vorgesehen war
- Wave ist ein Containerformat, i.d.R. für PCM-Daten. Es kann aber auch komprimierte Audiodaten wie z.B. MP3 enthalten
- Eine Datei besteht aus Datenpaketen, die auch Chunks genannt werden

¹¹ vgl. Schmidt, 2000, Seite 411 und Fluch, 2008, Seite 85

Broadcast WAV (.wav):

- Weiterentwicklung des Wave-Formates durch die European Broadcast Union
- Entspricht im Wesentlichen dem Wave-Format, es gibt aber einen zusätzlichen Chunk zur Identifizierung als BWF und mit Metadaten (Description, Name of the Producer, Reference No., Date&Time, Coding History)
- Der Container kann PCM- oder MPEG-Daten enthalten

Aiff (.aiff):

- Entwickelt von Apple
- Container für LPCM-Daten (Linear Pulse Code Modulation), basiert auf dem Interchange File Format (IFF)
- Ähnliche Struktur der Chunks wie bei Wave-Dateien

SoundDesigner (.sd2):

- Entwickelt von Digidesign
- Proprietäres (herstellerspezifisches) Dateiformat, das in ProTools-Systemen eingesetzt wird

21.4.2. Komprimierte Audiodateien**21.4.2.1. Verlustfreie Kompression**

Verlustfreie Kompression bedeutet, dass die ursprünglichen Audiodaten wieder hergestellt werden können.

Beispiele:

- MLP (Meridian Lossless Packing) oder auch PPCM (Packed PCM) genannt. Von Meridian Audio für die Audio-DVD entwickelt
- DST (Direct Stream Transfer): Von Philips und Sony für die Super Audio CD entwickelt. Das DSD Stream File (.dsf) wird letztlich im Direct Stream Transfer auf die SACD übertragen
- ALAC (Apple Lossless Audio Codec) im MPEG-4 Container z.B. für iPods (.m4a)
- FLAC (Free Lossless Audio Codec), entwickelt von der Xiph.Org Foundation

21.4.2.2. Verlustbehaftete Datenkompression

Die verlustbehaftete Datenreduktion von Audiodateien beruht auf psychoakustischen Modellen. Grob vereinfacht kann gesagt werden: was der Mensch nicht hören kann, wird weggelassen. Zum Beispiel wird die Hörschwelle durch laute Töne angehoben, leise Töne unter der Hörschwelle werden daher nicht kodiert. Ebenso werden maskierte Klänge durch Vor-, Mit- und

Nachverdeckung ignoriert.¹² Die Kompressionsrate sollte nicht zu niedrig angesetzt werden, sonst sind Artefakte hörbar.

MPEG-1 Layer 3 (.mp3)

- Entwickelt vom Fraunhofer Institut in Erlangen
- Feste oder variable Bitraten möglich (8 bis 448 kBit/s)
- ID3-Tags mit Metadaten wie Titel, Interpret, Album, Jahr, etc..
- Erweiterung zu MP3-Surround (5.1)

MPEG-4 Audio (.mp4 oder .m4a)

- Basiert auf dem Quicktime-Container von Apple
- Mögliche Audioformate: AAC, MP3, MP2, MP1, MIDI, CELP, TwinVQ

Ogg Vorbis (.ogg)

- Ogg Vorbis ist ein freier Codec für die Audiokompression,
- Container für Multimedia-Daten (Audio, Video und Text); Aufbau ähnlich wie MPEG-4
- Mehrkanalfähig

Windows Media Audio (.wma)

- Vergleichbar mit MP3
- Variable Bitraten bis zu 768 kBit/s
- 7.1 Surround

Dolby AC3 (.ac3)

- Basiert auf einem Standard des Advanced Television Systems Committee (ATSC)
- Bitraten: 32 bis 640 kBit/s
- 5.1-Wiedergabe für Film bzw. Video

¹² s. Kap. 4.2. „Wahrnehmung durch das Gehör“

21.5. Software zur Audiotbearbeitung

Software zur Audiotbearbeitung kann eingeteilt werden in:

- Programme zur Bearbeitung von Samples, d.h. Mono, Stereo- oder Mehrspur-Audiodateien
- Digitale Audio Workstations (DAW): Mehrspurprojekte mit integrierten Mischer
- Cue-Player für den Live-Einsatz zur Audio- und MIDI-Wiedergabe

Im Folgenden werden einige Beispiele von Audioprogrammen aufgezeigt. Auf die Bedienung der Software kann aber nicht weiter eingegangen werden, da dies den Rahmen dieses Buches sprengen würde.

21.5.1. Sample-Bearbeitung

21.5.1.1. WaveLab (PC)

Das Programm Wavelab von der Firma Steinberg ermöglicht Audio-Editing in Stereo und Surround. Es werden Sampleraten bis 384 kHz unterstützt bei einer 32-Bit Floating Point Auflösung. Dateitypen (Auswahl): WAV, AIFF, AU, MP3, MP2, RAW und WMF.

Wavelab bietet Metering- und Analyse-Anzeigen, die vor allem beim CD-Mastering und DVD-Audio-Authoring nützlich sind. Werkzeuge zur Klangbearbeitung sind EQs, Dynamics und weitere Effekte, die als VST-PlugIns optional einbindbar sind.

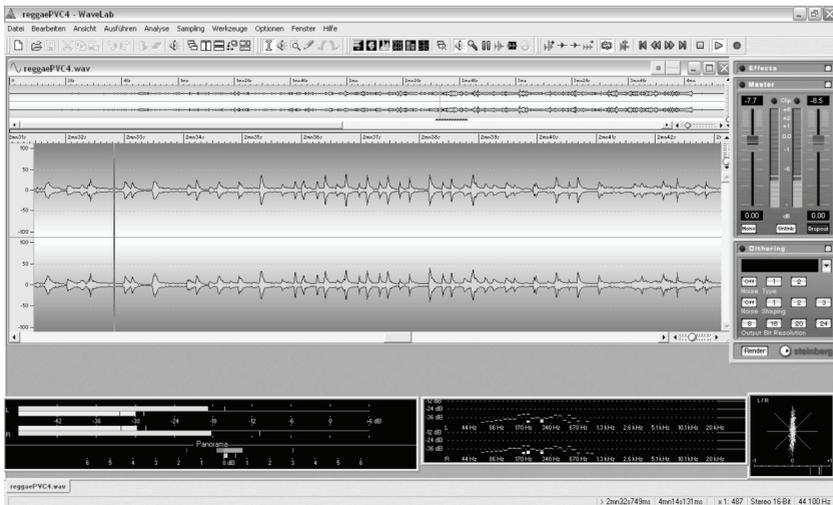


Abb. 21.18: Screenshot WaveLab (Windows XP)

21.5.1.2. Audacity (PC, MAC und Linux)

Audacity ist eine Open Source Software, die für verschiedene Betriebssysteme erhältlich ist. Es ist lediglich ein Audio-Editing in Mono oder Stereo möglich, Surroundformate werden (noch) nicht unterstützt. Audiodateien mit max. 32-Bit Auflösung und einer Samplerate bis 96 kHz können bearbeitet werden. Dateitypen: WAV, AIFF, AU, MP3, MP2 und Ogg Vorbis.

Wie bei Wavelab werden zur Klangbearbeitung EQs, Dynamics und weitere Effekte eingesetzt. VST-PlugIns können ebenfalls eingebunden werden.

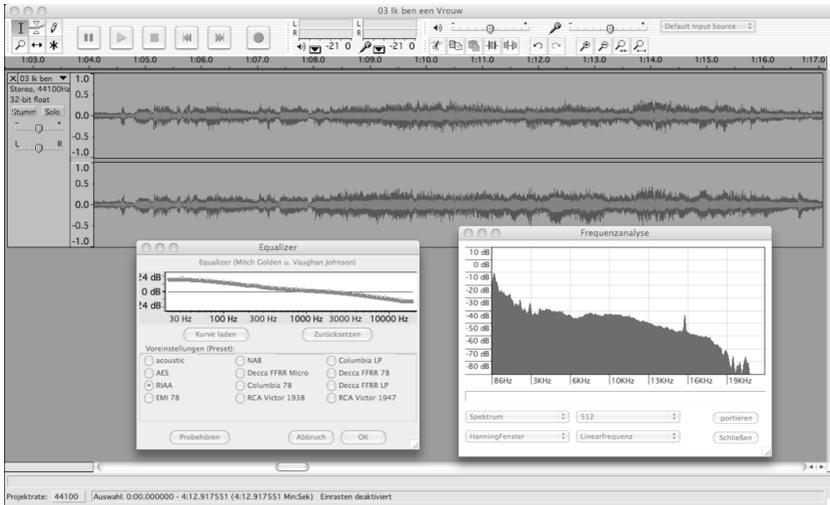


Abb. 21.19: Screenshot Audacity (Mac OS 10.4)

21.5.2. Digitale Audio Workstations

21.5.2.1. Cubase (PC)

Cubase ist ein Programm das Audio-Recording, -Editing und die Abmischung mehrerer Ton- oder MIDI-Spuren ermöglicht. MIDI-Sequencing, Notensatz und Notendruck sind weitere Anwendungsgebiete. Die Klangbearbeitung von Spuren oder Samples erfolgt mit EQs, Dynamics und weiteren Effekten (VST-PlugIns).

Cubase unterstützt ASIO oder Core-Audio kompatible Hardware. Dateitypen (Auswahl): AIFF, WAV, Broadcast WAV, MP3, Ogg Vorbis, WMA, Optional: Dolby AC3 und DTS. Es ist ein Import und Export von OMF-Dateien möglich, daneben ein Video-Import von MPEG 1 und 2, AVI, QuickTime und WMV.



Abb. 21.20: Screenshot Cubase SE (Mac OS 10.4)

21.5.2.2. ProTools (MAC)

ProTools ermöglicht ein Audio-Recording, -Editing und Mix mehrerer Spuren. Ein komfortables Arbeiten bei der Abmischung wird ermöglicht durch Hardware-Controller wie z.B. der ICON-Mischkonsole. ProTools-Systeme basieren auf einer eigenen Audio-Hardware:

- Einfachste Versionen: ProTools LE mit Audio Interface (z.B. 003 oder Mbox)
- Professionelle Ausführung: HD Core-Karte (PCI) und ProTools HD Audio Interface

Es gibt spezielle TDM-PlugIns für ProTools. Dateitypen (Auswahl): SD2, AIFF, WAV, AAF-Export für AVID-Systeme, Optional: Dolby Surround, Dolby AC3, DTS und WMA.

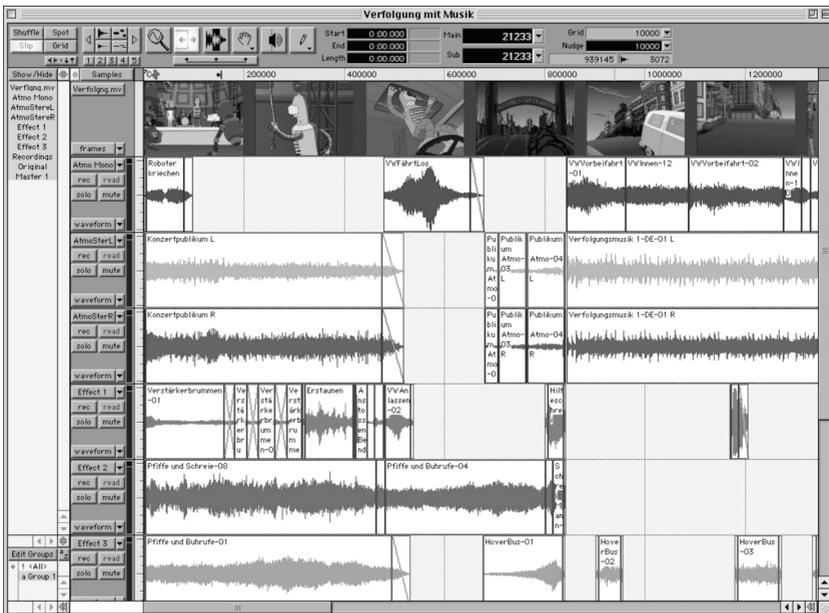


Abb. 21.21: Screenshot ProTools Free (Mac OS 9)

21.5.3. Cue-Player

21.5.3.1. SFX (PC)

Mit Hilfe einer Cue-Liste können von SFX Sound-, MIDI- und Special-Cues aufgerufen werden. Es wird eine ASIO-Audiowiedergabe von WAV, MP3 und WMA unterstützt. SFX hat eine interne Mischmatrix, die es ermöglicht, die Sounds auf verschiedene Ausgänge zu routen. Per MIDI kann das Programm auch ferngesteuert werden.



Abb. 21.22: Screenshot SFX (Windows XP)

21.5.3.2. QLab (MAC)

QLab hat eine Cue-Liste für Audiodateien und MIDI-Befehle. Funktionen: Play, Stop, Fades und andere Funktionen für Audio, weiterhin Ausgabe von Befehlen für MIDI Voice und MIDI Show Control. Unterstützte Audioformate: WAV, AIFF, MP3 und weitere. Die Wiedergabe von Quicktime-Videos ist ebenfalls möglich. QLab hat einen internen 8 x 16 Matrix-Mischer. Es ist eine Fernsteuerung von QLab über MIDI möglich.



Abb. 21.23: Screenshot QLab (Mac OS 10.4)

21.6. Übungsaufgaben

Aufgabe 1:

Nenne drei physikalische Netztopologien.

Aufgabe 2:

Was ist im Layer 1 des OSI-Schichtenmodell beschrieben?

Aufgabe 3:

Welche Merkmale hat ein ethernetbasiertes Audionetzwerk? Was ist ein proprietäres Audionetzwerk? Nenne jeweils zwei Beispiele für ethernetbasierte und proprietäre Audionetze.

Aufgabe 4:

Warum hat eine DVD eine größere Speicherkapazität im Vergleich zu einer CD?

Aufgabe 5:

In einem Skript von „Die 3 Musketiere“ stehen folgende Regieanweisungen:

ÜBERFAHRT AUF DEM ÄRMELKANAL. GEWALTIGER WIND. EIN ORKAN ZIEHT AUF. GRELLE BLITZE UND DONNER.

DER MAST BRICHT. EIN MANN GEHT ÜBER BORD.

EINE GROSSE WELLE SCHWAPPT ÜBER DAS BOOT UND ES IST NICHT MEHR ZU SEHEN.

Die ganze Szenerie dauert ca. 3 Minuten. D'Artagnan und der Bootsmann sprechen Text und die Seeleute an den Rudern singen im Chor.

Suche in Sound-Archiven nach den passenden Geräuschen, und bearbeite diese so, dass sie sich für eine Einspielung eignen (Schneiden, Blenden, Pegel und Klang anpassen etc.). Es gibt im Internet frei verfügbare Cue-Player z.B. QLab für Apple MacOS (<http://figure53.com/qlab/>) oder MultiPlay für Windows-PC (<http://www.audiovisualdevices.com.au/software/multiplay/multiplay.php>). Installiere einen Sample-Player Deiner Wahl und erstelle eine Cue-Liste, die es ermöglicht, die Zuspieldungen in der vom Skript vorgegebenen Reihenfolge auf Text oder Lichtzeichen zu starten.



Literaturtipps:

Schreiner, Rüdiger: Computer Netzwerke.
München: Hanser Verlag.

Wikibooks.org: Computerhardware.

<http://de.wikibooks.org/wiki/Computerhardware> (Letzter Aufruf Oktober 2008)

22. Video im Theater & bei Veranstaltungen



Das Thema „Bild- und Tonbearbeitung“ steht als Unterrichtseinheit im dritten Ausbildungsjahr auf dem Lehrplan, Daneben auch verschiedene Projektionsverfahren und -geräte.

22.1. Videosignale

22.1.1. BAS-Signal

Die Abkürzung BAS steht für Bild-, Austastung- und Synchronsignal. Das BAS-Videosignal enthält lediglich Helligkeitsinformationen, also wird damit nur ein Schwarz-Weiß-Bild übertragen. Die Helligkeitsunterschiede werden im Bildaufnahmewandler der Videokamera in ein elektrisches Signal umgesetzt. Bei der Wiedergabe über einen Monitor oder Videoprojektor wird das elektrische Signal wieder in Helligkeitswerte gewandelt.

22.1.1.1. Prinzip der zeilenweisen Abtastung

Beim BAS-Signal wird das Bild zeilenweise abgetastet und jede Zeile in Bildpunkte zerlegt. Das europäische Standardfernsehsystem hat 625 Zeilen, davon sind 575 sichtbar. Die nicht sichtbaren Zeilen enthalten u.a. den Timecode.¹ Damit dem Auge die Bewegungsvorgänge als fließend erscheinen, ist eine Bildwechselrate von mindestens 20 Bildern pro Sekunde nötig.² Die Bildwechselrate basiert auf der halben Netzfrequenz der Stromversorgung, d.h. $50 \text{ Hz} / 2 = 25 \text{ Hz}$ in Europa und $60 \text{ Hz} / 2 = 30 \text{ Hz}$ in den USA und Japan.³

Die Bilddauer beträgt bei 25 Bildern pro Sekunde:

$$\frac{1}{25} \text{ s} = 40 \text{ ms} \quad (\text{Formel 22.1})$$

Damit lässt sich die Zeilendauer wie folgt berechnen:

$$\frac{40 \text{ ms}}{625 \text{ Zeilen}} = 64 \mu\text{s} \quad (\text{Formel 22.2})$$

¹ VITC; s. Kap. 12.7.2. „Timecode“ und vgl. Fluch, 2008, Seite 129

² vgl. Schmidt, 2000, Seite 9

³ vgl. Schmidt, 1996, Seite 86

Alle $64 \mu\text{s}$ wird also eine neue Zeile geschrieben. Die Zeilenfrequenz lässt sich dann wie folgt berechnen:

$$f = \frac{1}{64 \mu\text{s}} = 15625 \text{ Hz} \quad (\text{Formel 22.3})$$

22.1.1.2. Interlacing

Bei einem Bildwechsel von 25 Vollbildern pro Sekunde, also einer progressiven Abtastung, würde das Bild immer noch stark flimmern. Erst bei einer Bildwechselfrequenz von mindestens 50 Hz verschwindet das Flimmern.⁴ Das würde allerdings zur doppelten Signalbandbreite führen. Daher wird ein Vollbild in zwei Halbbilder mit je 312,5 Zeilen zerlegt, welche ineinander verkämmt (engl.: interlaced) sind (Abb. 22.1).⁵

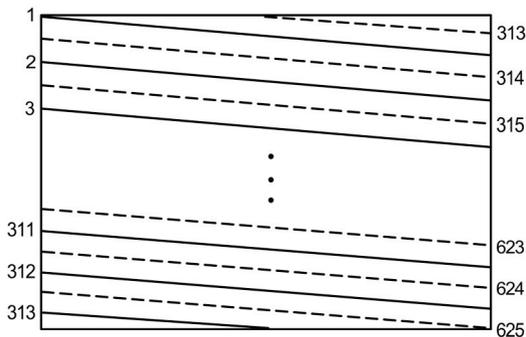


Abb. 22.1: Zeilensprungverfahren

Die letzte Zeile des ersten Halbbildes wird nur halb geschrieben, die Zeile Nummer 313 ist damit die letzte (halbe) Zeile im ersten und zugleich die erste (halbe) Zeile im zweiten Halbbild. Am Ende des zweiten Halbbildes, nach der Zeile 625, folgt das nächste Bild.⁶

22.1.1.3. H- und V-Impuls

Im Takt der Zeilenfrequenz mit 15625 Hz folgt der H-Impuls mit einer Dauer bzw. Impulsbreite von $12 \mu\text{s}$. Der Vertikalimpuls zur Übertragung des Halbbildwechsels hat eine Frequenz von 50 Hz, die Impulsbreite beträgt hier 1,6 ms. In der Zeit des Zeilen- bzw. Bildrücklaufes darf im Signal keine Bildinformation vorhanden sein, das Bildsignal wird dazu also ausgetastet. Die Austastlücke definiert das 0V-Potential, d.h. den Bezug zu allen anderen Pegeln des Videosignals.

⁴ vgl. Schmidt, 2000, Seite 9 und Mueller, 2004, Seite 53

⁵ vgl. Schmidt, 1996, Seite 92

⁶ vgl. Schmidt, 1996, Seite 94

H-Oszillogramm

Bei der H-Darstellung auf einen Waveform-Monitor werden alle Zeilen des Bildsignals übereinander geschrieben. Mit der Line-Select-Funktion kann auch eine einzelne Zeile betrachtet werden (Abb. 22.2).

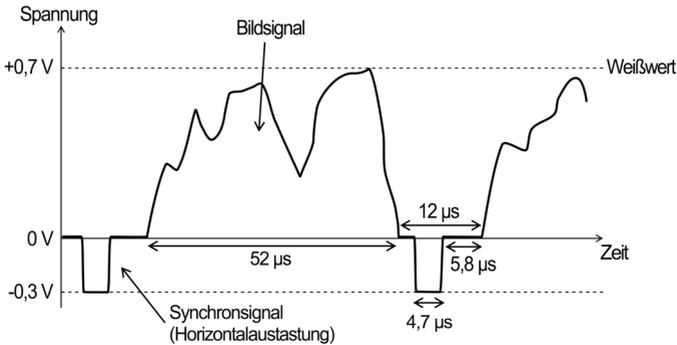


Abb. 22.2: H-Oszillogramm eines BAS-Signals

V-Oszillogramm

Beim V-Oszillogramm werden alle Zeilen nebeneinander geschrieben. Dabei wird die V-Austastlücke sichtbar. Funktion am Messgerät: 2-Field (Abb. 22.3).

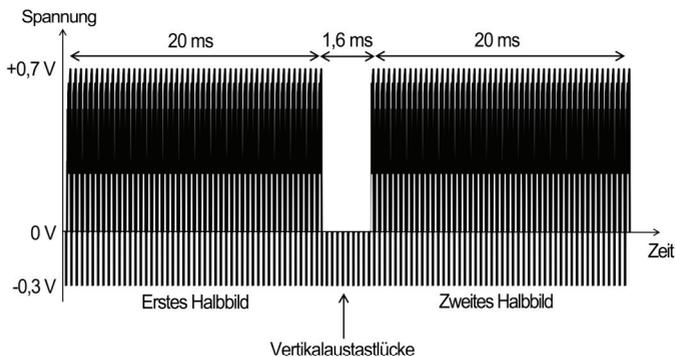


Abb. 22.3: V-Oszillogramm eines BAS-Signals

Spannung des BAS-Signals gemäß der CCIR-Norm⁷

$$0,7 V_{SS} (BA) + 0,3 V_{SS} (S) = 1 V_{SS} (BAS)$$

Bandbreite des normgerechten BAS-Signals

$$B = 5 \text{ MHz}$$

⁷ CCIR = Consultative Committee on International Radio

22.1.2. Farbsignale

Das menschliche Auge ist empfindlich auf Lichtwellenlängen von ca. 380 bis 780 nm.⁸ Dabei sind die ca. 6,5 Millionen Zapfen in der Netzhaut die Sinneszellen, welche für das Farbsehen zuständig sind. Es gibt drei Arten von Zapfen, die danach unterschieden werden, auf welche Lichtwellenlänge diese reagieren:⁹

- S-Typ (Short Wavelength): Höchste Empfindlichkeit bei ca. 445 nm = Blau
- M-Typ (Middle Wavelength): ca. 535 nm = Grün
- L-Typ (Long Wavelength): ca. 570 bis 630 nm = Gelb-Rot

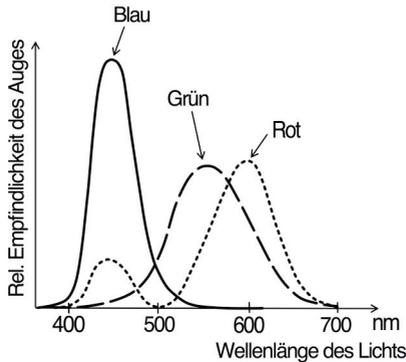


Abb. 22.4: Farbempfinden des menschlichen Auges¹⁰

Die Wahrnehmung der drei Primärfarben reicht aus, um nach dem Prinzip der additiven Farbmischung weitere Farbtöne abzuleiten (Abb. 22.4 und 22.5).¹¹

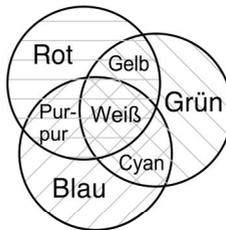


Abb. 22.5: Additive Farbmischung

⁸ vgl. Schmidt, 2000, Seite 5

⁹ vgl. Schmidt, 2000, Seite 43 und Mueller, 2004, Seite 43 und 51

¹⁰ Normspektralwerte eines farbmimetrischen Normalbeobachters;

vgl. Schröder, 1998, Seite 167

¹¹ Drei-Farben-Theorie beruhend auf den Untersuchungen von Thomas Young (1773 – 1829) und Hermann von Helmholtz (1831 – 1879); vgl. Irtel, 2003, Seite 227

22.1.2.1. R, G, B

Beim RGB-Video werden die Signalspannungen für die Farben Rot, Grün und Blau auf getrennten Leitungen übertragen. Abb. 22.6 zeigt die Spannungswerte von R, G und B bei einem genormten 100%-Farbbalken als Testsignal. Die Farbinformationen werden als elektrische Spannungen auf den einzelnen Farbkanälen übertragen. Beispiel: Bei der Farbe „Cyan“ beträgt die Spannung auf dem R-Kanal 0 V, der G- und B-Kanal haben zu diesem Zeitpunkt dagegen eine Spannung von 1 V.

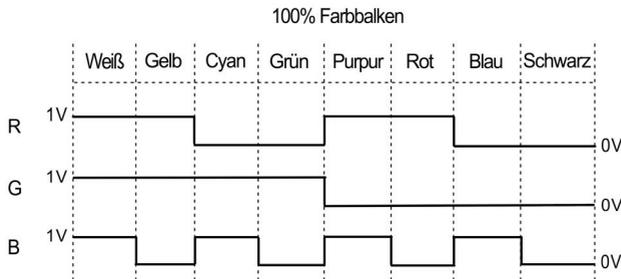


Abb. 22.6: RGB-Signale bei einem 100%-Farbbalken

Zur Synchronisierung der Farbkanäle ist ein spezielles Farbsynchronsignal, der sog. Burst notwendig, der auf einer eigenen Leitung geführt wird. Für die RGB-Übertragung sind also insgesamt vier parallele Kanäle bzw. Videokabel notwendig. Das Farbsynchronsignal wird in die Horizontalaustattung eingefügt. Die Frequenz des Burst beträgt ca. 4,43 MHz, die Phasenlage 135° . In Abb. 22.7 ist der Zeitverlauf und die Vektordarstellung des Burst zu sehen.

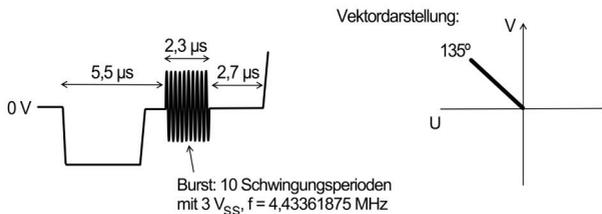


Abb. 22.7: Burst¹²

22.1.2.2. Y, R-Y, B-Y

Aus dem RGB-Signals lässt sich das Luminanzsignal Y gewinnen und weiterhin die Farbdifferenzkomponenten R-Y und B-Y. Gemäß dem EBU-Standard N10 erfolgt die Berechnung (Matrizierung) des Y-Signals mit folgenden Gewichtungsfaktoren:

$$Y = 0,299R + 0,587G + 0,114B \quad (\text{Formel 22.4})$$

¹² vgl. Webers, 2007, Seite 185

Die Gewichtungsfaktoren sind aus der Kurve des Helligkeitsempfindens des menschlichen Auges abgeleitet. Die schon erwähnten Zapfen nehmen bei hohen Leuchtdichten sowohl die Farben als auch die Helligkeit wahr. Daneben gibt es in der Netzhaut aber noch ca. 130 Millionen Stäbchen, die Sinneszellen für das Helligkeitsempfinden bei schwachen Leuchtdichten. Die maximale Empfindlichkeit des Auges liegt bei einer Lichtwellenlänge von ca. 550 nm, also im Bereich der Spektralfarbe Grün (Abb. 22.8).¹³

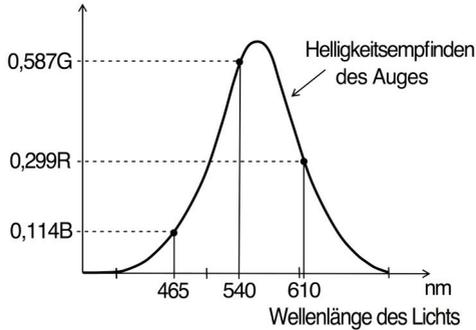


Abb. 22.8: Helligkeitsempfinden des menschlichen Auges¹⁴

Nach der Matrizierung zu Y, R-Y und B-Y sieht das Testsignal des 100%-Farbbalkens wie in Abb. 22.9 aus:

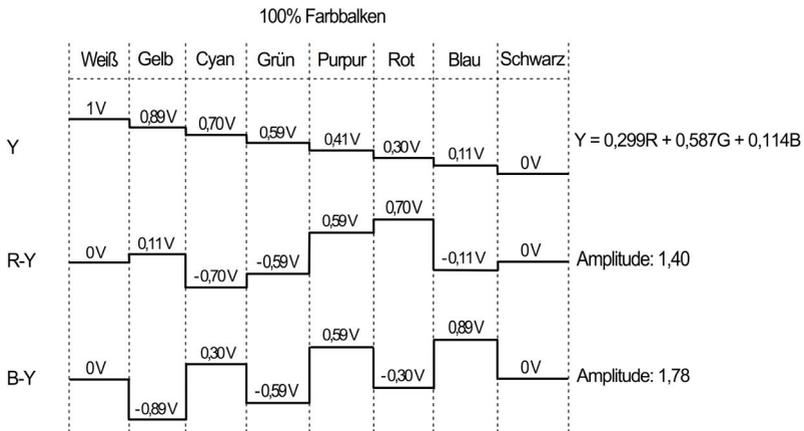


Abb. 22.9: Y, R-Y und B-Y bei einem 100%-Farbbalken

Wie im Bild zu erkennen ist, treten bei der Matrizierung folgende Probleme auf:

¹³ vgl. Schmidt, 2000, Seite 8 und Mueller, 2004, Seite 51

¹⁴ vgl. Mäusl, 1998, Seite 15 und Mueller, 2004, Seite 54 (Kurve für das Tagessehen)

- Die Amplituden der Signalspannungen von R-Y und B-Y sind größer als 1V
- Es gibt negative Werte im Bild- bzw. Farbanteil

Lösung: Die reduzierte Farbdifferenzsignale C_R und C_B oder U und V.

22.1.2.3. Y, C_R , C_B (Component-Video)

Beim Component-Video werden die Farbdifferenzkomponenten mit folgenden Bewertungsfaktoren verrechnet:¹⁵

$$C_R = 0,713(R - Y) \quad (\text{Formel 22.5})$$

$$C_B = 0,564(B - Y) \quad (\text{Formel 22.6})$$

Der Vorteil von Component-Video liegt darin, dass die Signale auf eine Spannungsamplitude von $0,7 V_{SS}$ normiert sind. Weiterhin erfolgt eine Begrenzung der Bandbreite von C_R und C_B auf 1,3 bis 2,5 MHz, während der Y-Kanal mit der vollen Bandbreite von 5 MHz übertragen wird.¹⁶

Anwendung: Videosignal zur Magnetbandaufzeichnung (MAZ).

22.1.2.4. Y, U, V

Bei einer anderen Bewertung von R-Y und B-Y entstehen die reduzierten Farbdifferenzkomponenten U und V:

$$V = 0,877(R - Y) \quad (\text{Formel 22.7})$$

$$U = 0,493(B - Y) \quad (\text{Formel 22.8})$$

Die Bandbreite von U und V ist jeweils auf 1,3 MHz begrenzt.¹⁷

Anwendung: PAL-Encoder.

22.1.2.5. PAL

PAL = Phase Alternating Line

PAL ist das Farbfernsehsystem in Europa. Andere Bezeichnungen dafür sind auch: FBAS (= Farbbild-, Austastung- und Synchronsignal) oder CVBS (Composite Video Broadcast Signal).

Eine Encoderschaltung wie in Abb. 20.10 dargestellt erzeugt aus einem RGB- das PAL-Signal.

¹⁵ vgl. Schmidt, 2000, Seite 54

¹⁶ vgl. Schmidt, 2000, Seite 56

¹⁷ vgl. Schmidt, 2000, Seite 55 und 57

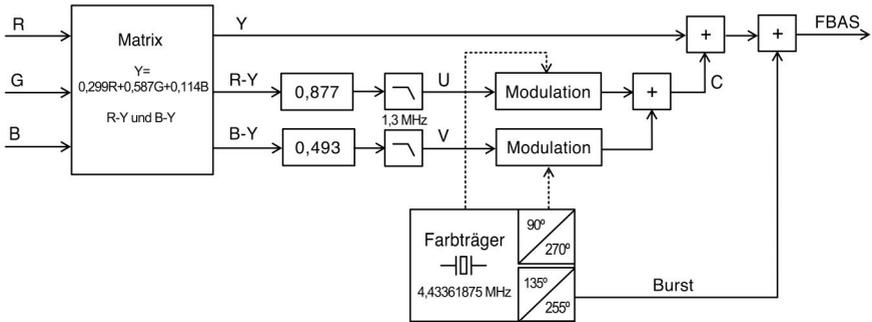


Abb. 22.10: PAL-Encoder

Das U-Signal hat eine feste Phasenlage mit 0° , während die Phasenlage des V-Signals zeilenweise von 90° auf 270° wechselt. Die Phase des Burst wechselt zeilenweise von 135° auf 255° . Abb. 22.11 zeigt die sich daraus ergebende Vektordarstellung des 100%-Farbbalkens.

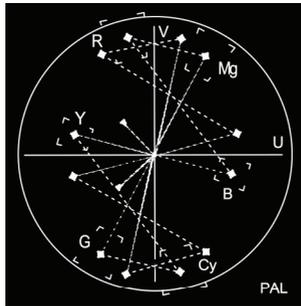


Abb. 22.11: Vektordarstellung eines PAL-Signals (100% Farbbalken)

Sinn des Wechsels in der Phasenlage: Phasenfehler, die bei der Übertragung auftreten werden dadurch kompensiert. Dazu werden bei der Wiedergabe zwei aufeinander folgende Zeilen addiert:

$$\text{Zeile } n + \text{Zeile } (n + 1) \quad (\text{Formel 22.9})$$

Die Zeile „n“ muss dazu um eine Zeilendauer von $64 \mu\text{s}$ verzögert werden.

Die richtige Phase wird durch dieses Verfahren im Empfänger wieder hergestellt, allerdings sind die Farbsignale anschließend etwas entsättigt, d.h. ein Phasenfehler wird in einen Sättigungsfehler umgewandelt.

22.1.2.6. NTSC

NTSC = National Television Systems Committee

NTSC ist das Farbfernsehsystem in den USA. Hier werden U und V um 33° gedreht, es entstehen dadurch die Signale I und Q:

- Quantisierung bei der geschlossenen Kodierung: 8 Bit oder 10 Bit bei $1,33 V_{SS}$

Komponenten-Kodierung (in Europa mit 625 Zeilen und 50 Hz)²⁰

- Ausgangssignal Y, C_R , C_B
- Abtastfrequenz: 13,5 MHz für Y-Signal, 6,75 MHz für C_R und C_B
- Anzahl der Samples pro Zeile Gesamt: Y = 864, C_R und C_B = 432
- Anzahl der Samples pro Zeile Bildinhalt: Y = 720, C_R und C_B = 360
- Quantisierung: 8 Bit oder 10 Bit
- Das Ergebnis ist das sog. „4:2:2-Signal“
(Dies bezieht sich auf die Abtastraten 13,5 MHz = „4“ und 6,75 MHz = „2“)

22.1.3.2. Datenmultiplex bei 4:2:2

Um das 4:2:2-Videosignal auf einen seriellen Datenkanal übertragen zu können, werden die parallel anliegenden Abtastwerte in einem Zeitmultiplexverfahren sortiert (Abb. 22.13).

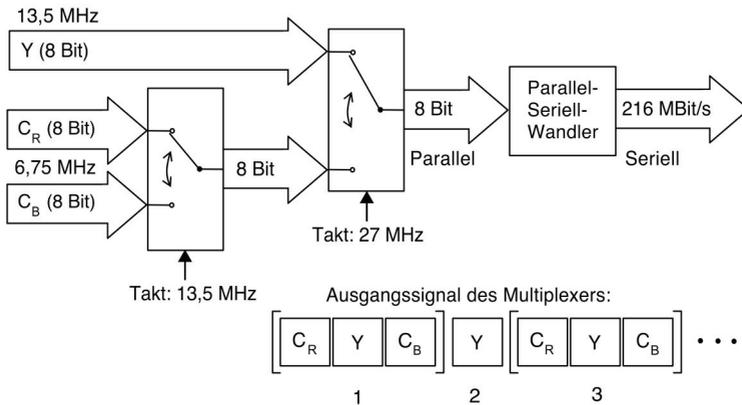


Abb. 22.13: Datenmultiplex bei 4:2:2

22.1.3.3. Serial Digital Interface (SDI)

Abb. 22.14 zeigt das Prinzip dieser digitalen Schnittstelle:

²⁰ vgl. Schmidt, 2000, Seite 101

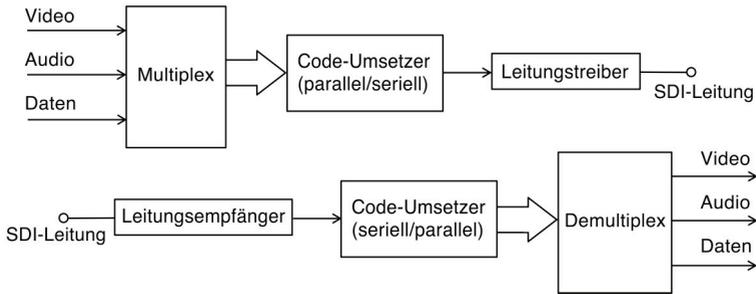


Abb. 22.14: Blockschaltbild SDI-Sender und -Empfänger²¹

Die technischen Parameter von SDI:

- 8 Bit oder 10 Bit mit $0,8 V_{SS}$
- Berechnung der Datenrate bei 8 Bit Quantisierung:
 $(13,5 \text{ MHz} + 2 \cdot 6,75 \text{ MHz}) \cdot 8 \text{ Bit} = 216 \text{ MBit/s}$
- Berechnung der Datenrate bei 10 Bit Quantisierung:
 $(13,5 \text{ MHz} + 2 \cdot 6,75 \text{ MHz}) \cdot 10 \text{ Bit} = 270 \text{ MBit/s}$
- Aufgrund der großen Bandbreite des SDI-Signals mit 135 MHz ist eine Übertragung über eine Koaxialleitung nur mit maximalen Leitungslänge von ca. 250 m möglich²²
- Weiterentwicklung:
 - HD-SDI: bis zu 1,485 GBit/s über eine Leitung, bei Parallelschaltung von zwei Kabeln bis zu 2,97 GBit/s
 - 3G-SDI: 2,97 GBit/s mit nur einem Kabel²³

22.1.3.4. MPEG-Datenkompression

Das MPEG-Verfahren²⁴ beschreibt die Codierung von Bild, Ton und Daten. Es wird beim Digital Video Broadcasting (DVB) wie auch für die Digital Versatile Disc (DVD) eingesetzt. MPEG nutzt verschiedene Verfahren zur Videodatenkompression:²⁵

1. Den Farbraum: Der Mensch nimmt Helligkeitsänderungen mit größerer Sensibilität wahr im Vergleich zu Farbunterschieden. Deshalb wird zur MPEG-Codierung nicht das RGB-Videosignal mit der vollen Bandbreite

²¹ vgl. Schmidt, 2000, Seite 113

²² s. Kap. 22.2 „Videosignalverteilung“

²³ vgl. Fluch, 2008, Seite 41

²⁴ MPEG = Motion Pictures Experts Group

²⁵ vgl. CT-Magazin, 11/2003

herangezogen, sondern das YUV-Signal. Die Luminanz Y wird für jedes Pixel gespeichert, die Farbdifferenzkomponenten U und V dagegen nur für jeweils zusammengefasste 2x2-Pixel-Blöcke. Dieses Farbmodell nennt sich daher YUV 4:2:0.

- Die Diskrete Kosinus-Transformation (DCT): Die DCT wandelt die Helligkeits- und Farbwerte ähnlich wie bei der Fourier-Transformation in Frequenz-Parameter um. Dazu wird ein Bild in Blöcke zu je 8x8 Zellen aufgeteilt, in die oberste linke Zelle wird die mittlere Helligkeit oder Farbe des Blocks geschrieben. Die übrigen Zellen repräsentieren die Frequenz-Parameter. Die Zelle unten rechts enthält die Information für die sehr feinen Bildstrukturen mit hoher Frequenz (Abb. 22.15).

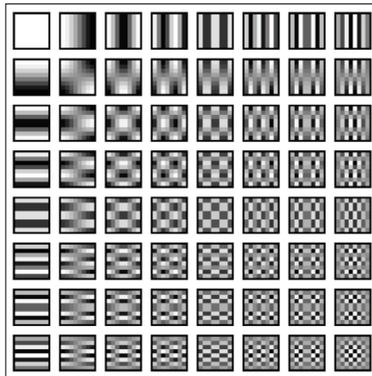


Abb. 22.15: DCT

- Quantisierung: Die Werte der DCT-Koeffizienten werden durch Zahlen aus einer Quantisierungsmatrix dividiert. Das Ziel ist dabei, sehr feine Bildstrukturen verschwinden zu lassen, da diese sowieso nur mit Mühe wahrnehmbar wären.
- Group of Pictures (GOP): Aufeinander folgende Bilder einer Videosequenz ähneln sich meist sehr stark und daher muss nicht jedes Einzelbild vollständig übertragen werden; Differenzinformationen reichen völlig aus. In einer GOP gibt es daher nur jeweils ein Intra-Frame (I) mit den vollständigen Daten eines Einzelbildes. Es folgen in einer festgelegten Reihenfolge Predicted- und Bidirectional-Frames (P und B). P-Frames enthalten die Differenzen zum vorhergehenden Frame, B-Frames sowohl zu dem vorhergehenden als auch zu dem nachfolgenden Frame. Eine GOP mit 12 Frames sieht dann so aus wie in Tabelle 22.1 dargestellt.

Tabelle 22.1: Group of Pictures

Nr.	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
Frame	I	B	B	P	B	B	P	B	B	P	B	B

Durch MPEG sind verschiedene Bildauflösungen und Tondatenkompressionsraten definiert z.B. für Internetanwendungen, Standard Definition oder High Definition TV. Die Datenraten reichen dabei von 1,5 bis 80 MBit/s.

- MPEG-1: Komprimierte Video- und Tondaten z.B. auf Video-CDs. In MPEG-1 Layer 3 ist die Komprimierung von Audiodaten definiert, die auch kurz als MP3 bezeichnet wird
- MPEG 2: Komprimierte Video- und Tonübertragung in Fernsehqualität (z.B. für DVB und DVD)
- MPEG-4: Container-Format für Video, Audio und weitere Daten (z.B. dem DRM = Digital Rights Management); Für die Übertragung mit geringen Bandbreiten optimiert, z.B. Mobiltelefone
- MPEG-7: Weiterentwicklung von MPEG-4 mit weiteren Beschreibungen von multimedialen Inhalten (Multimedia Content Description Interface)

22.2. Videosignalverteilung

Zur Verteilung von analogen und digitalen Videosignalen werden Koaxialkabel mit BNC-Stecker²⁶ verwendet. Wichtig ist die richtige Anpassung: In diesem Fall wird mit Leistungsanpassung gearbeitet, d.h. der Ausgangs- und Eingangswiderstand ist gleich und beträgt bei allen Videogeräten 75 Ω (Abb. 22.16).

$$R_a = R_e = 75 \Omega$$

(Formel 22.10)

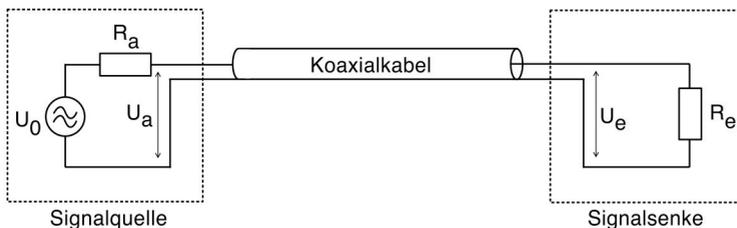


Abb. 22.16: Koaxialleitung
Bildquelle: SRT, 2000, Band 1, Seite 42

Bei einer nicht abgeschlossenen Leitung entstehen Reflexionen am offenen Kabelende. Die reflektierten, zurücklaufenden Wellen überlagern sich dem Nutzsignal und erzeugen dadurch Störungen. Eine offene Leitung ist also zu vermeiden und muss daher mit einem Abschlusswiderstand versehen werden (Abb. 22.17).

²⁶ s. Kap. 11.3.2. „Digitale Kabel und Stecker“



Abb. 22.17: 75Ω-Abschlusswiderstand und T-Stück

Zur Vermeidung von Brummschleifen kann ein Video-Trenntrafo oder ein Optokoppler in den Signalweg eingeschleift werden (Abb. 22.18).

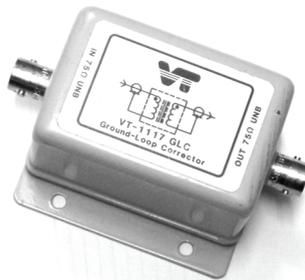


Abb. 22.18: Video-Trenntrafo

Videokabel können nicht beliebig lang ausgeführt werden. Koaxialleitungen haben aufgrund des Wellenwiderstandes eine deutliche Kabeldämpfung zu hohen Frequenzen hin.

Herleitung des Wellenwiderstandes Z_w aus den Leitungsbelägen:²⁷

$$Z_w = \sqrt{\frac{L'}{C'}} \quad (\text{Formel 22.11})$$

Einheit [Ω]

L' : Induktivitätsbelag

C' : Kapazitätsbelag

Zum Ausgleich des Pegelverlustes bei hohen Frequenzen müssen bei Kabellängen von über ca. 50 m Videoverstärker mit einer entsprechenden Entzerrung eingesetzt werden. Oft sind diese Videoverstärker auch als aktive Signalverteiler mit mehreren Ausgängen konzipiert (Abb. 22.19 und 22.20).

²⁷ s. Kap. 11.2.1. „Leitungsbeläge“; vgl. SRT, 2000, Band 1, Seite 40

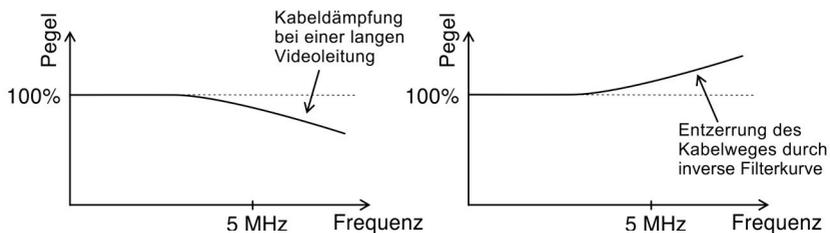
Abb. 22.19: Entzerrung des Kabelweges²⁸

Abb. 22.20: Videoverteilverstärker mit Entzerrung

Neben einadrigen Koaxialkabeln mit BNC-Steckern werden manchmal auch doppelte Koaxialleitungen mit Y/C-Stecker für eine direkte Verbindung zwischen zwei Videogeräten verwendet. Hier wird das Y- bzw. C-Signal des PAL-Encoders jeweils getrennt geführt (Abb. 22.21).²⁹

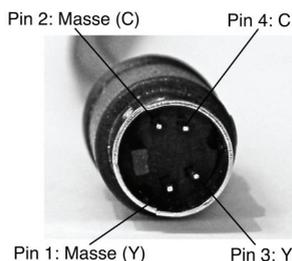


Abb. 22.21: Y/C-Stecker

Steckfelder und Kreuzschienen

Die Signalverteilung erfolgt über Videosteckfelder oder etwas komfortabler über die Koppelpunkte einer Videokreuzschiene. Kreuzschienen können analog oder digital aufgebaut sein. Die Signalumschaltung erfolgt in der vertikalen Austastlücke. Wenn die Videoquellen zueinander synchron sind, erfolgt diese Umschaltung störungsfrei. Es gibt kombinierte Video- und Audiodreuzschienen. Hier kann nach dem Prinzip „Audio follows Video“ geschaltet werden, d.h. wird eine bestimmte Videoquelle angewählt, wird das zugehörige Audiosignal mit umgeschaltet.

²⁸ vgl. SRT, 2000, Band 1, Seite 41

²⁹ vgl. Schmidt, 2000, Seite 60

22.3. Die Videokamera

In diesem Kapitel werden die optischen und elektronischen Baugruppen einer Videokamera erklärt.



Abb. 22.22: Videokamera (Sony DSR-250P)

22.3.1. Optisches System einer Videokamera

22.3.1.1. Objektiv

Objektive bestehen aus einer Kombination von verschiedenen Linsen (Abb. 22.23). Die meisten Videokameras sind mit Zoomobjektiven ausgestattet, daneben gibt es prinzipiell aber auch die Möglichkeit Normalobjektive zu verwenden. Diese haben einen vertikalen Bildwinkel von ca. 27° , damit ergibt sich bei einem $2/3''$ -Wandler eine Brennweite von 13,7mm. Teleobjektive haben einen kleineren Bildwinkel und eine größere Brennweite, Weitwinkelobjektive dagegen einen großen Bildwinkel und eine kleine Brennweite. Die Linsen sind zur besseren Lichtausbeute und Entspiegelung mit sehr dünnen Metalloxid-Schichten vergütet.³⁰

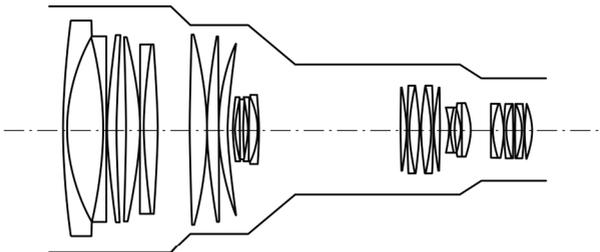


Abb. 22.23: Linsen eines Zoomobjektivs³¹

³⁰ vgl. Schmidt, 1996, Seite 246 und Mueller, 2004, Seite 125

³¹ vgl. Canon, 2005, Whitepaper #2, Seite 1

Blende

Im Objektiv befindet sich eine Irisblende mit veränderlichem Durchmesser. Die Blende reguliert den Lichteinfall und begrenzt den nutzbaren Bereich der Linse. Dadurch werden Abbildungsfehler im Randbereich vermindert.

- Blendenzahl $F = \text{Brennweite } f / \text{Blendendurchmesser } d$
- Blendenstufen: Die Blendenstufen basieren auf dem Faktor $\sqrt{2}$. D.h. jede Stufe wird durch weiteres Multiplizieren von $\sqrt{2}$ berechnet. Die Lichtintensität halbiert sich bei Steigerung um einen Stufenwert.³²

Tabelle 22.2: Blendenstufen

Blendenstufe	1,4		2		2,8		4		5,6	etc.
Faktor		* $\sqrt{2}$		* $\sqrt{2}$		* $\sqrt{2}$		* $\sqrt{2}$		etc.

Bei einer großen (weit offenen) Blende ergibt sich eine geringe Tiefenschärfe, bei einer kleinen (geschlossenen) Blende eine hohe Tiefenschärfe (Abb. 22.24 und 22.25).

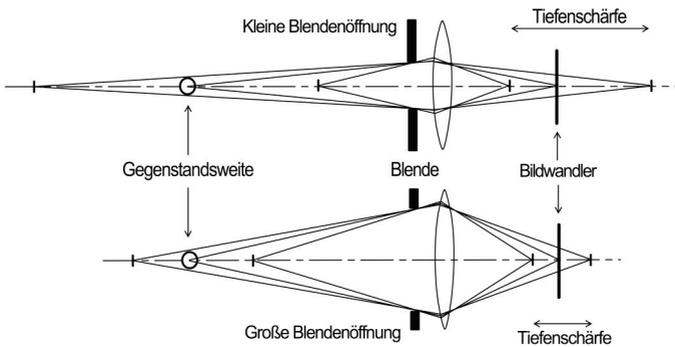


Abb. 22.24: Blendenöffnung und Tiefenschärfe



Abb. 22.25: Tiefenschärfe als Gestaltungsmittel

³² vgl. Mueller, 2004, Seite 122

Auflagemaß

Das Auflagemaß ist der Abstand zwischen der letzten Objektivlinse und dem Bildwandler. Durch Stöße oder Temperaturänderungen kann sich das Auflagemaß verändern.

Einstellen des Auflagemaßes eines Zoomobjektives: Kontrastreiches Motiv (z.B. Testkarte mit einem Siemensstern) in Tele-Stellung scharf stellen, dann herauszoomen und Schärfe über einen Monitor kontrollieren, ggf. Auflagemaß mit der Arretierschraube verändern.

22.3.1.2. Filter

Vor dem Bildwandler befinden sich mehrere optische Filter:

- Konversionsfiltrerrad: Verschiedene Filter zur Anpassung an die Farbtemperatur (z.B. 3200 K bei Kunstlicht oder 5600 K bei Tageslicht) und Grau- bzw. Neutraldichtefilter (ND-Filter) zur Abschwächung der Lichtintensität
- Infrarotsperrefilter: Das für uns Menschen nicht sichtbare Infrarotlicht wird vor der Bildwandlung herausgefiltert, da der Bildwandler in der Kamera im Gegensatz zu unseren Augen auch für Infrarotlicht empfindlich ist
- Bei fein gegliederten Bildinhalten kommt es zur Überlagerung von Bild- und Pixelstruktur (=Aliasing-Fehler). Durch eine optische Defokussierung lässt sich dieser Abbildungsfehler vermindern.³³

22.3.2. Bildwandler

22.3.2.1. Videokameras mit CCD-Bildwandler

Die ersten CCD (= Charge Coupled Devices) wurden Anfang 1960 von den Bell Laboratories in den USA gebaut. Eigentlich sollte ein neues Speichermedium für Computer entwickelt werden, aber es fiel auf, dass ein CCD auf Licht reagiert. Somit tat sich eine neue Anwendung als Chip für die Bilderfassung auf.

Ein CCD ist im Prinzip eine Matrix aus Fotodioden, welche Lichtenergie von Photonen in elektrische Energie umwandelt. Schieberegister transportieren die elektrischen Ladungen zu einem Verstärker. Bildpunkte können nicht einzeln ausgelesen werden, sondern es wird immer nur die integrierte Ladung einer Zeile durch das Schieberegister abgeleitet. Das Auslesen aller Zeilen geschieht parallel, anschließend werden seriell die Ladungen in einem Ausgangsknoten an der Ecke des Chips gesammelt.³⁴ Obwohl die Spannungen an den Elektroden, die den Transport der Ladung bewirken, nur wenige diskrete Zustände annehmen, ergibt die lichtabhängig gesammelte Ladung ein analoges Signal.

³³ vgl. Schmidt, 1996, Seite 239 und 250

³⁴ vgl. Göhring, 2002, Seite 10-14

CCD-Zelle

Eine CCD-Speicherzelle besteht aus einem MOS-Kondensator wie in Abb. 22.26 dargestellt. MOS = Metal Oxid Semiconductor.

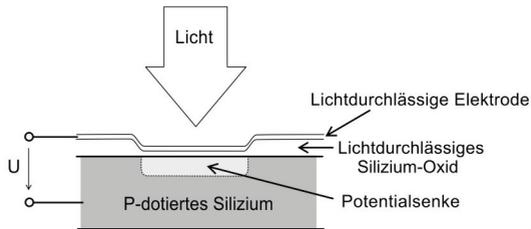


Abb. 22.26: Aufbau einer CCD-Speicherzelle
Bildquelle: Schmidt, 1996, Seite 229

Ladungstransfer über eine CCD-Zeile

Mehrere aneinander gereihete CCD-Speicherzellen ergeben eine CCD-Zeile. Durch die Veränderung der Spannungsniveaus zwischen den einzelnen Zellen kann die Ladung von einer Speicherzelle zur nächsten weitertransportiert werden. Es erfolgt eine räumliche Verschieben der Ladung zu Zellen hin, die ein noch niedrigeres Potential haben. Damit wird die Ladung über eine ganze CCD-Zeile transportiert.

Blooming: Bei zu großer Lichtmenge wird die Speicherkapazität überschritten. Überschüssige Ladung gelangt zu angrenzenden CCD-Zellen und verursacht um die überbelichtete Zelle herum ein fehlerhaftes, zu helles Bild³⁵

CCD-Bildwandlerfläche

Eine CCD-Bildwandlerfläche wird aus CCD-Zeilen zusammengesetzt. Durch die MOS-Zellen wird das Bild bei der Wandlung sowohl horizontal als auch vertikal in Bildpunkte (=Pixel) zerlegt. Aber nicht alle CCD-Zellen eines Chips werden zur Bildwandlung genutzt. CCD weisen einen Dunkelstrom auf, der mit Hilfe von lichtdicht abgedeckten Pixeln (Optical Black) korrigiert werden kann (Abb. 22.27).

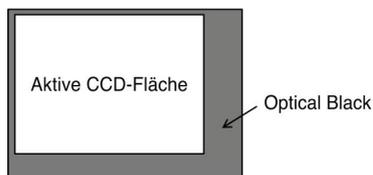


Abb. 22.27: CCD-Bildwandler und Optical Black
Schmidt, 1996, Seite 231

³⁵ vgl. Göhring, 2002, Seite 23

Für die CCD-Abmessungen wurden die Maße der Wandlerflächen von den alten Röhrenbildwandlern übernommen. In professionellen Kameras werden meist 2/3“-CCD eingesetzt. Eine möglichst große Anzahl von Pixeln muss also auf einer relativ kleinen Fläche untergebracht werden. Fehler beim Fertigungsprozess lassen sich aber nicht vermeiden und deshalb müssen die CCD geprüft und selektiert werden. CCD mit Fehlstellen (=Flaw) werden für preiswerte Kameras verwandt, die dann mit Hilfe elektronischer Maßnahmen die Fehler verdecken müssen.

Speicherbereiche

Die Ladungen der Zellen müssen fernsehnormgerecht ausgelesen und zu einem seriellen Signal geformt werden. Da zur Erzielung einer hohen Empfindlichkeit die Ladung in den Zellen möglichst lange aufintegriert werden soll, müssen Ladungssammel- und Auslesevorgang getrennt werden. Dies geschieht durch die Nutzung von separaten Speicher-Bereichen. Die verschiedenen CCD-Typen werden hinsichtlich der Anordnung ihrer Speicherbereiche in FT-, IT- und FIT-Chips unterschieden.

Frame Transfer (FT)

Unter einem lichtempfindlichen Sensorteil befindet sich ein lichtdicht abgedeckter Speicherbereich. Die Ladungen der CCD-Zeilen werden während der aktiven Halbbilddauer gesammelt. Während der Vertikalaustastung werden die Ladungen in den Speicherbereich verschoben. In dieser Zeit muss die Sensorfläche durch eine rotierende Flügelblende lichtdicht abgedeckt werden. Am Ausgang des horizontalen Ausleseregisters kann letztlich die Ladung eines Bilds abgegriffen werden (Abb. 22.28).

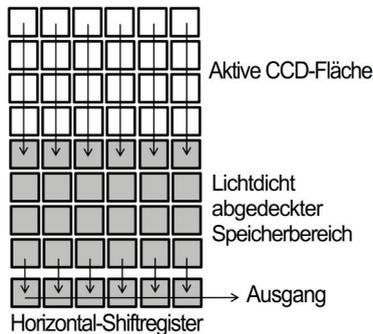


Abb. 22.28: FT Prinzip³⁶

Von Vorteil ist die hohe Pixeldichte und damit eine hohe Empfindlichkeit und gute Auflösung. Ein Nachteil ist die mechanische Blende.

³⁶ vgl. Schmidt, 1996, Seite 233

Interline Transfer (IT)

Der Speicherbereich liegt hier in der Bildwandlerfläche unter lichtgeschützten vertikalen Spalten (Abb. 22.29).

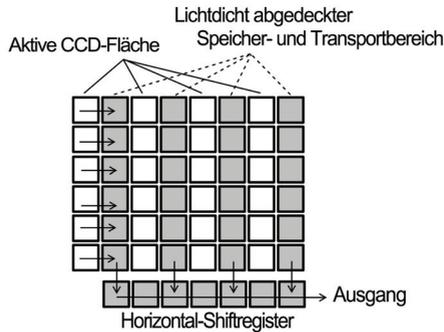


Abb. 22.29: IT Prinzip³⁷

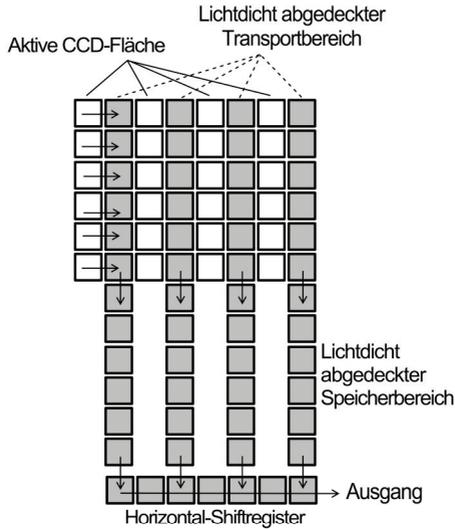
- Vorteil: Keine Lichtabdeckung während des Auslesevorgangs nötig. Sehr schnelle Ladungsübernahme in den Speicherbereich
- Nachteil: Geringe Pixeldichte und Anfälligkeit für den sog. Smear-Effekt, d.h. Licht gelangt in das Transportregister und verfälscht die Ladung. Im Bild ist das als senkrecht verlaufender heller Strich zur erkennen

Frame-Interline-Transfer (FIT)

Das Frame-Interline-Prinzip ist eine Kombination von IT- und FT-Technik. Es gibt hier also Speicherspalten in der Sensorfläche und einen zusätzlicher Speicherbereich unterhalb des Bildwändlers (Abb. 22.30).

- Vorteil: Keine mechanische Blende. Smear-Effekt stark reduziert
- Nachteil: Hoher technischer Aufwand bei der Fertigung. Geringe Pixeldichte

³⁷ vgl. Schmidt, 1996, Seite 235

Abb. 22.30: FIT Prinzip³⁸

Lens on Chip

Durch Mikrolinsen auf dem CCD-Chip wird Licht, das auf die abgedeckten Bereiche fällt, in den lichtempfindlichen Bereich gelenkt. Dadurch wird zum einen die Lichtausbeute erhöht und zum anderen der Smear-Effekt reduziert.³⁹

Elektronischer Shutter

Durch den elektronischen Shutter wird die Belichtungszeit verkürzt um auch schnelle Bewegungsabläufe ohne Unschärfe darstellen zu können. Die normale Belichtungszeit beträgt 1/50-Sekunden. Mit Shutter sind z.B. 1/100, 1/500, oder 1/1000 möglich. Verfügt die Kamera über die Funktion „Clear Scan“, dann ist auch eine stufenlose Einstellung der Belichtungszeit möglich (Anwendung: Abfilmen von Computermonitoren ohne störende Interferenzstreifen). Im Shutter-Betrieb sinkt die Empfindlichkeit des Bildwandlers, daher muss zum Ausgleich die Blende oder die Verstärkung verändert werden.⁴⁰

Empfindlichkeit von CCD-Chips

FT-CCD sind aufgrund der größeren Pixel prinzipiell empfindlicher als IT- und FIT-CCD. Die meisten Videokameras benötigen eine Beleuchtungsstärke von 2000 Lux um bei Blende 8 einen Videopegel von 100% zu erreichen.⁴¹ Eine

³⁸ vgl. Schmidt, 1996, Seite 235

³⁹ vgl. Schmidt, 1996, Seite 236

⁴⁰ vgl. Schmidt, 1996, Seite 238

⁴¹ vgl. Schmidt, 1996, Seite 238

Zusätzliche Verstärkung ist meist möglich, allerdings vermindert sich dann der Signal-Rauschabstand (Maximalverstärkung +18 dB).

Rauschen

In Bildwandlern treten zwei Arten von Rauschen auf:

1. Thermisches Rauschen, auch Dunkelstromrauschen genannt
2. Fixed Pattern Noise durch Unregelmäßigkeiten beim CCD-Aufbau

Der Signal-Rausch-Abstand eines CCD-Bildwandlers beträgt ca. 60 dB.

Farbbilderzeugung mit drei Wandlern

Das einfallende Licht wird durch einen Prismensatz mit dünnen Beschichtungen auf dem Glas, welche Licht frequenzselektiv absorbieren bzw. reflektieren (dichroitische Schichten) in die Spektralfarben Rot, Grün und Blau zerlegt (Abb. 22.31).

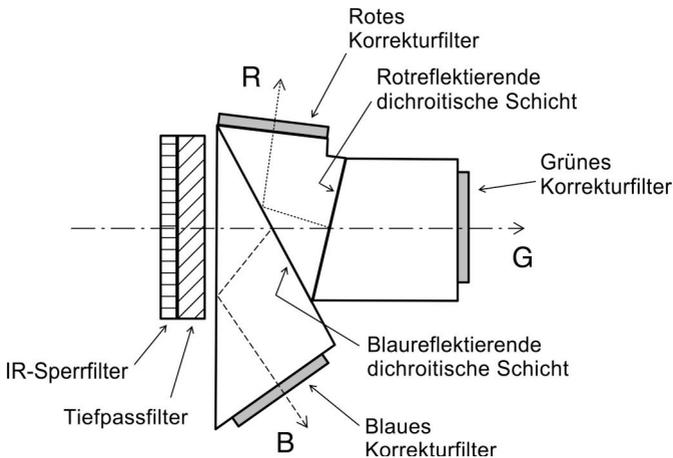


Abb. 22.31: Strahlenteilerprisma

Nachteil des Strahlenteilers: Es ergibt sich ein langer Strahlengang für das einfallende Licht, d.h. die Brennweiten der Optiken müssen darauf angepasst werden.

Bildformatwechsel bei CCD-Kameras

Die 16:9-Bilderzeugung kann bei einem 4:3-Wandler mit einem anamorphotischen Objektivvorsatz erfolgen. Bei der Wiedergabe wird das Bild dann wieder elektronisch auseinander gezogen. Nachteil dieser Methode: Horizontale Auflösungsverluste (Abb. 22.32).

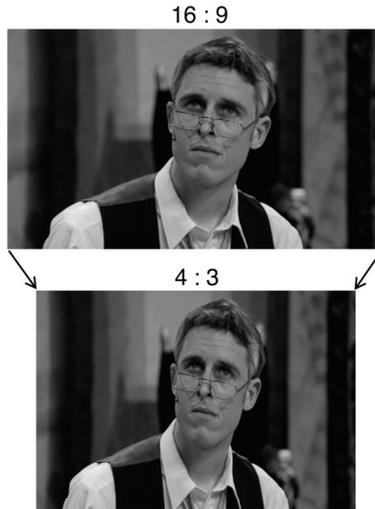


Abb. 22.32: Anamorphote Bildkompression

Recht einfach kann das 4:3-Format mit einem 16:9-Wandler erzeugt werden. Die Seitenbereiche werden für 4:3 beschnitten. Nachteil: Bildinhalte in den abgeschnittenen Randbereichen gehen verloren (Abb. 22.33).

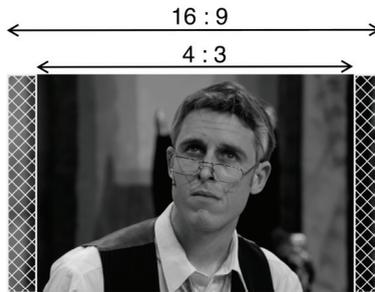


Abb. 22.33: Bildbeschnidung

Beim Dynamic Pixel Management (DPM) werden die Bildpunkte in der Vertikalen in Subpixel unterteilt (Abb. 22.34):

- Format 4:3 → vier Subpixel ergeben einen Bildpunkt
- Format 16:9 → drei Subpixel ergeben einen Bildpunkt, gleichzeitig ergibt sich aber eine Reduzierung der vertikalen Abtastung

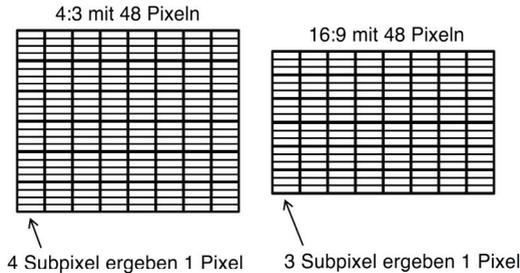


Abb. 22.34: Dynamic Pixel Management
Bildquelle: Schmidt, 1996, Seite 245

22.3.2.2. Videokameras mit CMOS-Chip

Im Gegensatz zum CCD wird bei einem CMOS-Sensor die bei der Belichtung angesammelte Ladung nicht zu einem einzigen gemeinsamen Ausleseverstärker verschoben, sondern in jedem einzelnen Pixel ist ein Verstärker integriert. Die Fotodiode und die Ausleseelektronik sind also für jedes Pixel kombiniert. D.h. das Ladungspaket, welches die Fotodiode gesammelt hat, wird noch im Pixel ausgewertet und in eine Spannung gewandelt. Anschließend wird diese Spannung in fortlaufenden Spalten und Zeilen zum Analogprozessor des Chips geleitet.

Das Prinzip eines CMOS-Chips besteht also darin, alle Bildpunkte einzeln zu verdrahten. Obwohl die Idee für einen derartige Bilderfassung bereits in den 1970er Jahren bestand, wurden erst Anfang der 1990er funktionierende Systeme gebaut. Es mussten Herstellungsverfahren entwickelt werden, welche die Fertigung von CMOS-Chips mit einer guten Bildqualität ermöglichten.⁴²

Vorteile von CMOS-Bildsensoren gegenüber CCD⁴³

- Frei wählbarer Pixelzugriff
- Hohe optische Helligkeitsdynamik
- Hohe Bildraten
- Großer Temperaturbereich
- Geringer Leistungsverbrauch
- Kein Smearing und Blooming

Processing and Signalfluss

Das analoge Ausgangssignal des Sensors wird um einen festen Betrag verstärkt und zum AD-Wandler geleitet. Dazwischen befinden sich keine weiteren Bauelemente. Das Processing wird komplett auf der digitalen Ebene ausgeführt.

⁴² vgl. Göhring, 2002, Seite 15

⁴³ vgl. Institut Mikroelektronische Schaltungen und Systeme, 2007

Zuerst wird der Schwarzpegel individuell für jedes Pixel korrigiert. Dann erfolgen Farb-Rekonstruktion und Farb-Management. Weiterhin wird digital der Dynamikumfang erweitert. Alle diese Berechnungen müssen in Echtzeit geschehen.

Farb-Rekonstruktion

Auf einem CMOS-Sensor ist ein Farbfilter angebracht. Entweder in Form eines Streifenfilters oder bei professionellen Kameras das sog. Bayer-Filter (Abb. 22.35).

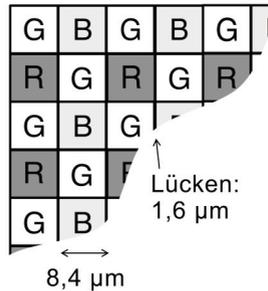


Abb. 22.35: Ausschnitt eines Bayer-Filters⁴⁴

Die Hälfte des Bayer-Filters ist Grün und je ein Viertel Rot bzw. Blau. Diese Gewichtung der Farben und das nachfolgende Farb-Processing sollen dem menschlichen Sehvermögen entsprechen.⁴⁵ Denn die Raw-Bayer-Daten stellen erst einmal nur ein monochromes Bild dar, in welchem jedes Pixel nur einen spezifischen Farbwert hat. Um ein Farbbild zu erhalten, müssen die Farbinformation auf Basis der Rohdaten rekonstruiert werden. Die Farben Rot, Grün und Blau werden also für jeden Bildpunkt berechnet. Bei der Farbkodierung wird zum einen die Kenntnis von den Überlappungen im Farbspektrum genutzt. Weiterhin werden die Werte der Nachbarpixel analysiert und in die Farbberechnung jedes einzelnen Pixels mit einbezogen.

Die digitale Signalverarbeitung muss diese Berechnung in Echtzeit leisten. Dabei ist die Rekonstruktion der Farbinformationen bei einer Ein-Chip-Kamera alles andere als einfach und es kann sichtbare Artefakte geben.⁴⁶ CMOS-Kameras mit nur einem Bildsensor haben dagegen aber nicht die Probleme, die CCD-Kameras mit Strahlteiler und drei Chips haben: Ungenaue Ausrichtung der einzelnen Sensoren und ein Auseinanderdriften der separaten Signalwege werden bei der CMOS-Technik vermieden.

⁴⁴ vgl. FKT, 06/2008, Seite 333

⁴⁵ vgl. FKT, 06/2008, Seite 318 (Autor: Prof. Dietrich Sauter);

s. Abb. 22.4 und 22.7 in diesem Kapitel

⁴⁶ vgl. ARRI, 2003

Tabelle 22.3: Vergleich CCD- und CMOS-Bildwandler⁴⁷

CCD	CMOS
Drei Chips; Einer für je eine Grundfarbe	Ein Chip mit Bayer-Filter für die Grundfarben
Direkter Abgriff der Farbsignale an den einzelnen CCD-Chips	Aufwendiges Processing für die Farbkodierung notwendig
Durch Strahlteiler spezielle Optiken mit angepasster Brennweite	Standard- (Film-) Optiken können verwendet werden
Lichtempfindlicher	Höhere Bildrate
Aufwendiger Formatwechsel	Meist größere Bildfläche, daher Formatwechsel einfacher

22.3.3. Kameraelektronik

Eine Kamera-Elektronik wie in Abb. 22.36 kann in folgende Baugruppen unterteilt werden:

- Objektivsteuerung
- Synchronsignalerzeugung
- Bildsignalbearbeitung

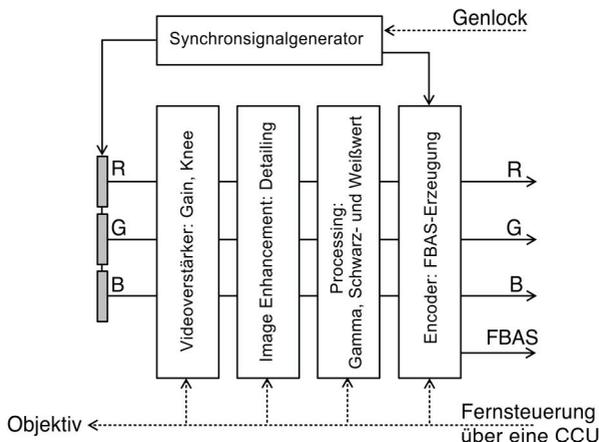


Abb. 22.36: Blockschaltbild Kameraelektronik
Bildquelle: Schmidt, 1996, Seite 253

⁴⁷ vgl. FKT, 06/2008, Seite 319 (Autor: Prof. Dietrich Sauter)

22.3.3.1. Objektivsteuerung

Zoom und Schärfe werden mechanisch oder über Servomotoren durch den Kameramann bzw. die Kamerafrau kontrolliert.

Die Blende und ein Filterwechsel können dagegen mit Hilfe einer Camera Control Unit (CCU) auch durch einen Bildtechniker ferngesteuert werden.

22.3.3.2. Synchronsignalerzeugung in der Kamera

Ein Synchronsignalgenerator in der Kamera erzeugt die Zeitstruktur gemäß der Fernsehnorm, d.h. die H- und V-Impulse, das Austastsignal und die Farbträgerfrequenz werden generiert. Es ist auch eine Fremdsynchronisierung der Kamera im Gen-Lock-Betrieb möglich.

22.3.3.3. Bildsignalbearbeitung in der Kamera

Vorverstärkung

Durch die Vorverstärkung von bis zu +18 dB können unzureichende Beleuchtungsstärken ausgeglichen werden. Allerdings vermindert sich dabei der Signal-Rausch-Abstand.

Shading

Das Shading ist eine elektronische Kompensation von ungleichmäßiger Helligkeitsverteilung im Schwarz (durch verschieden große Dunkelströme) und im Weiß (durch den Helligkeitsabfall am Bildrand).

Flare

Flare ist die elektronische Kompensation einer ungleichmäßigen Aufhellung des Bildfeldes durch das vom Objektiv erzeugte Streulicht

Detailing

Die Unschärfe, die beim CCD das optische Tiefpassfilter bewirkt, wird durch das Detailing ausgeglichen. Die Kantenschärfe wird durch eine elektronische Schaltung verbessert. Nachteil der Detailing-Funktion: Es kann zu Problemen bei der Wiedergabe von Gesichtern kommen. Hier erscheint die Haut fleckig bei zu hohem Detailing. Daher erfolgt die Einstellung nach subjektiven Kriterien. Manche Kameras haben auch eine spezielle Skin-Detailing-Schaltung. Hier wird der Hautton aufgenommen und abgespeichert. Immer wenn der gespeicherte Farbton im Bild auftritt, wird das Detailing für diesen Bereich herabgesetzt

Die Kamerakennlinie

Die Kamerakennlinie oder auch Gamma-Kurve zeigt den Zusammenhang zwischen dem auf den Bildwandler treffenden Lichtstrom und dem resultierenden Videosignalwert (Abb. 22.37).

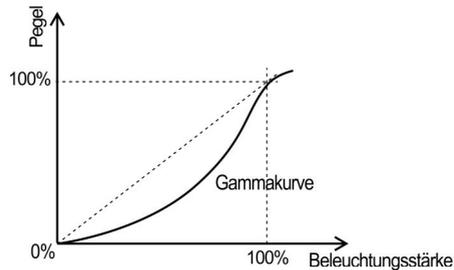


Abb. 22.37: Kamerakennlinie
Schmidt, 1996, Seite 257

Der nichtlineare Verlauf der Kamerakennlinie dient zur Kompensation des ebenfalls nichtlinearen Zusammenhangs von Videopegel und Leuchtdichte bei der Wiedergabe⁴⁸. Letztlich funktioniert auch die Helligkeitswahrnehmung des Auges logarithmisch, wie in Tabelle 22.3 dargestellt.

Tabelle 22.4: Logarithmische Helligkeitswahrnehmung⁴⁹

Lichtreflexion an unbunten Flächen (z.B. Grautreppe als Testbild)	Helligkeitswahrnehmung
100 %	Weiß
70 %	
35 %	
17,5 %	Mittleres Grau
12 %	
6 %	
3,5 %	Schwarz

Gamma-Vorentzerrung

Die Gamma-Kurve kann gezielt verändert werden um dadurch Graustufungen im Bild an das Motiv bzw. die Ausleuchtung anzupassen. Manchmal ist auch eine zusätzliche Kennlinienveränderung im dunklen Bereich möglich d.h. die Einstellung eines Gamma-Wertes im Schwarz (Abb. 22.38).

⁴⁸ vgl. Schmidt, 2000, Seite 18

⁴⁹ vgl. Mueller, 2004, Seite 54

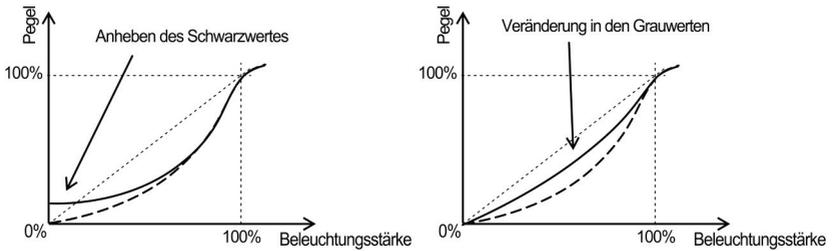


Abb. 22.38: Beispiele für eine Kennlinienveränderung
Schmidt, 1996, Seite 259

Schwarzwert

Zur Kompensierung des Dunkelstroms wird der Schwarzwert im Bezug auf das Optical Black des CCD angepasst. Dabei ist eine absichtliche Anhebung von ca. 3% zur besseren Detailwiedergabe in den dunklen Bereichen möglich. Allerdings lässt ein zu hoch eingestellter Schwarzwert das Bild flau werden. Zu tief darf der Schwarzwert aber auch nicht sein, denn das Luminanzsignal sollte nicht unter die 0V-Linie des Austastwertes reichen, hier sind nur Chrominanzwerte erwünscht (Abb. 22.39).

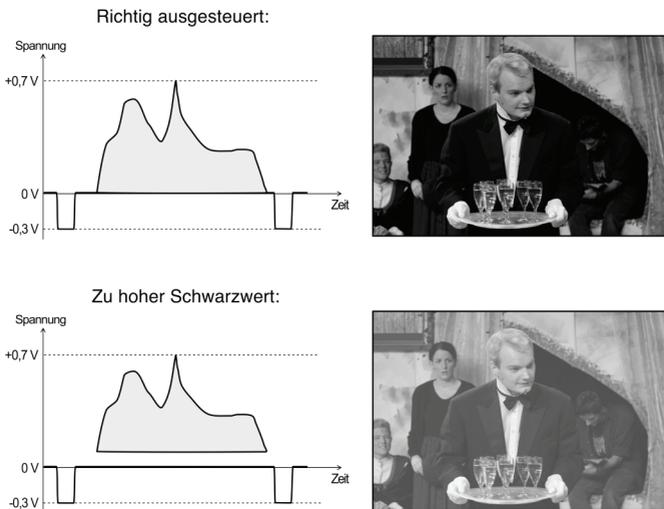


Abb. 22.39: Schwarzwerteinstellung⁵⁰

⁵⁰ vgl. Schmidt, 1996, Seite 259

Weißbegrenzung

Signalspitzen über 100% des Videosignalwertes werden durch die Weißbegrenzung (Clipping) elektronisch beschnitten. Allerdings geht dadurch die Zeichnung in den Lichtern verloren, daher wird der Clippingwert etwas höher bei ca. 105% angesetzt. Die Einstellung erfolgt zusammen mit dem Schwarzwert nach subjektiven Kriterien, d.h. es muss genug Zeichnung im Schwarz wie im Weiß vorhanden sein (Abb. 22.40).⁵¹

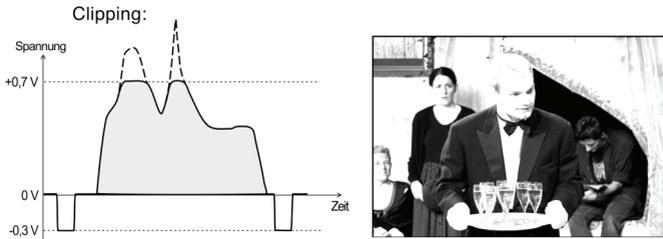


Abb. 22.40: Clipping bei Signal mit zu hohem Videopegel⁵²

Kniefunktion

Mit Hilfe der Kniefunktion wird der Kontrastumfang gesteigert durch eine Abflachung der Kennlinie zu den Lichtern hin (Abb. 22.41).

- Manuell einstellbarer Kniefunktionspunkt: Meist zwischen 80% und 110%
- Autoknie: Automatikfunktion in Abhängigkeit vom Motivkontrast

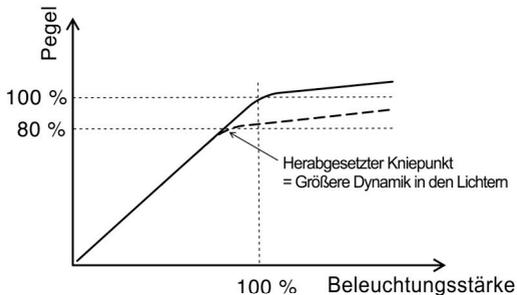


Abb. 22.41: Kniefunktion
Bildquelle: Schmidt, 1996, Seite 261

⁵¹ vgl. Schmidt, 1996, Seite 258 bis 260

⁵² vgl. Schmidt, 1996, Seite 261

Weißabgleich

Das Licht, das wir sehen kann eine unterschiedliche spektrale Zusammensetzung und Farbtemperatur haben. Tageslicht hat eine Farbtemperatur von ca. 5600 K und Kunstlicht nur ca. 3200 K. Das menschliche Auge passt sich dem Frequenzgemisch an und empfindet die Farbe einer weißen Vorlage immer als Weiß, egal ob sie bei Tages- oder Kunstlicht betrachtet wird.

Bei einer Videokamera erfolgt diese Anpassung durch den manuellen oder automatischen Weißabgleich (Automatic White Control = AWC). Dabei werden die R- und B-Verstärkung wird so eingestellt, dass bei einer weißen Vorlage die Kanäle gleiche Signalpegel haben. Dieser Abgleich ist abhängig von der Stellung des Filterrades, d.h. das richtige Filter muss eingestellt sein und darf nach dem Abgleich nicht gewechselt werden.

Für jede Lichtsituation muss ein neuer Weißabgleich vorgenommen werden. Allerdings ist die Abspeicherung verschiedener Weißabgleich-Parameter möglich, um z.B. schnell von Tages- auf Kunstlicht wechseln zu können.⁵³

Schwarzabgleich

Der Schwarzabgleich ist unabhängig von der Beleuchtung. Die Einstellung erfolgt bei geschlossener Blende manuell oder automatisch (Automatic Black Control = ABC). Die Farbkanäle haben anschließend im Schwarz gleiche Pegel.

22.3.4. Kamerazug

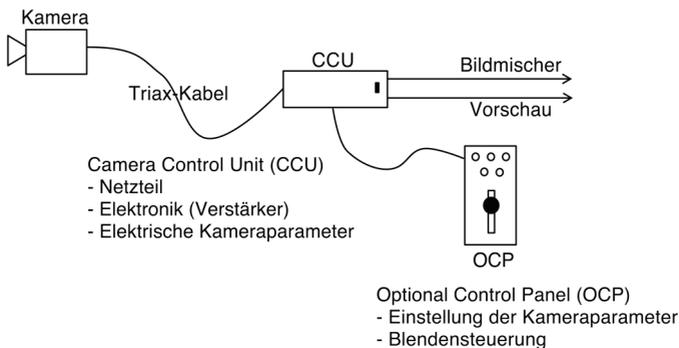


Abb. 22.42: Kamerazug

Abb. 22.42 skizziert einen Kamerazug, d.h. hier wird eine Videokamera an eine CCU angeschlossen und von der Bildregie aus kontrolliert. Die einzelnen Signale von und zur Kamera, also Video, Sync und Audio, werden im Multiplex über ein Triax-Kabel übertragen.

⁵³ vgl. Mueller, 2004, Seite 92 und 182

Über die CCU wird die Kamera mit Strom versorgt und die Kameraparameter gesteuert. Außerdem erfolgt eine Entzerrung zum Ausgleich der Kabellänge.

Das OCP ist die Bedienoberfläche der CCU, d.h. hier finden sich die Regler zur Beeinflussung der Kameraelektronik. Neben der OCP sind am Arbeitsplatz des Bildtechnikers immer auch ein guter Vorschaumonitor und Videomessgeräte (Waveformmonitor und Vektorskop) zur Beurteilung und Abgleich des Kamerabildes.

Abgleich von Videomonitoren

Wird ein Monitor zur qualitativen Beurteilung von Kamerabildern verwendet, dann sollte dieser regelmäßig abgeglichen werden. Vorgehensweise dabei:⁵⁴

- Testsignal: 75% Farbbalken
- Einstellung am Monitor im Underscan-Modus zur Erfassung des gesamten Bildbereiches
- Kontrast in Mittelstellung, Helligkeit und Farbsättigung nach links auf Anschlag drehen (= S/W-Bild)
- Schwarzwerteinstellung mit Helligkeitsregler: Der schwarze Balken soll vom Umfeld getrennt erscheinen und sich vom Blau-Balken abheben
- Kontrasteinstellung: Gelb- und Weißbalken sollen sich gut voneinander unterscheiden
- Farbsättigung: im Blue-Only-Modus sollen die Balken für Gelb, Grün, Rot und Schwarz gleichermaßen Schwarz, die Balken für Cyan, Purpur und Blau gleichintensiv blau erscheinen (75%). Das Blau im Weißbalken muss heller erscheinen (100%).



Abb. 22.43: Professioneller Videomonitor

⁵⁴ vgl. Schmidt, 1996, Seite 298

22.4. Aufzeichnung und Wiedergabe von Videosignalen

22.4.1. Magnetbandaufzeichnung (MAZ)

Das Magnetband besteht aus ferromagnetischen Materialien wie z.B. Reineisen, Eisenoxyd oder Chromdioxyd. Bei der Herstellung des Magnetbandes werden die magnetischen Teilchen, die kleiner als $1 \mu\text{m}$ sind, auf einen Träger aus Polyesterfilm aufgetragen. Eine Schutzschicht auf der Vorderseite des Magnetbandes schützt vor Korrosion, eine antistatische Rückseitenbeschichtung verbessert die Auf- und Abwickeleigenschaften (Abb. 22.44).⁵⁵



Abb. 22.44: Schnittzeichnung Magnetband

Bei einer Video-MAZ befindet sich das Magnetband in einem Kassettensystem. Video und Audio werden durch ein Schrägspurverfahren mit rotierenden Köpfen aufgezeichnet. Dazu wird das Band aus der Kassette herausgezogen und um die Kopftrommel gelegt (Abb. 22.45).

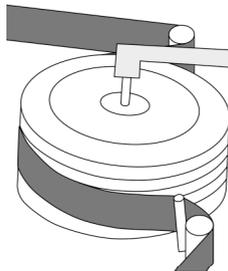


Abb. 22.45: Rotierende Kopftrommel

Professionelle analoge Videobandmaschinen, wie zum Beispiel Betacam SP, haben Eingangsbuchsen für Component-Video (Y , C_R , C_B). Bei der Aufzeichnung wird das Y -Signal auf eine Schrägspur geschrieben und C_R und C_B gemeinsam im Zeitmultiplex auf die benachbarte Spur. Die analoge MAZ wurden inzwischen

⁵⁵ vgl. Schmidt, 2000, Seite 311 bis 314

aber fast gänzlich von digitalen Formaten abgelöst. Wie in Abb. 22.46 zu sehen ist, gibt es auch Längsspuren für Audio, eine Steuerspur und den LTC. Diese Signale werden mit feststehenden Köpfen geschrieben und ausgelesen. Für Videosignale sind Längsspuren nicht geeignet, da hier die obere Grenzfrequenz zu niedrig liegt.⁵⁶

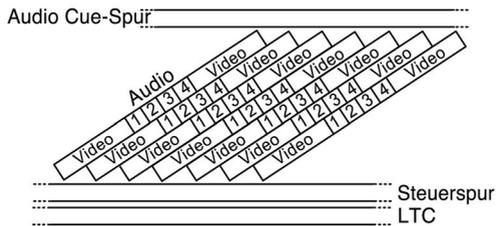


Abb. 22.46: Spurbild einer digitalen MAZ

Ableitung der Grenzfrequenz f_g ⁵⁷

Die Spaltbreite des Kopfes bestimmt den kleinsten magnetisierbaren Bereich auf dem Band und damit die minimale Wellenlänge des aufzuzeichnenden Signals:

$$d \approx \frac{\lambda}{2} \quad (\text{Formel 22.12})$$

d : Spaltbreite [m]

λ : Bandwellenlänge [m]

Die Grenzfrequenz f_g hängt wiederum ab von der Kopf-Band-Geschwindigkeit und der kleinsten möglichen Bandwellenlänge:

$$f_g = \frac{v}{\lambda_{\min}} \quad (\text{Formel 22.13})$$

v : Kopf-Band-Geschwindigkeit [m/s]

Der Spalt kann aber nicht beliebig klein konstruiert werden. Bei rotierenden Videoköpfen beträgt die Spaltbreite nur ca. 0,3 bis 0,5 μm , die obere Grenzfrequenz liegt bei ca. 20 MHz. Der Spalt der Köpfe für die Audiolängsspuren ist ca. 3 bis 8 μm groß, daraus ergibt sich eine obere Grenzfrequenz von ca. 20 kHz.

⁵⁶ vgl. Schmidt, 2000, Seite 321

⁵⁷ vgl. Schmidt, 2000, Seite 316 und 317

Digitale MAZ-Formate in Standard Definition (SD):

- Bildseitenverhältnis von 4:3
- z.B. DVC Pro, Betacam SX, Digital Betacam und D5

Tabelle 22.5: Vergleich einiger digitaler SD-Videoformate (4:3)

	Betacam SX	DVC Pro	Digital Betacam	D5
Hersteller	Sony	Panasonic	Sony	Panasonic
Quantisierung	8 Bit	8 Bit	10 Bit	10 Bit
Kompressionsfaktor	10:1	5:1	2:1	Keine Kompression
Signalverarbeitung	4:2:2	4:1:1	4:2:2	4:2:2
Videodatenrate	18 MBit/s	25 MBit/s	126 MBit/s	270 MBit/s
Audio	48 kHz/16 Bit (4 Kanäle)	48 kHz/16 Bit (4 Kanäle)	48 kHz/20 Bit (4 Kanäle)	48 kHz/16 Bit (4 Kanäle)
Magnetband	1/2"	1/4"	1/2"	1/2"

Digitale MAZ-Formate in High Definition (HD):

- Bildseitenverhältnis von 16:9
- z.B. HDCam, DVC Pro HD, HD-D5 und HDCam SR

Tabelle 22.6: Vergleich einiger digitaler HD-Videoformate (16:9)

	HDCam	DVC Pro HD	HD-D5	HDCam SR
Hersteller	Sony	Panasonic	Panasonic	Sony
Quantisierung	8 Bit	8 Bit	10 Bit	10 Bit
Kompressionsfaktor	4:1	6,7:1	4,4:1	4,2:1
Signalverarbeitung	3:1:1	3:1,5:1,5	4:2:2	4:4:4
Videodatenrate	185 MBit/s	100 MBit/s	237 MBit/s	440 MBit/s
Audio	48 kHz/20 Bit (4 Kanäle)	48 kHz/16 Bit (8 Kanäle)	48 kHz/20 Bit (8 Kanäle)	48 kHz/24 Bit (12 Kanäle)
Magnetband	1/2"	1/4"	1/2"	1/2"

22.4.2. Video-Harddisc-Systeme

Digitale Video-Harddisc-Systeme sind RAID-Arrays von Festplatten, die als 19“-Gerät (z.B. doremi V1 siehe Abb. 22.47) oder als tragbarer Recorder (z.B. Sony HVR-DR60) erhältlich sind.

Vorteile gegenüber der MAZ:

- Sofortiger Zugriff auf die Videodaten (Random Access)
- Loop-Play
- Playlists
- Möglichkeit des nichtlinearen und nichtdestruktiven Schneidens (Non-Linear-Editing)
- Wählbare Kompressionsraten: z.B. unkomprimiert 4:4:4 (RGB und Synchronsignal) oder komprimiert 4:2:2 (YUV)⁵⁸
- Keine Kopierverluste
- Mehrkanal-Audio (z.B. 5.1 Surround)



Abb. 22.47: Video-Harddiscrecorder (doremi V1)

22.5. Bildmischer

Das zentrale Gerät bei einer Videoproduktion ist der Bildmischer, der eine Umschaltung oder Mischung von Videosignalen ermöglicht. Alle Signalquellen, die an einen Bildmischer angeschlossen sind, müssen synchronisiert werden. Meist wird er dazu erforderliche Burst von einem Farbbalkengenerator erzeugt und über einen Verteilverstärker an alle Signalquellen geleitet (Abb. 22.48 und 22.49).

⁵⁸ vgl. Schmidt, 2000, Seite 416

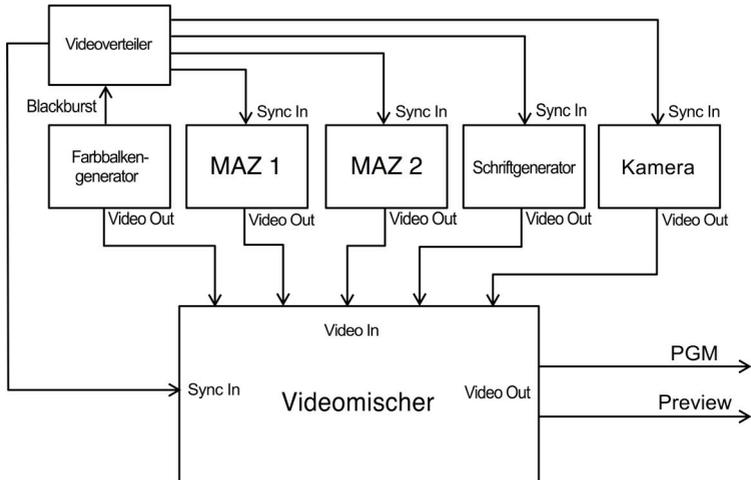


Abb. 22.48: Blockschaltbild eines Bildmischers

Signale von Videoquellen, die über keine Sync-In-Buchse verfügen, müssen über einen Time Base Corrector (TBC) geschleift werden.



Abb. 22.49: Bildmischer (Panasonic MX-70)

Ein Bildmischer hat mehrere Mischebenen (Layer), z.B. bei großen Bildmischern drei Mix- und Effect-Layer. Daneben gibt es eine Preset-Schiene (=PST), zur Voranwahl eines Videosignals. Die Programm-Schiene (=PGM) schließlich liefert das Ausgangssignal. Mischeffekte:

- Cut = Harter Schnitt
- Dissolve: = Blende
- Wipe = Trickblenden
- Key = Stanzen; Es gibt den Luma- und Chroma-Key
- DVE (Digitaler Videoeffekt): Verändern der Geometrie des Bildes

22.6. Splitscreen und Multiscreen

Splitscreen = Darstellung von mehreren Videosignalen auf einem Display, z.B. vier Bildquellen beim Quadsplit (Abb. 22.50).

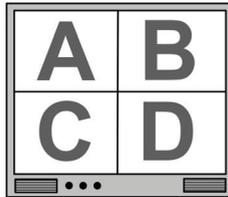
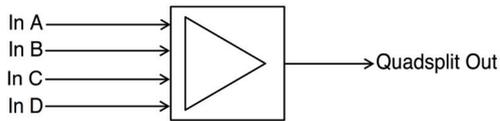


Abb. 22.50: Quadsplit

Multiscreen = Darstellung eines Videobildes über mehrere Displays verteilt.

Die Displays sollten eine gute Konvergenz haben, damit ein gleicher Helligkeits- und Farbeindruck über die gesamte Fläche gegeben ist (Abb. 22.50).⁵⁹

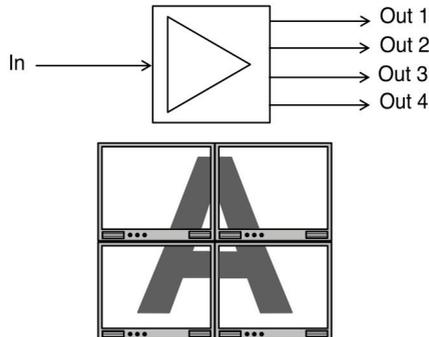


Abb. 22.51: Multiscreen mit vier Monitoren

⁵⁹ vgl. Schmidt, 2000, Seite 303

22.7. Videoprojektion

Projektionstechniken können in Auf- und Rückprojektion unterschieden werden.

Aufprojektion

- Zuschauer und Projektor sind vor der Leinwand
- Die Leinwand hat einen hohem Reflexionsgrad
- Richtcharakteristik der Leinwand: Bester Bildeindruck in der Mittelachse

Rückprojektion

- Zuschauer vor der Leinwand, Projektor dahinter
- Leinwand mit hohem Transmissionsgrad
- Geringere Lichtausbeute im Vergleich zur Aufprojektion
- Spiegelverkehrte Abbildung, d.h. es ist ein Projektor erforderlich, der das Bild entsprechend spiegeln kann

Die meisten Videoprojektoren arbeiten im sog. Multisync-Betrieb, d.h. es erfolgt eine automatische Einstellung auf verschiedene Zeilenfrequenzen (progressiv oder interlaced). Oft ist eine Vielzahl an Schnittstellen vorhanden z.B. RGB, Y/C, FBAS und VGA. Damit ist eine Projektion von Video und Daten möglich.⁶⁰

22.7.1. DLP-Projektoren

DLP = Digital Light Processing

Ein DLP-Chip (oder auch DMD = Digital Micromirror Device) besteht aus bis zu zwei Millionen beweglichen, 16 μm kleinen Spiegeln, die über elektromagnetische Felder in wenigen Mikrosekunden über eine Drehachse ausgelenkt werden können. Je nach Stellung der Spiegel wird das Licht der Projektorlampe entweder durch die Optik zur Bildwand oder seitlich auf einen Lichtabsorber reflektiert (Abb. 22.52 und 22.53). Im Prinzip kann jeder Bildpunkt also nur hell oder dunkel sein, Grauwerte werden durch die entsprechend schnelle Bewegung der Spiegel und die Trägheit des Auges hervorgerufen.⁶¹ Die Spiegel eines DLP-Chips sind mit einem Abstand von 1 μm sehr eng zusammen angeordnet, und daraus ergibt sich ein hoher Füllfaktor von ca. 88% der Bildfläche.⁶²

⁶⁰ vgl. Schmidt, 2000, Seite 300

⁶¹ vgl. Fleischer, 2004, Seite 71 und <http://www.dlp.com> (Oktober 2008)

⁶² vgl. Fleischer, 2004, Seite 74

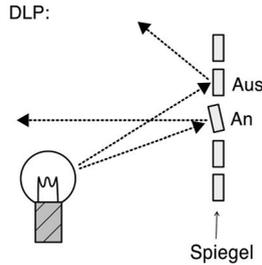


Abb. 22.52: Bewegliche Spiegel des DLP-Chips
 Bildquelle: Webers, 2008, Seite 273

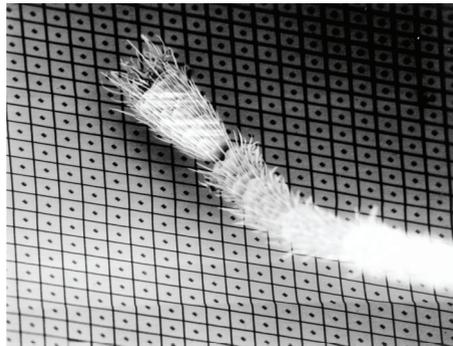


Abb. 22.53: Größenvergleich Ameisenbein und Spiegel des DLP-Chips
 Bildquelle: Texas Instruments, <http://www.dlp.com>

22.7.1.1. Farbwiedergabe bei DLP-Projektoren mit einem Chip

Ein angetriebenes Filtrerrad mit den Grundfarben Rot, Grün und Blau lässt zu einem bestimmten Zeitpunkt immer nur Licht einer Farbe passieren. Zur gleichen Zeit sind die Spiegel zur Wiedergabe genau dieses Farbkanals eingestellt, die Bewegungen der Spiegel sind also mit dem Antrieb des Filtrerrades synchronisiert. Die Farbwiedergabe erfolgt sequentiell, d.h. die Bilder der einzelnen Grundfarben werden nacheinander wiedergegeben (Abb. 22.54). Nachteil: Ein sichtbarer Farbsaum an hellen bewegten Objekten auf dunklem Hintergrund, der sog. „Regenbogeneffekt“.⁶³

⁶³ vgl. Fleischer, 2004, Seite 73

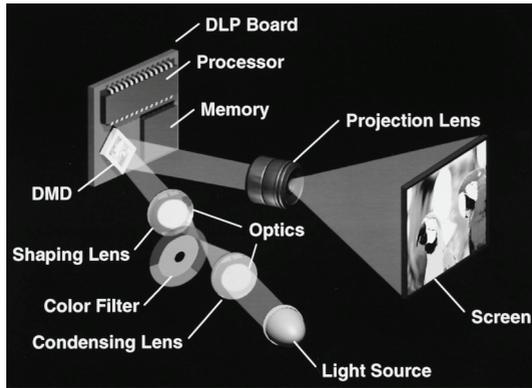


Abb. 22.54: DLP-Projektor mit einem Chip
 Bildquelle: Texas Instruments, <http://www.dlp.com>

22.7.1.2. Farbwiedergabe bei DLP-Projektoren mit drei Chips

Das weiße Licht der Projektionslampe wird hier durch ein Strahlteilerprisma in die drei Grundfarben zerlegt und zu jeweils einem DLP-Chip gespiegelt. Das reflektierte Licht der Chips wird über ein Prisma wieder zusammengeführt und über die Projektoroptik auf die Bildwand geworfen (Abb. 22.55). Drei-Chip-Projektoren sind hinsichtlich der Bildqualität deutlich überlegen, aber auch etwas teurer als Ein-Chip-Geräte.

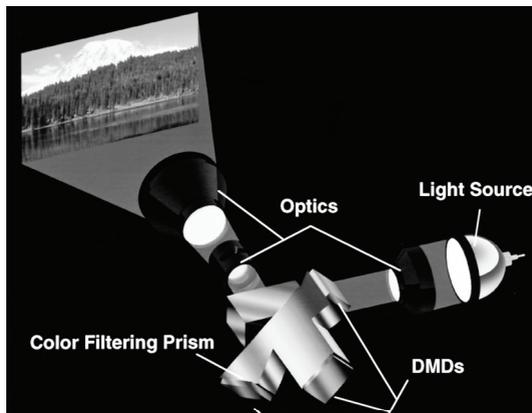


Abb. 22.55: DLP-Projektor mit drei Chips
 Bildquelle: Texas Instruments, <http://www.dlp.com>

Texas Instruments ist der einzige Hersteller von Bildwandler-Chips für DLP-Projektoren. Alle Informationen zu dieser Technik finden sich daher auch auf der entsprechenden Webseite des Herstellers unter <http://www.dlp.com> (Letzter Seitenaufruf September 2008).

22.7.2. LCD-Projektoren

LCD = Liquid Crystal Display

LCD-Projektoren beruhen auf dem Prinzip von Flüssigkristallsegmenten, die bei Anlegen einer Spannung weniger transparent werden. Das Licht einer Metalldampfampe (z.B. Xenon) strahlt durch das LCD-Panel (Abb. 22.56). Bis zu 60% der Lichtenergie werden allerdings im LCD absorbiert und in Wärme gewandelt und eine zu große Erwärmung kann das Panel zerstören. Daher wird UV- und IR-Licht vor dem Panel herausgefiltert. Das dadurch entstehende Kaltlicht belastet das LCD nicht so stark.⁶⁴

Aufgrund der Rasterung und dem Abstand zwischen den Pixeln durch die Schaltkreise beträgt der Füllfaktor bei LCD-Projektoren nur ca. 60% der Bildfläche. Dies führt auch zu einem „Fliegengittereffekt“, d.h. es entsteht bei der Projektion unter Umständen ein sichtbares Gittermuster.⁶⁵

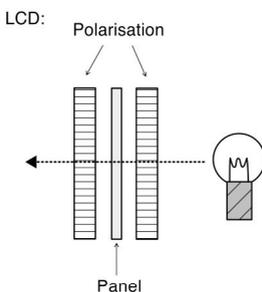


Abb. 22.56: Prinzip LCD
Bildquelle: Webers, 2008, Seite 273

⁶⁴ vgl. Schmidt, 2000, Seite 303 und 304

⁶⁵ vgl. Fleischer, 2004, Seite 68

22.7.2.1. Ein-Panel LCD-Projektor

Bei LCD-Projektoren mit einem Panel sind jeweils drei Bildpunkte zusammengefasst, die gefiltertes Licht in den Primärfarben Rot, Grün und Blau passieren lassen (Abb. 22.57).

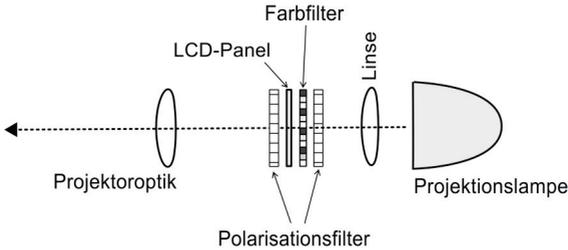


Abb. 22.57: Ein-Panel LCD-Projektor

22.7.2.2. Drei-Panel LCD-Projektor

Das weiße Licht der Projektionslampe wird durch dichroitische Spiegel mit einem frequenzselektiven Reflexionsverhalten durch dünne, aufgedampfte Schichten in die drei Grundfarben zerlegt und zu jeweils einem LCD-Panel gespiegelt. Das Licht, das durch die Panels scheint, wird über ein Prisma wieder zusammengeführt und über die Projektorlinse auf die Bildwand geworfen (Abb. 22.58).⁶⁶

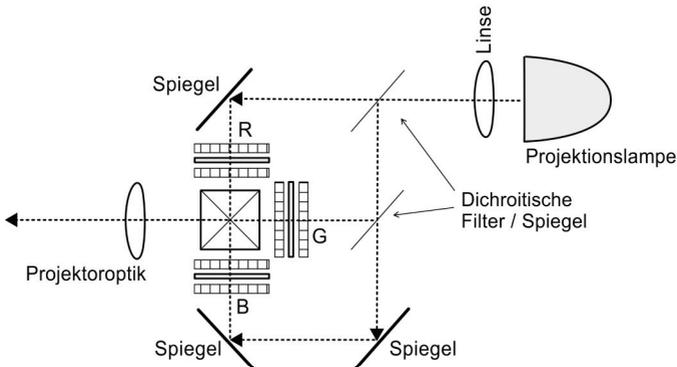


Abb. 22.58: Drei-Panel LCD-Projektor

⁶⁶ vgl. Schmidt, 2000, Seite 303

22.7.3. LCoS-Projektoren

= Liquid Crystal on Silicon

Diese Projektionstechnik ist auch bekannt unter der Abkürzung D-ILA (= Direct Driven Image Light Amplifier) bei JVC-Projektoren oder als SRXD von Sony (=Sony X-tal Reflective Display).⁶⁷

- Prinzip: Reflektives Verfahren mit Flüssigkristallen auf einer Siliziumfolie (Abb. 22.58)
- Sehr großer Füllfaktor von ca. 93% der Bildfläche, d.h. kaum noch erkennbare Abstände zwischen den Bildpunkten⁶⁸
- Nachteil: Nachzieheffekt durch eine gewisse Trägheit der LCD-Elemente

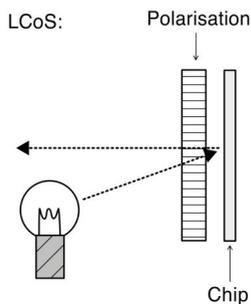


Abb. 22.59: Prinzip LCoS
Bildquelle: Webers, 2008, Seite 273

22.7.3.1. Ein-Chip LCoS-Projektor

Abb. 22.60 zeigt das Prinzip einen LCoS-Projektor mit einem Chip.

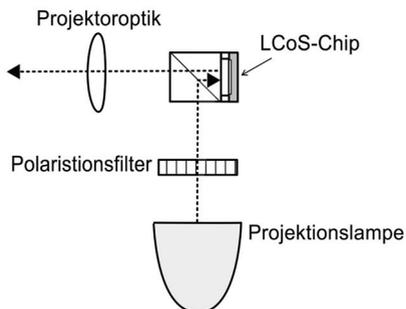


Abb. 22.60: LCoS-Projektor mit einem Chip

⁶⁷ vgl. Fleischer, 2004, Seite 76

⁶⁸ vgl. Fleischer, 2004, Seite 76

22.7.3.2. Drei-Chip LCoS-Projektor

Abb. 22.61 zeigt das Prinzip einen LCoS-Projektor mit drei Chips.

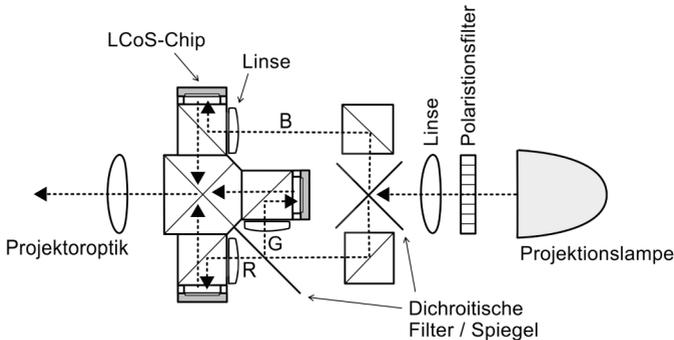


Abb. 22.61: LCoS-Projektor mit drei Chips

22.7.4. Brennweite bei Videoprojektoren

Die Brennweite von Videoprojektionen lässt sich folgendermaßen berechnen:

$$f = \frac{b}{1 + \frac{B}{G}} \quad (\text{Formel 22.14})$$

f : Brennweite [mm]

b : Abstand Projektor – Leinwand

B : Bilddiagonale der Projektion

G : Diagonale des Bildwandler-Chips

Die Diagonale der vorher aufgeführten Chips (DLP, LCD und LCoS) beträgt z.B. 1,3“ oder 1,8“, je nach Hersteller.⁶⁹

Herstellerangabe des Verhältnisses von Entfernung zu Bildbreite

Aufgrund unterschiedlicher Konstruktionen der Projektoren liefert die Formel zur Berechnung der Brennweite oft nur eine Annäherung an den wirklichen Wert. In der Regel geben die Hersteller die Brennweiten als Verhältniszahlen von Projektionsentfernung zur Bildbreite an. Zum Beispiel bedeutet die Angabe „3:1“, dass bei einer Entfernung von 3 m zur Projektionsfläche die Bildbreite 1 m beträgt. Demnach wird bei 24 m Entfernung wird das projizierte Bild 8 m breit.

⁶⁹ vgl. Mueller, 2004, Seite 195

22.7.5. ANSI-Lumen

Ein wichtiger Parameter zur Beurteilung von Projektoren ist das ANSI-Lumen⁷⁰, welches ein Messverfahren beschreibt, mit der die Bildhelligkeit ermittelt wird.

Bei der Messung wird die Leinwand in neun gleiche Rechtecke unterteilt und jeweils im Zentrum jedes Rechteckes die Beleuchtungsstärke in Lux [lx] ermittelt. Der Mittelwert der neun Messwerte multipliziert mit der Fläche des Projektionsbildes ergibt dann das ANSI-Lumen (Abb. 22.62).

\bar{E}_1	\bar{E}_2	\bar{E}_3
\bar{E}_4	\bar{E}_5	\bar{E}_6
\bar{E}_7	\bar{E}_8	\bar{E}_9

Abb. 22.62: Einteilung der Leinwand bei der ANSI-Messung

Mittelwertbildung:

$$\text{ANSI-Lumen} = \frac{\bar{E}_1 + \bar{E}_2 + \bar{E}_3 + \bar{E}_4 + \bar{E}_5 + \bar{E}_6 + \bar{E}_7 + \bar{E}_8 + \bar{E}_9}{9} \cdot A \quad (\text{Formel 22.15})$$

\bar{E}_1 bis \bar{E}_9 : Messwerte in [lx]

A : Gesamtfläche der Leinwand in [m²]

Der Umstand, dass bei der Projektion in der Bildmitte (Messwert \bar{E}_5) ein sog. Hot Spot entsteht, wird mit dem Zahlenverhältnis „Edge to Center Ratio“ angegeben:

$$\text{Edge to Center Ratio} = \frac{\bar{E}_1}{\bar{E}_5} \quad (\text{Formel 22.16})$$

Bei qualitativ hochwertigen Projektionen liegt dieses Verhältnis zwischen 0,7 und 1, d.h. der Hot Spot ist kaum noch sichtbar.⁷¹

⁷⁰ ANSI = American National Standards Institute

⁷¹ vgl. Mueller, 2004, Seite 194

22.7.6. Laserprojektoren

Drei Laserstrahlen in den Spektralfarben Rot, Grün und Blau werden über dichroitische Spiegel zu einem Strahl zusammengeführt. Das Laserlicht hat einen parallelen Strahlengang und dadurch ist das projizierte Bild an jeder Stelle im Raum fokussiert. Dies ermöglicht scharfe Projektionen auf unterschiedlichsten Oberflächenformen und mit großen Entfernungen.⁷² Weitere Vorteile der Laserprojektion sind die hohe Bildfrequenzen und hohe Auflösung.⁷³

Die Modulation der Helligkeit des Laserlichts kann auf zwei Arten erfolgen:

1. Akustisch-optisch mit Hilfe von hochfrequenten Schallwellen, welche die Dichte von Piezokristallen beeinflussen, durch die das Laserlicht geht.
2. Elektro-optisch: Ein elektrisches Feld ändert die Polarisation von Kristallen, die dann mehr oder weniger Licht passieren lassen.

Aufgrund folgender Nachteile wird die Laserprojektion derzeit aber noch eher selten eingesetzt:

- Große Geräte mit aufwändiger Kühlung
- Stromversorgung bis zu 100 kW
- Sehr teure Technik

⁷² vgl. Fleischer, 2004, Seite 79 und 80

⁷³ vgl. Schmidt, 2000, Seite 302

22.7.7. Lens Shift

Lens Shift ist die mechanische, parallele Verschiebung des optischen Systems. Dadurch erfolgt eine Verschiebung des Bildes vertikal und horizontal auf der Projektionsfläche ohne Verzerrungen (Abb. 22.63).⁷⁴

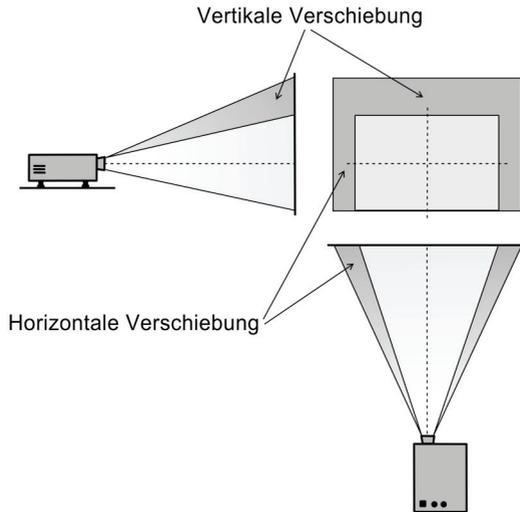


Abb. 22.63: Lens Shift

22.7.8. Pixel Shift

Pixel Shift wird auch Keystone-Korrektur genannt. Bei nicht senkrechten Projektionsflächen bzw. geneigtem Projektor wird das Bild als Trapez dargestellt. Durch eine elektronische Korrektur wird die Geometrie des Bildes angepasst. Allerdings bleibt ein Teil der Pixel am Bildrand dabei dunkel (22.64).⁷⁵

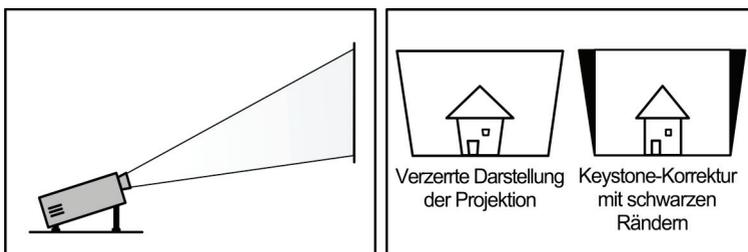


Abb. 22.64: Vertikale Keystone-Korrektur

⁷⁴ vgl. Fleischer, 2004, Seite 99

⁷⁵ vgl. Fleischer, 2004, Seite 100

22.8. Übungsaufgaben

Aufgabe 1: (Frage bei der Abschlussprüfung Winter 2000 der IHK Berlin)

Warum ist ein Weißabgleich bei einer Videokamera notwendig?

Aufgabe 2: (Frage bei der Abschlussprüfung Winter 2000 der IHK Berlin)

Beschreibe die Funktionsweise des Micromirror-Verfahrens (DLP) in einem Großbildprojektor.

Aufgabe 3:

Warum müssen die Videosignalquellen, die an einen Bildmischer angeschlossen sind, synchronisiert sein?

Aufgabe 4:

Welche Bildwandler werden in professionellen Videokameras eingesetzt?

Aufgabe 5:

Was bedeutet die Abkürzung CCU, was macht dieses Gerät?

Aufgabe 6:

Was bedeutet die Abkürzungen MPEG? Nenne kurz die Unterschiede von MPEG-2 und MPEG-4.



Literaturtipps:

Götz-Meyn, Elmar und Neumann, Walter:
Grundlagen der Video- und Videoaufzeichnungstechnik.
Heidelberg: Hüthig Verlag.

Mueller, Jens: Handbuch der Lichttechnik.
Bergkirchen: PPV Medien.

Schmidt, Ulrich: Professionelle Videotechnik.
Berlin: Springer Verlag.

Anhang

Ausbildungsinhalte im Bereich der Tontechnik laut dem Rahmenlehrplan¹

1. Lehrjahr

Lernfeld: Beschallungsanlagen Planen und Aufbauen

Zeitrichtwert: 60 Stunden

Lernziele: Die Auszubildenden kennen den prinzipiellen Aufbau von Beschallungsanlagen. Sie wenden die Grundlagen der Audiotechnik beim Planen und Aufbauen von Beschallungsanlagen an. Sie messen die Kenngrößen der Beschallungstechnik. Sie planen den Einsatz der Geräte nach Vorgaben und gestalterischen Gesichtspunkten sowie unter Berücksichtigung der sicherheitstechnischen Bestimmungen und Vorschriften.

Lerninhalte Theorie:

- Physikalische und physiologische Grundlagen der Akustik
- Analoge und digitale Signale
- Mikrofone
- Lautsprecher
- Aufbau von Beschallungsanlagen
- Kenngrößen der Filter
- Klangbeeinflussung
- Informationsbeschaffung aus deutschen und englischen Gerätebeschreibungen
- Installations- und Beschallungspläne Lesen und Erstellen

Praktische Fertigkeiten:

- Beschallungspläne Anwenden
- Aufbauen, Einrichten und Funktionsprüfung von Beschallungsanlagen
- Bild-, Ton- und Datenmaterial Sichten, Prüfen und Bereitstellen

¹ vgl. Verordnung über die Berufsausbildung, 2002

2. Lehrjahr

Lernfeld: Beschallungsanlagen Konfigurieren und Prüfen

Zeitrictwert: 80 Stunden

Lernziele: Die Auszubildenden konfigurieren, prüfen und bedienen Beschallungsanlagen und interne Kommunikationseinrichtungen. Sie führen Messungen zur Fehleranalyse bei Störungen durch. Sie kennen und bedienen Tonmischpulte. Sie können Tonsignale beurteilen und kennen verschiedene Verfahren zur Tonbeeinflussung und Pegelanpassung.

Lerninhalte Theorie:

- Lärmschutzvorschriften
- Pegelmessungen und -anpassung
- Drahtlose Mikrofone
- Mischpulte
- Übertragungsstörungen und deren Behebung
- Auswahlkriterien für den Einsatz von Effektgeräten
- Intercom-Anlagen

Praktische Fertigkeiten:

- Akustische Emissionswerte Prüfen
- Beschallungspläne Erstellen
- Mikrofone Auswählen und Positionieren
- Signalbearbeitungsgeräte Auswählen und in Anlagen Integrieren
- Sprachbeschallung Einregeln
- Bild-, ton- und datentechnische Geräte an interne und externe Netze Anschließen

3. Lehrjahr

Lernfeld: Medieneinsatz Planen und Durchführen

Zeitrictwert: 80 Stunden

Lernziele: Die Auszubildenden nutzen Geräte und Netze zur Bild-, Ton- und Datenverarbeitung und Präsentation. Sie kennen Anwendersoftware zur Bild- und Tonbearbeitung. Sie fertigen Bild- und Tonaufnahmen unter Beachtung der Persönlichkeitsrechte an. Sie wählen geeignete Projektionsgeräte und -verfahren aus und wenden diese an.

Lerninhalte Theorie:

- Aufnahme und Speicherung von Bild, Ton und Daten
- Norm- und Formatwandlung
- Bild- und Tonbearbeitungssoftware, Grafikprogramme
- Anschluss von bild-, ton- und datentechnischen Geräten an Netze
- Projektionsverfahren
- Projektionsgeräte

Praktische Fertigkeiten:

- Mischpulte Konfigurieren und Einrichten
- Soundcheck Durchführen
- Tonein- und -auspielungen unter Berücksichtigung von Pegel und Anpassung Entgegennehmen und Bereitstellen
- Bild- und Tonaufnahmen Überspielen, Norm- und Formatwandlung Durchführen
- Bild- und Tonmitschnitte Anfertigen
- Präsentationsbeschallung Auswählen und Gestalten

Berechnung des Hallradius r_H

Gegeben sind...

... die Energie des Direktschalls $W_{\text{direkt}} = \frac{P}{4 * c * \pi * r^2}$ Einheit [W*s / m³]

... die Energie des Diffusschalls $W_{\text{diffus}} = \frac{4 * P}{A * c}$ Einheit [W*s / m³]

P : Schalleistung [W]

c : Schallgeschwindigkeit

r² : Abnahme des Schallintensitätspegels mit der Entfernung: $L_1 \sim 1/r^2$

A : äquivalente Absorptionsfläche des Raumes [m²]

Im Hallradius gilt:

$$W_{\text{direkt}} = W_{\text{diffus}}$$

$$\frac{P}{4 * c * \pi * r^2} = \frac{4 * P}{A * c}$$

Auflösen der Gleichung nach r²:

$$r^2 = \frac{P * A * c}{P * 4 * 4 * \pi * c}$$

Heraus Kürzen von P und c, Ausrechnen und Auflösen nach r:

$$\text{Hallradius } r_H = \sqrt{\frac{A}{16\pi}} \quad \text{Einheit [m]}$$

Gegeben ist weiterhin RT₆₀ nach Sabine:

$$RT_{60} = \frac{24 * \ln 10 * V}{c * A} \quad \text{Einheit [s]}$$

V : Raumvolumen [m³]

Umformen nach A:

$$A = \frac{24 * \ln 10 * V}{c * RT_{60}}$$

Einsetzen von A in die Formel des Hallradius r_H :

$$r_H = \sqrt{\frac{24 * \ln 10 * V}{16\pi * c * RT_{60}}}$$

Einsetzen von c, Ausrechnen und Faktor vor die Wurzel bringen:

$$r_H = 0,057 * \sqrt{\frac{V}{RT_{60}}} \quad \text{Einheit [m]}$$

Einige Aussagen zum Nahbesprechungseffekt

Norbert Pawera:

Bei Richtmikrofonen ändert sich die Ausgangsspannung bei geringer werdendem Abstand bei tiefen Frequenzen viel stärker als im übrigen Frequenzbereich. Das hat seinen Grund in der Tatsache, dass die Membran nur auf die Druckdifferenz zwischen ihrer Vorder- und Rückseite reagiert und die dafür notwendigen beiden Schalleinlässe meist sehr nahe beisammen liegen.

(Pawera, 1993, Seite 27)

Michael Dickreiter:

Alle Schnelle- und Druckgradientenempfänger, also alle Richtmikrofone, haben einen sog. Nahbesprechungseffekt. Dabei erfährt der Frequenzgang für nahe am Mikrofon befindliche Schallquellen eine Anhebung im tiefen Frequenzbereich, die umso größer wird, je geringer der Mikrofonabstand und je tiefer die Frequenz ist. Die Anhebung setzt ein, wenn der Mikrofonabstand kleiner als die Wellenlänge ist. Sie kommt zustande, weil die Druckdifferenz, die die Membran auslenkt, aus zwei Komponenten zusammengesetzt ist; unabhängig von der Entfernung wird die Druckdifferenz zwischen Membranvorder- und -rückseite mit sinkender Frequenz geringer, was durch eine entsprechende Bassverstärkung im Mikrofon kompensiert wird (Fernfeldanteil); dazu kommt im Nahfeld eine frequenzunabhängige, zusätzliche Druckdifferenz, verursacht durch die hier starke Druckabnahme bei zunehmender Entfernung. Da auch die frequenzunabhängige Komponente über die Bassverstärkung des Mikrofons geführt wird, ergibt sich eine Bassanhebung im Nahfeld (Nahfeldanteil) [Abb. A.0.1].

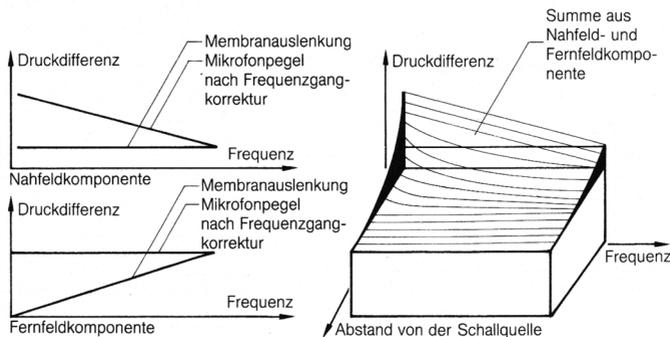


Abb. A.0.1: Nahbesprechungseffekt
als Summe von Nahfeld- und Fernfeldkomponente und ihrer
Frequenzgangkorrektur im Mikrofon

(Dickreiter, 1995, Seite 93)

Gerhart Boré und Stephan Peus:

Bei Annäherung an eine punktförmige Schallquelle nimmt der Schalldruck proportional $1/r$ zu (r = Abstand). Im Kugelschallfeld herrscht daher an den beiden Abtastpunkten A und B eines Druckgradienten-Mikrophons zusätzlich zu dem phasenbedingten noch ein entfernungsabhängiger Schalldruckunterschied [Abb. A.0.2 a], der durch den unterschiedlichen Abstand r_1 und r_2 beider Punkte von der Schallquelle Q zustande kommt. Diese entfernungsabhängige Schalldruck-Differenz ist für alle Frequenzen gleich groß und nicht, wie die phasenbedingte, frequenzabhängig. Daher macht sich ihr Einfluß am stärksten bei den tiefen Frequenzen bemerkbar, wo die aus der Phasenverschiebung resultierende Membrankraft am kleinsten ist [Abb. A.0.2 b]. Praktisch folgt daraus, dass Druckgradienten-Mikrophone bei Nahbesprechung die tieffrequenten Anteile verstärkt übertragen.

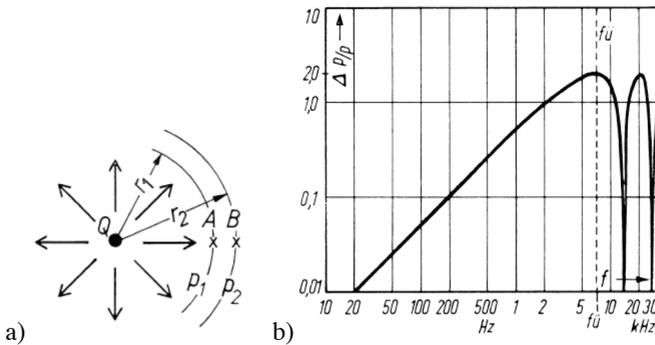


Abb. A.0.2: a) Kugelschallfeld und b) Frequenzgang des Druckgradienten bzw. der Druckdifferenz Δp zwischen zwei Punkten im ebenen Schallfeld. Abstand der Punkte 25 mm (f_0 = Übergangsfrequenz)

(Boré und Peus, 1999, Seite 14 und 15)

Jörg Wuttke:

Obwohl Druckgradienten-Empfänger sehr tiefe Töne generell geschwächt übertragen, können sie in speziellen Fällen auch zu einer Überbetonung dieser Frequenzen führen, nämlich dann, wenn das Mikrofon dicht an der Schallquelle eingesetzt wird (z.B. beim Gebrauch als Sprechermikrofon). Man nennt dieses Geschehen den Nahheits- oder auch Nahbesprechungs-Effekt. Bei gleicher Schallausbreitung in alle Richtungen (Kugelschallwelle) und einem Mikrofon mit Nieren-Charakteristik bewirkt der Nahheitseffekt in 0,5 m Abstand bei 50 Hz zum Beispiel 3 dB Pegelanhebung. Sie kann bei noch kürzeren Abständen ohne weiteres 10 dB und mehr betragen. Der Effekt kann anschaulich damit erklärt werden, dass die Druckdifferenz an den Schalleinlassöffnungen nicht nur von der Frequenz abhängt, sondern auch noch von der Art der Wellenausbreitung. Im Vergleich mit dem sehr kleinen Druckgradienten bei niedrigen Frequenzen kann die Abnahme des Schalldrucks durch die Schallausbreitung zwischen den beiden Schalleinlassöffnungen des Mikrofons so groß sein, dass dadurch der Pegel angehoben wird.

(Wuttke, 2000, Seite 14)

Manfred Zollner und Eberhard Zwicker:

Zollner und Zwicker erklären in ihrer Veröffentlichung die Modellvorstellung der atmenden Kugel, die von einer Schallquelle ausgeht. Im Fernfeld und für hohe Frequenzen ist die bewegte Luftmasse träge und unbeweglich. Im Nahfeld und bei tiefen Frequenzen bewegt sich die Luftmasse mit der atmenden Kugeloberfläche. Die Schallimpedanz wird von der Masse bestimmt. Diese Zusammenhänge haben eine Auswirkung auf den Nahbesprechungseffekt.

(Zollner und Zwicker, 2003, Seite 66)

Thomas Görne:

Im Nahfeld, also bei Entfernungen $r < \lambda$ zur Schallquelle, nimmt der Membrantrieb des Gradientenempfängers zu: Man bemerkt diesen Nahbesprechungseffekt als Bassanhebung. Der Nahbesprechungseffekt lässt sich durch die Entfernungabhängigkeit des Schalldrucks in der Kugelwelle erklären. Damit kommt zu der frequenzabhängigen Druckdifferenz zwischen zwei benachbarten Punkten im Schallfeld (Druckgradienten) eine zusätzliche frequenzunabhängige Druckdifferenz zwischen Vorder- und Rückseite der Membran. In großer Entfernung oder bei hohen Frequenzen spielt die zusätzliche Druckdifferenz keine Rolle. Bei tiefen Frequenzen, wenn der Membrantrieb des Gradientenempfängers schwach ist, fällt dieser zusätzliche Membrantrieb aber deutlich ins Gewicht. [...] Druckempfänger registrieren keine Nahbesprechung. Auch unsere Ohren sind Druckempfänger; man kann den Nahbesprechungseffekt deshalb auch nicht subjektiv wahrnehmen.

(Görne, 2006, Seite 261)

Johannes Webers geht auf den Nahbesprechungseffekt gar nicht erst ein und beschreibt stattdessen, wie aus einem Druckgradientenempfänger ein Schnellempfänger wird:

[...] Infolgedessen steigt die die Membran antreibende Kraft mit der Frequenz an. Die mittlere Wegdifferenz darf also nicht größer als die halbe Wellenlänge der höchsten zu übertragenden Frequenz, das sind bei 12000 Hz etwa 1,4 cm, sein. Im Interesse einer möglichst hohen Druckdifferenz und Wandlerempfindlichkeit wird man jedoch diesen Wert auch nicht unterschreiten dürfen. Die Schwingungsamplitude der Membran [eines Druckgradientenempfängers] und damit die Wandlerempfindlichkeit würde nun allerdings ebenfalls mit der Frequenz ansteigen. Dies wird vermieden, indem man die Membranauslenkung reibungsgehemmt erfolgen lässt. Die hierzu notwendige Reibung erzielt man dadurch, dass der Elektrodenabstand [des Kondensatormikrofons] – wie beim Schalldruckempfänger – ebenfalls gering, der Abstand der Löcher in der Gegenelektrode aber groß gemacht wird. Große Geschwindigkeit und damit große Reibungsverluste in der zwischen den Elektroden verbleibenden dünnen Luftschicht sind die Folge. Die Membranauslenkung kann auf diese Weise trotz frequenzabhängigen Anstiegs des Druckgradienten konstant gehalten werden. Die Ausgangsspannung des Mikrofons ist somit nicht dem ansteigenden Druckgradienten sondern der Schallschnelle proportional; deshalb die Bezeichnung dieses Schallwandlers als „Schnellempfänger“.

(Webers, 2007, Seite 247 und 248)

Hans Jörg Friedrich:

Bauartbedingt fällt die Empfindlichkeit von Druckgradientenempfängern zu den Tiefen hin ab. Das kommt daher, dass sich tiefe Frequenzen um das Mikrofon herumbeugen und so fast gleichphasig auf der Membranrückseite auftreffen. Der Druckgradient ist aber der Druckunterschied zwischen Membranvorder- und Hinterseite und somit für tiefe Frequenzen sehr gering. Dieser Tiefenverlust wird elektronisch kompensiert. Das führt zum sogenannten Nahbesprechungs- oder Proximity-Effekt. Tieffrequenter Schall, der im Nahfeld des Mikrofons auftritt wird stark verstärkt.

(Friedrich, 2008, Seite 100)

Die Problematik der verschiedenen Definitionen des Nahbesprechungseffektes hat Daniel Mariano in seinem „Minidiplom“ anschaulich zusammengefasst. Im Internet ist dieses Dokument abrufbar unter:

<http://www.sengpielaudio.com/Nahbesprechungseffekt-Mariano.pdf>

(Letzter Aufruf Oktober 2008)

Englische Fachbegriffe

Englisch	Deutsch
Akustik und Tontechnik:	
Amplifier	Verstärker
Auxiliary	Ausspielweg
Axial Sensitivity	Kennschalldruck in [dB/W/m]
Bandwith	Bandbreite
Bell Filter	Glockenfilter
Bidirectional (Figure Eight) Microphone	Achtercharakteristik
Boundary Layer Microphone	Grenzflächenmikrofon
Cardoid Microphone	Nierencharakteristik
Center Frequency	Mittenfrequenz
Crosstalk	Übersprechen
Delay	Echo oder Verzögerung
Delay Line	Stützlautsprecher
Directivity Index	Bündelungsmaß
Early Reflections	Erste Reflexionen
Editing	(Audio- bzw. Video-) Schnitt
Equalisation	Entzerrung
Fader	Pegelsteller
Feedback	Rückkopplung
Frame	Filmbild oder Rahmen eines Mischpultes
Frequency	Frequenz
Frequency Response	Frequenzgang
Gain	Vorverstärkung
Ground	Masse
Ground Lift	Masseauftrennung
Harddisc	Festplatte
High Pass Filter	Hochpassfilter
Humm	Brummen
Interface	Schnittstelle
Level	Lautstärke oder Pegel
Line Array	Linienstrahler
Line Driver	Leistungsverstärker
Line Level	Leistungspegel
Low Pass Filter	Tiefpassfilter
Master Fader	Summenregler
Mixdown	Abmischung
Mixing Desk / Sound Desk	Mischpult

Network	Netzwerk
Notch Filter	Kerbfilter
Omnidirectional Microphone	Kugelcharakteristik
Oscillator	Tongenerator
Pad (-Switch)	Dämpfungsglied
Patchbay	Steckfeld
Peak	(Pegel-) Spitze
Peak Filter	Glockenfilter
Phantom Power	Phantomspeisung
Phase Reverse	Verpolungsschalter
Plug	Stecker
Power Handling	Belastbarkeit eines Lautsprechers in [W]
Power Supply	Netzteil
Preamplifier	Vorverstärker
Q-Factor	(Filter-) Güte
Receiver	Empfänger
Remote Control	Fernsteuerung
Repeater	Leitungstreiber
Reverb	Hall
Revervation Time	Nachhallzeit
Sample	Signalabtastung oder kurze Audiodatei
Sensitivity	Eingangsempfindlichkeit
Shelving Filter	Kuhschwanzfilter
Sonic Speed	Schallgeschwindigkeit
Sound Pressure	Schalldruck
Speaker	Lautsprecher
Speech	Sprache
Squelch	Rauschunterdrückung
Subwoofer	Basslautsprecher
Technical Rider	Bühnenanweisung
Threshold	Schwelle (Parameter von Regelverstärkern)
Transmitter	Sender
Waveform	Wellenform
Wavelength	Wellenlänge
Wireless	Drahtlos
X-over (Crossover)	Frequenzweiche
Musikinstrumente:	
Bassoon	Fagott
Brass	Blechbläser
Chimes	Glockenspiel
Double Bass	Kontrabass

Drumkit	Schlagzeug
Grand Piano	Flügel
Harpiscord	Cembalo
Piano	Klavier
Timbany	Pauken
Trombone	Posaune
Trumpet	Trompete
Violin	Geige
Woodwinds	Holzbläser
Musikalische Begriffe:	
Whole Note / Semibrave	Ganze Note
Half Note / Minim	Halbe Note
Quarter Note / Crotchet	Viertelnote
Eighth Note / Quaver	Achtelnote
Sixteenth Note / Semiquaver	Sechzehntelnote
Sharp	Kreuz (Erhöhung einer Note)
Flat	B (Erniedrigung einer Note)
Rest	Pause
G-clef	Violinenschlüssel
F-clef	Bass-Schlüssel
Score	Partitur / Noten
Tune	Tonart oder Stimmung
B major	Tonart „H-Dur“
B minor	Tonart „b-moll“

Abkürzungen

AAF = Advanced Authoring Format

ABC = Automatic Black Control

AC = Alternating Current

ADAT = Alesis Digital Audio Tape

AES = Audio Engineering Society

AFL = After Fader Listening

AIFF = Audio Interchange File Format

ALAC = Apple Lossless Audio Codec

AICons = Articulation Loss of Consonants

AlMn = Alkali-Mangan

ANSI = American National Standards Institute

ASCII = American Standard Code for Information Interchange

ASIO = Audio Stream Input Output

ATA = Advanced Technology Attachment

ATSC = Advanced Television Systems Committee

AVI = Audio Video Interleave

AWC = Automatic White Control

BAS = Bild-, Austastung- und Synchronsignal

BGV = Berufsgenossenschaftliche Vorschrift

BImSchG = Bundes-Immissionsschutzgesetz

Bit = Binary Digit

BP = Bandpass

BPM = Beats per Minute

BS = Bandsperre

c_0 = Bezugsgeschwindigkeit (Schall- oder Lichtgeschwindigkeit)

$C_{50/80}$ = Clarity (50ms / 80ms)

CAT = Cable and Telephone

CCD = Charge Coupled Device

CCIR = Consultative Committee on International Radio

CCM = Central Control Module

CCU = Camera Control Unit

CD = Compact Disc

CD-Horn = Constant-Directivity-Horn

CD-R = Compact Disc Recordable

CEE = International Commission on Rules for the Approval of Electrical Equipment

CELP = Code Excited Linear Prediction

CMOS = Complementary Metal Oxide Semiconductor

CPU = Central Processor Unit

CRC = Cyclic Redundancy Check

CSMA/CD = Carrier Sense Multiple Access Collision Detection

CV = Control Voltage

DAB = Digital Audio Broadcast

DAT = Digital Audio Tape

DAW = Digital Audio Workstation

DC = Direct Current

DCA = Digital Controlled Amplifier

DDR SDRAM = Double Data Rate Synchronous Dynamic Random Access Memory

DI = Direct Injection

D-ILA = Digital Image Light Amplifier

DIN = Deutsche Industrie Norm

DLP = Digital Light Processing

DMD = Digital Micromirror Device

DSD = Direct Stream Digital

DSP = Digitaler Signalprozessor

DST = Direct Stream Transfer

DTS = Digital Theatre System

DVD = Digital Versatile Disc
DVD-R = Digital Versatile Disc Recordable
DVE = Digital Video Editing
EBU = European Broadcast Union
EN = Europäische Norm
EOX = End of Exclusive
EQ = Equalizer
Eq = Equivalent
EX = Exposition
FB = Foldback
FBAS = Farbbild-, Austastung- und Synchronsignal
FIR = Finite Impulse Response Filter
FIT = Frame Interline Transfer
FLAC = Free Lossless Audio Codec
FOH = Front Of House
FS = Full Scale
FSB = Front Side Bus
FT = Frame Transfer
GFX = Graphics-Interface
GPI = General Purpose Interface
GPS = Global Positioning System
GSM = Global System for Mobile Communication
HDD = Hard Disc Drive
HF = High Frequency, Hochfrequenz
HP oder HPF = Hochpassfilter
I/O oder IO = Input / Output
IEC = International Electrotechnical Commission
IEEE = Institute of Electrical and Electronics Engineers
IEM = In-Ear Monitoring

IHK = Industrie- und Handelskammer

IIR = Infinite Impulse Responce

INA = Ideale Nieren-Anordnung

IP = Internet Protocol

IR = Infrarot

IRT = Institut für Rundfunktechnik

ISDN = Integrated Services Digital Network

IST = Impulsschalltest

IT = Interline Transfer

L/R = Links / Rechts

LAN = Local Area Network

LärmVibrationsArbSchV = Lärm- und Vibrations-Arbeitsschutzverordnung

LC = Light Connector

LCD = Liquid Crystal Display

LCoS = Liquid Crystal on Silicon

LED = Light Emitting Diode

LF = Low Frequency

LFO = Low Frequency Oscilator

Li-Ion = Lithium-Ionen

LPC = Low Pin Count

LPCM = Linear Pulse Code Modulation

LPF = Low Pass Filter

LS = Lautsprecher

LSB = Least Significant Bit

LTC = Longitudinal Time Code

LTD = Linear Time-Invariant Descrete

LWL = Lichtwellenleiter

MAC = Medium Access Control

MADI = Multichannel Audio Digital Interface

MAZ = Magnetbandaufzeichnung
MF = Mid Frequency
Mic = Microphone
MIDI = Musical Instrument Digital Interface
MLP = Meridian Lossless Packing
MMF = Multi Mode Fiber
MOS = Metal Oxide Semiconductor
MPEG = Motion Picture Expert Group
MSB = Most Significant Bit
MTC = MIDI Time Code
n.c. = not connected
ND = Neutralfilter
NF = Niederfrequenz
NiCd = Nickel-Cadmium
NiMH = Nickel-Metallhydrid
NOS = Nederlandse Omroep Stichting
NRZ = Non Return to Zero
NRZI = Non Return to Zero Invers
NRZL = Non Return to Zero Level
NTSC = National Television Systems Committee
OCP = Optional Control Panel
OCT = Optimal Cardoid Triangle
OMF = Open Media Framework
ORTF = Office de Radiodiffusion-Télévision
OSC = Oscillator
OSI = Open Systems Interconnection
OSS = Optimales Stereo-Signal
P48 = Phantomspeisung (48 V)
PA = Public Adress

PAL = Phase Alternating Line

Pb = Blei

PCI = Peripheral Component Interconnect

PCM = Pulse Code Modulation

PFL = Pre Fader Listening

PTS = Permanent Threshold Shift

PWM = Pulse Width Modulation

RAID = Redundant Array of Independent Discs

RAM = Random Access Memory

RASTI = Rapid Speech Transmission Index

RCA = Radio Corporation of America

RGB = Rot, Grün, Blau

RIFF = Resource Interchange File Format

RMS = Root Mean Square

ROM = Read Only Memory

RT = Reverb Time

RZ = Return to Zero

S/P-DIF = Sony / Phillips Digital Interface

SACD = Super Audio Compact Disc

SDI = Serial Digital Interface

SFD = Start Frame Delimiter

SIM = Source Independent Measurement

SiP = Solo in Place

SL = Surround Left; Oder im Theater auch: Stage Left

SMF = Single Mode Fiber

SMPTE = Society of Motion Picture and Television Engineers

SNR = Signal to Noise Ratio; Oder auch: Single Number Rating

SPL = Sound Pressure Level

SR = Surround Right; Oder im Theater auch: Stage Right

SRXD = Sony X-tal Reflective Display

STI = Speech Transmission Index

TA = Technische Anweisung

TBC = Time Base Corrector

TCP = Transmission Control Protocol

T-DIF = Tascam Digital Interface

TDM = Time Division Multiplex

THD = Total Harmonic Distortion

TIFF = Tagged Image File Format

TKG = Telekommunikations-Gesetz

TP oder TPF = Tiefpassfilter

TTS = Temporary Threshold Shift

UART = Universal Asynchronous Receiver Transmitter

UDF = Universal Disc Format

UHF = Ultra High Frequency

USB = Universal Serial Bus

USITT = United States Institute for Theatre Technology

VCA = Voltage Controlled Amplifier

VHF = Very High Frequency

VITC = Vertical Interval Time Code

VLAN = Virtual Local Area Network

VstVo = Versammlungsstättenverordnung

WAN = Wide Area Network

WMA = Windows Media Audio

ZF = Zwischenfrequenz

ZnC = Zink-Kohle

ZVEI = Zentralverband Elektrotechnik- und Elektronikindustrie e.V.

Formelsammlung

Laufzeit t des Schalls (s. Seite 22):

$$\text{Laufzeit } t = \frac{\text{Abstand zur Schallquelle } s}{\text{Schallgeschwindigkeit } c} \quad \text{Einheit [s]}$$

Frequenz f (s. Seite 24):

$$\text{Frequenz } f = \frac{1}{s} \quad \text{Einheit [Hz]}$$

Wellenlänge λ bei Schallwellen (s. Seite 25):

$$\lambda = \frac{\text{Schallgeschwindigkeit } c}{\text{Frequenz } f} \quad \text{Einheit [m]}$$

Wellenlänge λ bei elektromagnetischen Wellen (s. Seite 335):

$$\lambda = \frac{\text{Lichtgeschwindigkeit } c}{\text{Frequenz } f} \quad \text{Einheit [m]}$$

Auslenkung ξ der Luftmoleküle in einer Schallwelle (s. Seite 41):

$$\xi = \frac{p}{c * \rho * 2\pi * f} \quad \text{Einheit [m]}$$

Schallschnelle v in Abhängigkeit von ξ (s. Seite 41):

$$v = \xi * 2\pi * f \quad \text{Einheit [m/s]}$$

Schallimpedanz Z (s. Seite 43):

$$Z = c * \rho \quad \text{oder} \quad Z = \frac{p}{v} \quad \text{oder} \quad Z_{\text{Kugel}} = \frac{p(t)}{v(t)} \quad \text{Einheit [N*s/m}^3\text{]}$$

Schallintensität I (s. Seite 44):

$$I = p * v \quad \text{oder} \quad I = \frac{P}{A} \quad \text{Einheit [W/m}^2\text{]}$$

Schalleistung P (s. Seite 45):

$$P = I * A \quad \text{Einheit [W]}$$

Schallenergie W (s. Seite 46):

Energie des Direktschalls:

$$W_{\text{direkt}} = \frac{P}{4 * c * \pi * r^2} \quad \text{Einheit [Joule/m}^3\text{]}$$

Energie des Diffusschalls:

$$W_{\text{diffus}} = \frac{4 * P}{A * c} \quad \text{Einheit [Joule/m}^3\text{]}$$

Kammfilterfrequenzen (s. Seite 53):

Erste Senke f_{n1} :

$$f_{n1} = \frac{1}{2 * \Delta t} \quad \text{Einheit [Hz]}$$

Weitere Senken f_{nx} :

$$f_{nx} = x * f_{n1} \quad \text{für } x = 3, 5, 7, \dots \quad \text{Einheit [Hz]}$$

Überhöhungen im Spektrum f_{py} :

$$f_{py} = y * f_{n1} \quad \text{für } y = 2, 4, 6, \dots \quad \text{Einheit [Hz]}$$

Dopplerfrequenzen für eine bewegte Schallquelle (s. Seite 54):

Schallquelle nähert sich: Schallquelle entfernt sich:

$$f_1 = \frac{f}{1 - \frac{v}{c}}$$

$$f_2 = \frac{f}{1 + \frac{v}{c}}$$

Einheit [Hz]

Resonanzfrequenz f_r eines Plattenschwingers (s. Seite 56):

$$f_r = \frac{1}{2\pi} * \sqrt{\frac{s'}{m' * d}}$$

Einheit [Hz]

Resonanzfrequenz f_r eines Helmholtzresonators (s. Seite 56):

$$f_r = \frac{c}{2\pi} \sqrt{\frac{S}{V * (\ell + \frac{\pi}{2r})}}$$

Einheit [Hz]

Nachhallzeit RT_{60} nach Wallace Clement Sabine (s. Seite 60):

$$\text{Nachhallzeit } RT_{60} \approx 0,161 * \frac{V}{A}$$

Einheit [s]

Verkürzte Nachhallzeit RT_{60}' durch Zuschauer im Saal (s. Seite 62):

$$\text{Verkürzte Nachhallzeit } RT_{60}' \approx \frac{RT_{60}}{1 + (5 * n * \frac{RT_{60}}{V})}$$

Einheit [s]

n : Anzahl der Zuschauer

Deutlichkeitsmaß C_{50} (s. Seite 63):

$$C_{50} = 10 \lg \frac{\int_0^{50\text{ms}} p^2(t) dt}{\int_{50\text{ms}}^{\infty} p^2(t) dt}$$

Einheit [dB]

Klarheitsmaß C_{80} (s. Seite 64):

$$C_{80} = 10 \lg \frac{\int_0^{80\text{ms}} p^2(t) dt}{\int_{80\text{ms}}^{\infty} p^2(t) dt}$$

Einheit [dB]

Hallradius r_H (s. Seite 67):

$$r_H \approx 0,057 * \sqrt{\gamma_M * \gamma_Q * \frac{V}{RT_{60}}}$$

Einheit [m]

Mikrofon-Bündelungsgrade γ_M und Schallquellen-Bündelungsgrade γ_Q :

Mikrofonrichtcharakteristik	γ_M	Lautsprechercharakteristik	γ_Q
Kugel	1	Kugelschallquelle	1
Breite Niere	2	Einseitiger Strahler (Halbkugel)	2
Niere und Acht	3	Niere als ideale Richtcharakteristik	3
Richtrohrmikrofone	> 4	Gruppenstrahler (Arrays)	> 4

Gesetz der ersten Welle (s. Seite 78, 198 und 368):

$$\text{Verzögerungszeit } \Delta t = \frac{\Delta s}{c} + 0,001 \text{ bis } 0,030 \text{ s}$$

Einheit [s]

Effektivwert des Stromes I_{eff} bei Wechselstrom (s. Seite 99):

$$I_{\text{eff}} = \frac{i_{\text{max}}}{\sqrt{2}}$$

Einheit [A]

Effektivwert der Spannung U_{eff} bei Wechselstrom (s. Seite 99):

$$U_{\text{eff}} = \frac{u_{\text{max}}}{\sqrt{2}} \quad \text{Einheit [V]}$$

Crest-Faktor C (s. Seite 99):

$$C = \frac{u_{\text{max}}}{U_{\text{eff}}}$$

Reihen- und Parallelschaltungen (s. Seite 102 bis 104, Seite 129 und Seite 322):

	Reihenschaltung	Parallelschaltung
Widerstand R	$R_{\text{Ges}} = R_1 + R_2 + \dots + R_n$	$\frac{1}{R_{\text{Ges}}} = \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} + \dots + \frac{1}{R_n}$
Impedanzen Z	$Z_{\text{Ges}} = Z_1 + Z_2 + \dots + Z_n$	$\frac{1}{Z_{\text{Ges}}} = \frac{1}{Z_1} + \frac{1}{Z_2} + \dots + \frac{1}{Z_n}$
Induktivität L	$L_{\text{Ges}} = L_1 + L_2 + \dots + L_n$	$\frac{1}{L_{\text{Ges}}} = \frac{1}{L_1} + \frac{1}{L_2} + \dots + \frac{1}{L_n}$
Kapazität C	$\frac{1}{C_{\text{Ges}}} = \frac{1}{C_1} + \frac{1}{C_2} + \dots + \frac{1}{C_n}$	$C_{\text{Ges}} = C_1 + C_2 + \dots + C_n$
Spannungsquellen	$U_{\text{Ges}} = U_1 + U_2 + \dots + U_n$	$U_{\text{Ges}} = U_1 = U_2 = \dots = U_n$

Grenzfrequenz f_g eines einfachen Tief- und Hochpasses (s. Seite 106):

$$f_g = \frac{1}{2\pi * R * C} \quad \text{Einheit [Hz]}$$

Mittenfrequenz f_0 eines Glockenfilters (s. Seite 108 und 279):

$$f_0 = \sqrt{f_{\text{gu}} * f_{\text{go}}} \quad \text{Einheit [Hz]}$$

Bandbreite Δf eines Glockenfilters (s. Seite 108 und 279):

$$\Delta f = f_{\text{go}} - f_{\text{gu}} \quad \text{Einheit [Hz]}$$

Güte Q eines Glockenfilters (s. Seite 108 und 279):

$$Q = \frac{f_0}{\Delta f}$$

Mittenfrequenzen von Terz- und Oktavbandfiltern (s. Seite 29):

$$f_m = 10^{n/10} \quad \text{Einheit [Hz]}$$

$n = 13, 14, 15, \dots, 41, 42, 43$ beim Terzbandfilter

$n = 15, 18, 21, \dots, 36, 39, 42$ beim Oktavbandfilter

Spannungsverstärkungsfaktor V_u (s. Seite 117):

$$V_u = \frac{U_a}{U_e}$$

Übertragungsfunktion eines Verstärkers in Mitkopplung (s. Seite 119):

$$U_a = \frac{U_e * V_d}{1 + (k * V_d)} \quad \text{Einheit [V]}$$

Leerlaufspannung einer Batterie (s. Seite 129):

$$U_0 = I * R_i + U_{\text{kl}} \quad \text{Einheit [V]}$$

C-Rate beim Laden und Entladen eines Akkumulators (s. Seite 133):

$$C\text{-Rate} = \frac{\text{Strom [mA]}}{\text{Kapazität des Akkus [mAh]}}$$

Relativer Leistungspegel L (s. Seite 137):

$$L = 10 \lg \frac{P_2}{P_1} \quad \text{Einheit [dB}_R\text{]}$$

Absoluter Leistungspegel P_L (s. Seite 139):

$$P_L = 10 \lg \frac{P}{P_0} \quad \text{Einheit [dB}_m\text{]}$$

P_0 : Bezugsleistung 1 mW

Relativer Spannungspegel L_U (Seite 138):

$$L_U = 20 \lg \frac{U_2}{U_1} \quad \text{Einheit [dB}_R\text{]}$$

Absoluter Spannungspegel p_U (s. Seite 138):

$$p_U = 20 \lg \frac{U}{U_0} \quad \text{Einheit [dB}_U\text{]}$$

U_0 : Bezugsspannung 0,775 V

Absoluter Schalldruckpegel L_p (s. Seite 38):

$$L_p = 20 \lg \frac{p}{p_0} \quad \text{Einheit [dB}_{SPL}\text{]}$$

p_0 : Bezugsschalldruck 0,00002 Pa

Absoluter Schallintensitätspegel L_I (s. Seite 44):

$$L_I = 10 \lg \frac{I}{I_0} \quad \text{Einheit [dB]}$$

I_0 : Bezugsschallintensität 10^{-12} W/m²

Absoluter Schalleistungspegel L_w (s. Seite 45):

$$L_w = 10 \lg \frac{P}{P_0} \quad \text{Einheit [dB]}$$

P_0 : Bezugsschalleistung 10^{-12} W

Lärmdosis D in % der erlaubten Tagesdosis (s. Seite 88):

$$D_{\%} = 100 * \frac{T_g}{T_0} * 10^{0,1 * (L_m - L_0)}$$

T_0 : Bezugszeit 480 Minuten

L_0 : Bezugsschalldruckpegel 85 dB_A

Nahbesprechungseffekt Mikrofon mit Nierencharakteristik (s. Seite 151):

$$\frac{U_{\text{Niere}}}{U_{\text{Kugel}}} = \sqrt{1 + \frac{\lambda^2}{16\pi^2 r^2}}$$

Ausgangsspannung U_q eines Bändchenmikrofons (s. Seite 156):

$$U_q = B * I * v \quad \text{Einheit [V]}$$

Ausgangsspannung U_q eines Tauchspulnmikrofons (s. Seite 156):

$$U_q = -N * \frac{\Delta\Phi}{\Delta t} \quad \text{Einheit [V]}$$

N : Windungen der Spule

Ausgangsspannung U eines Kondensatormikrofons (s. Seite 160):

$$U = \frac{Q}{C} \quad \text{mit} \quad C = \epsilon_0 * \epsilon_r * \frac{A}{d} \quad \text{Einheit [V]}$$

Grenzfrequenz f_g eines Grenzflächenmikrofons (s. Seite 164):

$$f_g = \frac{c}{d} \quad \text{Einheit [Hz]}$$

Elektrische Anpassung (s. Seite 201 und 202):

Leistungsanpassung: $R_A = R_E$ bzw. $Z_A = Z_E$

Spannungsanpassung: $R_A \ll R_E$ bzw. $Z_A \ll Z_E$

Stromanpassung: $R_A \gg R_E$ bzw. $Z_A \gg Z_E$

Grenzfrequenz f_g einer analogen Audioleitung (s. Seite 204):

$$f_g = \frac{1}{2\pi * Z_A * C' * 10^{-12} * l} \quad \text{Einheit [Hz]}$$

Abtasttheorem nach Claude Elwood Shannon (s. Seite 223):

$$\text{Abtastfrequenz } f_s \geq f_0 * 2 \quad \text{Einheit [Hz]}$$

Signal-Rausch-Abstand (SNR) bei der Pulse-Code-Modulation (s. Seite 225):

$$\text{SNR} = \text{Quantisierungsstufen} * 6,02 + 1,76 \quad \text{Einheit [dB]}$$

Periodendauer T_s der Abtastung (s. Seite 227):

$$T_s = \frac{1}{\text{Abtastfrequenz } f_s}$$

Tastgrad (s. Seite 227):

$$\text{Tastgrad} = \frac{t}{T_s} = t * f_s$$

Musikalischer Einsatz eines Delays: Viertelnotenverzögerung (s. Seite 285):

$$t = \frac{60 \text{ s}}{\text{BPM}} \quad \text{Einheit [s]}$$

Halbnotenverzögerung: $t * 2$ Achtelnotenverzögerung: $t/2$

Dämpfungsfaktor D eines Verstärkers (s. Seite 301):

$$D = \frac{\text{Nennimpedanz Lautsprecher } Z_E}{\text{Ausgangsimpedanz Verstärker } Z_A}$$

Bündelungsmaß C einer Schallquelle (s. Seite 323):

$$C = 10 \lg * \gamma_0 \quad \text{Einheit [dB]}$$

Grenzfrequenz f_g eines Linienstrahlers (s. Seite 328):

$$f_{gu} = \frac{c}{2d} \quad \text{Einheit [Hz]}$$

Koppelfrequenzen f_n einer Beschallungsanlage (s. Seite 380):

$$f_n = n * \frac{c}{d} \quad \text{Einheit [Hz]}$$

n : beliebige ganze Zahl (1, 2, 3, ...)

Grenzfrequenz f_g der Spaltbreite bei der Magnetbandaufzeichnung (s. Seite 457):

$$f_g = \frac{v}{\lambda_{\min}} \quad \text{Einheit [m]}$$

v : Kopf-Band-Geschwindigkeit [m/s]

Brennweite f bei Videoprojektoren (s. Seite 468):

$$f = \frac{b}{1 + \frac{B}{G}} \quad \text{Einheit [mm]}$$

Physikalische Größen:

Größe	Abkürzung	Berechnung	Einheit	Name
Länge	l, r, s		m	Meter
Fläche	A		m ²	
Volumen	V		m ³	
Zeit	t		s	Sekunde
Geschwindigkeit	v		m/s	
Beschleunigung	a		m/s ²	
Frequenz	f		Hz	Hertz
Kreisfrequenz	ω	$= 2\pi f$	1/s	
Masse	m		kg	Kilogramm
Dichte	ρ	$= m/V$	kg/m ³	
Kraft	F	$= m \cdot a$	N	Newton
Druck	p	$= F/A$	Pa	Pascal
Elektrische Ladung	Q		C	Coulomb
Stromstärke	I	$= Q/t$	A	Ampere
Elektrische Spannung	U	$= W/Q$	V	Volt
Elektrische Leistung bei Gleichstrom	P	$= U \cdot I$ $= U^2/R$ $= I^2 \cdot R$	W	Watt
Wirkleistung	P	$= U \cdot I \cdot \cos\varphi$	W	Watt
Blindleistung	Q	$= U \cdot I \cdot \sin\varphi$	var	
Scheinleistung	S	$= \sqrt{(P^2 + Q^2)}$	VA	
Elektrische Energie	W	$= P \cdot t$	Ws	
Widerstand	R	$= U/I$	Ω	Ohm
Leitwert	G	$= 1/R$	S	Siemens
Leitfähigkeit	γ	$= G/l$	S/m	
Kapazität	C	$= Q/U$	F	Farad
Kapazitätsbelag	C'	$= C/l$	F/m	
Induktivität	L		H	Henry
Induktivitätsbelag	L'	$= L/l$	H/m	
Wellenwiderstand (Impedanz)	Z	$= \sqrt{(L'/C')}$	Ω	Ohm
Magnetischer Fluß	Φ		Wb	Weber
Magnetische Flußdichte	B		Vs/m ² oder T	Tesla
Beleuchtungsstärke	E _v		lx	Lux

Konstanten:

Dielektrizitätskonstante $\epsilon_0 = 8,85418782 \cdot 10^{-12} \text{ As/Vm}$

Vakuumlichtgeschwindigkeit $c_0 = 2,99792458 \cdot 10^8 \text{ m/s}$

Schallgeschwindigkeit $c_0 = 331,5 \text{ m/s}$ (in Luft bei 0° C und 0% Luftfeuchtigkeit)

Dezimalvorsätze:

Vorsatzzeichen	Vorsatzsilbe	Potenz	Dezimalzahl
p	Pico-	10^{-12}	0,000 000 000 001
n	Nano-	10^{-9}	0,000 000 001
μ	Mikro-	10^{-6}	0,000 001
m	Milli-	10^{-3}	0,001
c	Zenti-	10^{-2}	0,01
d	Dezi-	10^{-1}	0,1
k	Kilo-	10^3	1 000
M	Mega-	10^6	1 000 000
G	Giga-	10^9	1 000 000 000
T	Tera-	10^{12}	1 000 000 000 000

Alphabet griechischer Zeichen:

Kleinbuchstabe	Großbuchstabe	
α	A	Alpha
β	B	Beta
χ	X	Chi
δ	Δ	Delta
ε	E	Epsilon
φ	Φ	Phi
γ	Γ	Gamma
η	H	Eta
ι	I	Iota
κ	K	Kappa
λ	Λ	Lambda
μ	M	My
ν	N	Ny
\omicron	O	Omikron
π	Π	Pi
ω	Ω	Omega
θ	Θ	Theta
ρ	P	Rho
σ	Σ	Sigma
τ	T	Tau
υ	Y	Ypsilon
ξ	Ξ	Xi
ψ	Ψ	Psi
ζ	Z	Zeta

Lösungen zu den Übungsaufgaben

Kapitel 1

Aufgabe 1:

Die Luftteilchen einer Schallwelle schwingen in Ausbreitungsrichtung; Schall breitet sich demnach als Longitudinalwelle aus.

Aufgabe 2:

344 m/s

Aufgabe 3:

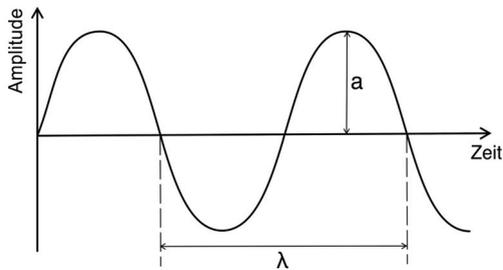


Abb. A.0.3: Amplitude und Wellenlänge

Aufgabe 4:

$$34,4 \text{ Hz} = 10 \text{ m}$$

$$1 \text{ kHz} = 34,4 \text{ cm}$$

$$10 \text{ kHz} = 3,44 \text{ cm}$$

$$20 \text{ kHz} = 1,72 \text{ cm}$$

Aufgabe 5:

$$\text{a) } t = \frac{1}{c} = \frac{1 \text{ m}}{344 \text{ m/s}} = 0,0029 \text{ s} \quad \text{bzw. } 29 \text{ ms}$$

$$\text{b) } t = \frac{1}{c} = \frac{4 \text{ m}}{1484 \text{ m/s}} = 0,0027 \text{ s} \quad \text{bzw. } 27 \text{ ms}$$

Aufgabe 6:

Grundton $f_0 = 261,626 \text{ Hz}$

1. Oberton $f_1 = 2 * f_0 = 523,252 \text{ Hz}$

2. Oberton $f_2 = 3 * f_0 = 784,878 \text{ Hz}$

3. Oberton $f_3 = 4 * f_0 = 1046,504 \text{ Hz}$

Aufgabe 7:

- Infraschall = Schwingungen unterhalb des Hörbereichs ($< 20 \text{ Hz}$)
- Ultraschall = Schwingungen oberhalb des Hörbereichs ($> 20 \text{ kHz}$)

Kapitel 2**Aufgabe 1:**

ca. -30 dB_A

Aufgabe 2:

- Schallgeschwindigkeit = die Ausbreitungsgeschwindigkeit der Schallwelle.
- Schallschnelle = die maximale Bewegungsgeschwindigkeit eines Luftmoleküls innerhalb der Schallwelle.

Aufgabe 3:

$$L_p = 20 * \log \frac{P}{P_0} \text{ Einheit [dB}_{SPL}]$$

$$L_p = 20 * \log \frac{0,1 \text{ Pa}}{0,00002 \text{ Pa}} = 74 \text{ dB}_{SPL}$$

Aufgabe 4:

$$W_{\text{direkt}} = \frac{P}{4 * c * \pi * r^2} = \frac{10}{4 * 344 * \pi * 1^2} = 0,0023 \text{ Joule/m}^3$$

Aufgabe 5:

Beispiel zur Recherche: Infos in Wikipedia (<http://de.wikipedia.org>) unter dem Suchbegriff „Schallintensität“ (Seitenaufruf Oktober 2008):

- Schallintensitätsmessung mit Ultraschallsender und -empfänger, die nahe beieinander in Richtung der Schallquelle ausgerichtet sind. Durch den Doppler-Effekt treten im Empfänger Frequenzänderungen auf, die dann zur Berechnung der Schallschnelle und der Intensität herangezogen werden

- Zweimikrofontechnik mit variablen Abständen der Mikrofonkapseln für Messungen in verschiedenen Frequenzbereichen. Die beiden Mikrofone messen jeweils den Schalldruck an dicht benachbarten Positionen und durch eine spezielle Berechnungsmethode kann anschließend die Intensität abgeleitet werden

Kapitel 3

Aufgabe 1:

Hallradius = Der Abstand zu einer Schallquelle, in dem der Direktschall- gleich dem Diffusschallpegel ist.

Aufgabe 2:

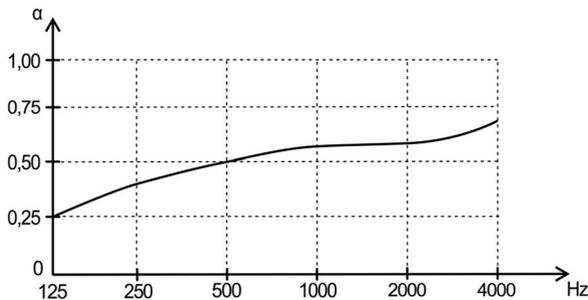


Abb. A.0.4: Absorptionsgrad α eines Vorhangs

Aufgabe 3:

- Erster Schritt: Berechnung der Drehgeschwindigkeit v

$$\text{Umfang } u = \pi * d = \pi * 0,4 \text{ m} = 1,25 \text{ m}$$

400 Umdrehungen pro Minute entsprechen 6,67 Umdrehungen in der Sekunde.

Daraus folgt:

$$\text{Geschwindigkeit } v = 1,25 \text{ m} * 6,67 \frac{1}{\text{s}} = 8,34 \frac{\text{m}}{\text{s}}$$

- Zweiter Schritt: Berechnung der Dopplerfrequenzen

$$\text{Lautsprecher nähert sich: } f_1 = \frac{f}{1 - \frac{v}{c}} = \frac{880}{1 - \frac{8,34}{344}} = 902 \text{ Hz}$$

$$\text{Lautsprecher entfernt sich: } f_2 = \frac{f}{1 + \frac{v}{c}} = \frac{880}{1 + \frac{8,34}{344}} = 859 \text{ Hz}$$

Aufgabe 4:

Hohe Frequenzen werden durch die Öffnung gerichtet abgestrahlt. Tieffrequente Schallanteile werden hinter der Öffnung gebeugt sind und damit im ganzen Raum wahrnehmbar.

Aufgabe 5:

$$\text{Wellenlänge } \lambda = \frac{c}{f} = \frac{344}{200} = 1,72 \text{ m}$$

Der maximale Energieentzug liegt bei einer Dicke von $\lambda/4$:

$$\frac{\lambda}{4} = \frac{1,72 \text{ m}}{4} = 0,43 \text{ m} = 43 \text{ cm}$$

Aufgabe 6:

$$\text{a) } r_H \approx 0,057 * \sqrt{\frac{1250}{1,3}} = 1,77 \text{ m}$$

$$\text{b) } r_H \approx 0,057 * \sqrt{\frac{15000}{1,3}} = 6,12 \text{ m}$$

$$\text{c) } r_H \approx 0,057 * \sqrt{\frac{15000}{3,5}} = 3,73 \text{ m}$$

Folgerungen:

- Je größer ein Raum bei gleicher Nachhallzeit, desto größer ist der Hallradius
- Je länger die Nachhallzeit bei gleichem Raumvolumen, desto kleiner ist der Hallradius

Kapitel 4**Aufgabe 1:**

125 Hz mit 30 Phon: ca. 40 dB_{SPL}

4 kHz mit 80 Phon: ca. 70 dB_{SPL}

Aufgabe 2:

ca. 116 ms

Aufgabe 3:

Das „Gesetz der ersten Welle“ wird auch Haas-Effekt genannt. Um eine richtige Lokalisation der Hauptbeschallung zu erreichen, muss das Audiosignal von Delay Lines zusätzlich zur errechneten Laufzeit um ca. 1 bis 30 ms verzögert werden. Bei einer richtig eingestellten Verzögerungszeit kann der Schalldruckpegel für eine Delay Line sogar bis zu 10 dB_{SPL} größer sein als bei der Hauptbeschallung.

Aufgabe 4:

- Hörverlust im hohen Frequenzbereich
- Leise Töne können nicht mehr wahrgenommen werden
- Einengung der Hördynamik
- Sprachverständlichkeit sinkt
- In manchen Fällen Tinnitus

Aufgabe 5:

Die Kurven verlaufen ganz grob spiegelbildlich zueinander. Tiefe und sehr hohe Töne werden vom Gehör weniger laut wahrgenommen. Diese Charakteristik wird durch die Bewertungsfilter nachgebildet.

Aufgabe 6:

Das Gehör ist für tiefe Frequenzen unempfindlicher. Es sind höhere Schalldrücke erforderlich, um den Eindruck derselben Lautstärke hervorzurufen, wie im mittleren Frequenzbereich um 1 kHz.

Kapitel 5**Aufgabe 1:**

- Mitarbeiter → LärmVibrationsArbSchV
- Publikum → DIN 15 905-5
- Anwohner → TA-Lärm

Aufgabe 2:

- Erfassung und Kennzeichnung von Lärmereichen und falls technisch möglich eine Abgrenzung dieser Bereiche.
- Durchführung der arbeitsmedizinischen Vorsorgeuntersuchung G 20 Lärm

Aufgabe 3:

$$D_{\%} = 100 * \frac{120 \text{ Min}}{480 \text{ Min}} * 10^{0,1 * (91,8 \text{ dB}_A - 85 \text{ dB}_A)} = 120\%$$

Folgerung: Der Tonmeister muss Gehörschutz benutzen. Eine bessere Lösung wäre allerdings, den Pegel der Veranstaltung reduzieren. Dies ist aber nicht immer künstlerisch umsetzbar bzw. vom Veranstalter eventuell nicht gewünscht, da die gemessenen Werte gemäß der DIN 15905 im grünen Bereich sind.

Aufgabe 4:

Dämmwerte für hoch-, mittel- und tieffrequente Geräusche:

- High Freq. (2 bis 8 kHz) = -33 dB
- Mid Freq. (1 bis 2 kHz) = -28 dB
- Low Freq. (0,63 bis 1 kHz) = -25 dB

Kapitel 6**Aufgabe 1:**

$$V_u = \frac{U_a}{U_e} = \frac{1 \text{ V}}{0,001 \text{ V}} = 1000$$

Aufgabe 2:

$$\text{Mittenfrequenz } f_0 = \sqrt{f_{gu} * f_{go}} = \sqrt{600 * 1200} = 850 \text{ Hz}$$

$$\text{Bandbreite } \Delta f = f_{go} - f_{gu} = 1200 - 600 = 600 \text{ Hz}$$

$$\text{Güte } Q = \frac{f_0}{\Delta f} = \frac{850}{600} = 1,4$$

Aufgabe 3:

$$\text{Crest-Faktor } C = \frac{u_{\max}}{u_{\text{eff}}} = \frac{1,4}{1,13} = 1,24$$

Die Effektivspannung kann niemals größer sein als die Spitzenspannung. Wenn die Spitzen- und Effektivspannung des Signals gleich groß sind gilt:

$$C = \frac{u_{\max}}{u_{\text{eff}}} = \frac{1}{1} = 1$$

Es handelt sich dann um eine Gleichspannung.

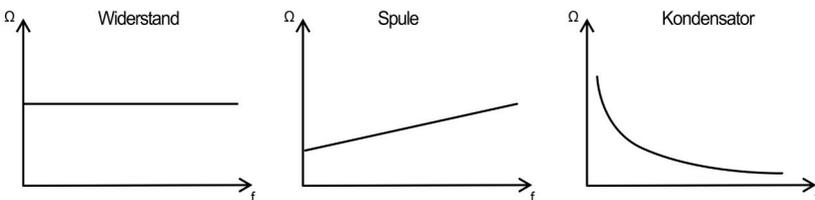
Aufgabe 4:

Abb. A.0.5: Impedanzverläufe von Widerstand, Spule und Kondensator

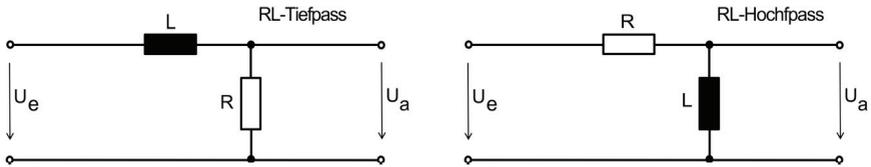
Aufgabe 5:

Abb. A.0.6: RL-Glied als Tiefpass bzw. Hochpass

Grenzfrequenz für beide Schaltungen:

$$f_g = \frac{R}{2\pi * L}$$

Aufgabe 6:

$$U_{\text{eff}} = \frac{u_{\text{max}}}{\sqrt{2}} = \frac{18 \text{ V}}{\sqrt{2}} = 12,7 \text{ V}$$

Kapitel 7**Aufgabe 1:**

$$0,1 * 800 = 80 \text{ mA}$$

Es handelt sich um eine Normalladung.

Aufgabe 2:

Chemische Reaktionen bei der Entladung zerstören die Kathode in der Batterie. Dieser Prozess ist nicht umkehrbar.

Aufgabe 3:

Bei unterschiedlichen Ladezuständen fließen Ausgleichsströme zwischen den Zellen.

Aufgabe 4:

$$U_0 = I * R_i + U_{\text{Kl}} \text{ Umformen zu } R_i \rightarrow$$

- Neue Batterie: $R_i = \frac{U_0 - U_{\text{Kl}}}{I} = \frac{9,57 \text{ V} - 9,18 \text{ V}}{0,022 \text{ A}} = 17,7 \Omega$
- Nach 5 Stunden: $R_i = \frac{U_0 - U_{\text{Kl}}}{I} = \frac{8,73 \text{ V} - 8,03 \text{ V}}{0,022 \text{ A}} = 31,8 \Omega$

Erklärung: Der Innenwiderstand wird größer, je weniger Ladung die Batterie enthält.

Aufgabe 5:

Die alten analogen Netzteile waren sehr schwer und hatten aufgrund der starken Wärmeentwicklung große Lüfter. Schaltnetzteile sind dagegen leichter und erwärmen sich nicht so stark. Daher sind diese auch besser für den Tour-Betrieb geeignet.

Mark Herman über die Netzteile von CADAC:

Note that older Cadac linear power supplies units (PSU) aren't very roadworthy. About 95 percent of old- and new-style Cadac PSU failures are due to dirt accumulation. Be sure to clean these periodically for reliable performance.

(Live Sound International, 05/2003)

Aufgabe 6:

$$\text{Theoretische Betriebsdauer} = \frac{1500 \text{ mAh}}{250 \text{ mA}} = 6 \text{ Stunden}$$

Das Rechenbeispiel bezieht sich auf den Taschensender SK5212; Sennheiser gibt in der Bedienungsanleitung eine Betriebszeit von 5,5 Stunden an im sog. High-Power-Modus.²

Kapitel 8**Aufgabe 1:**

1,55 V

Aufgabe 2:

Einsetzen von zwei Spannungen in die Formel. U muss dabei doppelt so groß sein wie U_0 .

$U_0 = 0,775 \text{ V}$ und $U = 1,55 \text{ V}$:

$$p_U = 20 \lg \frac{1,55 \text{ V}}{0,775 \text{ V}} = 20 \lg 2 = +6 \text{ dB}_U$$

Aufgabe 3:

Addition von absoluten Spannungspegeln zweier nicht kohärenter Signale:

$$0 \text{ dB}_U + 0 \text{ dB}_U = +3 \text{ dB}_U$$

Aufgabe 4:

Bei der Addition von zwei kohärenten Signalen gilt dagegen:

$$0 \text{ dB}_U + 0 \text{ dB}_U = +6 \text{ dB}_U$$

² vgl. SK5212, 2006, Seite 29

Aufgabe 5:

Da hier nichts zusammengemischt wird, und der Verstärkungsgrad 1:1 ist:

$$0 \text{ dB}_U + 0 \text{ dB}_U = 0 \text{ dB}_U$$

Aufgabe 6:

a) Bei $[\text{dB}_U]$ ist die Bezugsspannung $0,775 \text{ V}$, bei $[\text{dB}_V]$ 1 V .

b) Berechnung für 1 V :

$$p_U = 20 \lg \frac{1 \text{ V}}{0,775 \text{ V}} = 2,2 \text{ dB}_U$$

$$p_V = 20 \lg \frac{1 \text{ V}}{1 \text{ V}} = 0 \text{ dB}_V$$

Folgerung: Bei gleicher Spannung ist der Pegel in $[\text{dB}_U]$ um $2,2 \text{ dB}_R$ größer als der Spannungspegel angegeben in $[\text{dB}_V]$.³

Kapitel 9**Aufgabe 1:**

- Elektrodynamisches Wandlerprinzip (Tauchspulenmikrofon und Bändchenmikrofon):
 - Vorteil: Einfach aufgebaut. Keine Phantomspeisung notwendig
 - Nachteil Tauchspulenmikrofon: Unregelmäßiger Frequenzgang. Verglichen mit Kondensatormikrofon größere Masse der Membran und daher schlechtes Impulsverhalten
- Elektrostatisches Wandlerprinzip (Kondensatormikrofon):
 - Vorteil: Frequenzgang ist annähernd linear. Geringe Masse der Membran und daher gutes Impulsverhalten
 - Nachteil: Phantomspeisung notwendig als Kapselvorspannung und zum Betrieb des Trennverstärkers
- Piezoelektrisches Wandlerprinzip (Tonabnehmer und Kontaktmikrofone)
 - Vorteil: Einfach aufgebaut und damit kostengünstig
 - Nachteil: Temperaturabhängigkeit von Empfindlichkeit und Frequenzgang. Hoher Klirrfaktor

³ vgl. Görne, 2007, Seite 16

Aufgabe 2:

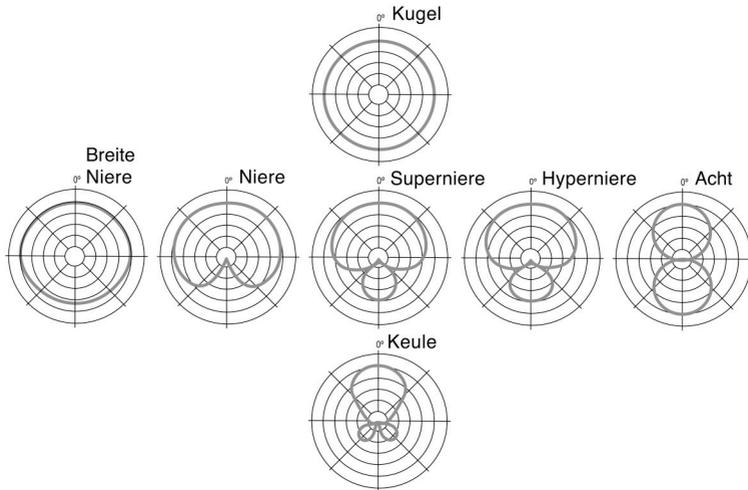


Abb. A.0.7: Mikrofon-Richtcharakteristiken
Oben Druckempfänger, Mitte Druckgradientenempfänger,
Unten: Interferenzempfänger

Aufgabe 3:

Nieren- und Achtercharakteristik.

Aufgabe 4:

Abgesehen von mechanischen Grenzen sinkt mit der Verkleinerung der Membran die Empfindlichkeit und die Eigenstörspannung wird größer. Dadurch resultiert ein schlechterer Signal-Rausch-Abstand.

Aufgabe 5:

Wellenlänge λ für 100 Hz: $\lambda = \frac{c}{f} = \frac{344 \text{ m/s}}{100 \text{ Hz}} = 3,44 \text{ m}$

Verhältnis Niere zur Kugel: $\frac{U_{\text{Niere}}}{U_{\text{Kugel}}} = \sqrt{1 + \frac{\lambda^2}{16\pi^2 r^2}} = \sqrt{1 + \frac{3,44^2}{16\pi^2 0,1^2}} = 2,91$

Verhältnis als Pegel: $L_U = 20 * \lg \frac{U_{\text{Niere}}}{U_{\text{Kugel}}} = 20 * \lg 2,91 = 9,3 \text{ dB}_R$

Kapitel 10

Aufgabe 1:

- Intensitätsstereofonie: Pegelunterschiede zwischen den Stereomikrofonen
- Laufzeitstereofonie: Laufzeitdifferenzen zwischen den Stereomikrofonen

Aufgabe 2:

Doppelt-MS, Soundfield, INA-5, OCT mit Surroundweiterung, Kugelflächenmikrofon mit Surroundweiterung, Holophone (und weitere...)

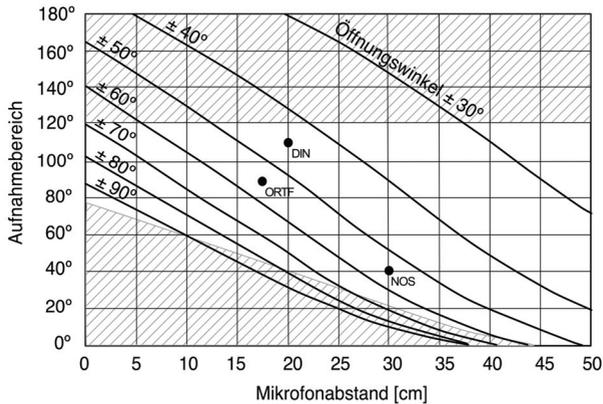
Aufgabe 3:

Abb. A.0.8: DIN, NOS und ORTF in den Williamskurven

Aufnahmebereiche: ORTF ca. 90°, DIN ca. 110°, NOS ca. 40°

Aufgabe 4:

Raumakustische Messungen, Hörspielproduktionen und Musikaufnahmen.

Aufgabe 5:

- Kammfilter-Effekt
- Zum Beispiel eine schalldurchlässige Pult-Konstruktion

Kapitel 11**Aufgabe 1:**

Pin 1 = Gnd, Pin 2 = Hot, Pin 3 = Cold

Aufgabe 2:

- Leistungsanpassung: $R_A = R_E$
→ maximale Leistungsübertragung
- Spannungsanpassung: $R_A \ll R_E$
→ maximale Spannungsübertragung (Leerlaufprinzip)
- Stromanpassung: $R_A \gg R_E$
→ maximale Stromübertragung (Stromsteuerung)

Aufgabe 3:

$$a) f_g = \frac{1}{2\pi * Z_A * C' * 10^{-12} * \ell} = \frac{1}{2\pi * 10000 * 75 * 10^{-12} * 10} = 21221 \text{ Hz}$$

$$b) f_g = \frac{1}{2\pi * Z_A * C' * 10^{-12} * \ell} = \frac{1}{2\pi * 10000 * 75 * 10^{-12} * 20} = 10610 \text{ Hz}$$

Ein Instrumentenkabel mit 20 m Länge hat eine Grenzfrequenz, die mit ca. 10 kHz innerhalb des Hörspektrums liegt. Die Höhendämpfung ist also sehr gut wahrnehmbar. Länger als 10 m sollten unsymmetrische Instrumentenkabel demnach nicht sein.

$$c) f_g = \frac{1}{2\pi * Z_A * C' * 10^{-12} * \ell} = \frac{1}{2\pi * 200 * 130 * 10^{-12} * 100} = 61213 \text{ Hz}$$

d) Die DI-Box funktioniert als Impedanzwandler; Eine typische passive DI-Box hat z.B. eine Eingangsimpedanz von 50 k Ω (unsymmetrisch) und eine Ausgangsimpedanz von 600 Ω (symmetrisch). Je niedriger die Ausgangsimpedanz, desto höher ist die Grenzfrequenz der angeschlossenen Leitung - wie bei der Berechnung unter c) gesehen. Die Vorverstärker eines Mischpultes sind für den Anschluss von niederohmigen symmetrischen Quellen ausgelegt.

Aufgabe 4:

- Sicher gegen elektromagnetische Einstreuungen
- Durch die galvanische Trennung entstehen keine Brummschleifen
- Auch sehr weite Distanzen ohne Qualitätsverlust möglich (viele Kilometer!)
- Leichtes und dünnes Kabel
- Redundante Verkabelung möglich

Kapitel 12**Aufgabe 1:**

Pro:

- Hoher Störspannungsabstand
- Hohe Übersprechdämpfung
- Signalverlustkompensation bei der Übertragung durch Fehlerkorrekturverfahren möglich
- Keine Qualitätsverluste beim Kopieren
- Vorteile bei der digitalen Bearbeitung: Graphische Bedienoberflächen, abspeicherbare Einstellungen, non-destruktives Arbeiten, Undo-Funktionen

Kontra:

- Quantisierungsrauschen: Nichtlineare Verzerrungen bei niedrigen Pegeln
- Kein Headroom
- Diagnoseprobleme bei Fehlfunktionen: Oft hilft Aus- und Einschalten des Gerätes (Reset), aber die eigentliche Fehlerursache bleibt unerkannt

Aufgabe 2:

Als Kanalcode wird Biphase-Mark verwendet, welcher aufgrund seiner häufigen Potentialwechsel selbsttaktend ist.

Aufgabe 3:

- AES/EBU: entweder symmetrisch mit XLR-Stecker und 110Ω Impedanz oder unsymmetrisch mit BNC-Stecker und 75Ω Impedanz
- S/P-DIF: Unsymmetrisch mit Cinch-Stecker und 75Ω Impedanz oder Lichtwellenleiter mit TosLink-Stecker

Aufgabe 4:

24 Bit

Aufgabe 5:

64 Tonkanäle mit jeweils 24 Bit

Aufgabe 6:

24, 25 oder 30 ganze Frames oder auch 29,97 Drop-Frame

Aufgabe 7:

Zur Vermeidung unerwünschter Störungen durch zu großen Jitter.

Aufgabe 8:

Eine zentrale Wordclock-Verteilung

Kapitel 13

Aufgabe 1:

MIDI

Aufgabe 2:

Signalverstärkung zur Übertragung von MIDI-Signalen über längere Wegstrecken mit symmetrischen Kabelverbindungen

Aufgabe 3:

1000 Note On und 1001 Note Off

Aufgabe 4:

16 MIDI-Kanäle

Aufgabe 5:

Binär: 1001 0001

Hexadezimal: 91_{Hex}

Dezimal: 145

Aufgabe 6:

Der Vorteil von mLAN ist die parallele Übertragung von Audio-, MIDI-, Takt- und Steuersignalen über ein Firewire-Kabel, anstatt einer Vielzahl von Kabeln wie bei einem herkömmlichen MIDI-Setup.

Kapitel 14**Aufgabe 1:**

GAIN: Eingangsverstärkung (Signal auf Arbeitspegel des Tonpultes anpassen)

PAD: Dämpfungsschalter (z.B. -20 dB)

PAN: Panorama-Potentiometer (Einordnung des Signals innerhalb des Stereobildes beim Abmischen)

Ø: Phasendreheschalter (Vertauscht Pin 2 und 3 des XLR-Anschlusses)

48V: Phantomspeisung (für Kondensatormikrofone oder aktive DI-Boxen)

PAN: *gehört nicht zum Mikrofonvorverstärker* (befindet sich im Signalweg nach dem Routing)

Aufgabe 2:

PFL = Pre Fader Listening; Abhörpunkt vor dem Fader

AFL = After Fader Listening; Abhörpunkt nach dem Fader

Aufgabe 3:

Tip = Send, Ring = Return, Gnd = Masse

Im Send- und Return-Stecker muss die Masse auf den Ring gelegt werden

Aufgabe 4:

VCA = Voltage Controlled Amplifier

Über einem einfach aufgebauten Fader läuft direkt das Audiosignal, welches nur passiv bedämpft werden kann.

Bei einer VCA-Steuerung läuft das Audiosignal über den VCA, dessen Arbeitspegel durch eine Steuerspannung geregelt wird. Diese Steuerspannung kann über einen Potentiometer (also auch durch einen Fader) variiert werden. Es ist eine aktive Verstärkung des Audiosignals möglich.

Aufgabe 5:

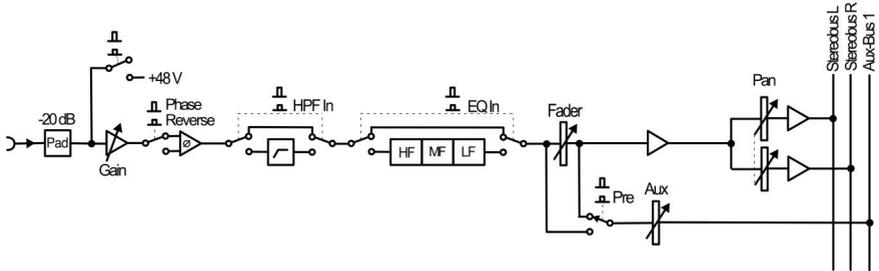


Abb. A.0.9: Prinzipschaltbild eines Eingangskanals

Kapitel 15

Aufgabe 1:

Die Differenz vom höchsten zum niedrigsten Pegel des Nutzsignals.

Aufgabe 2:

Ein Kompressor wird als Einschleifeffekt betrieben, da das Signal direkt in der Dynamik verändert werden soll.

Aufgabe 3:

THRESHOLD: Einsatzpunkt des Kompressors, Angabe in dB

RATIO: Kompressionsfaktor bei Überschreiten des Threshold, Angabe als Verhältnis von Eingangs- zu Ausgangspegel

ATTACK: Ansprechzeit nach Überschreiten des Threshold

RELEASE: Rücklaufzeit nach Unterschreiten des Threshold

Aufgabe 4:

Frequenz, Q-Faktor (Güte), Pegel. Eventuell Anwahl ob Peak- oder Shelving-Filter (nur bei Hi- und Low-EQ).

Aufgabe 5:

Verzögernde Geräte	Dynamikbearbeitende Geräte	Entzerrende Geräte
Hall	Kompressor	Equalizer
Chorus	Gate	Exciter

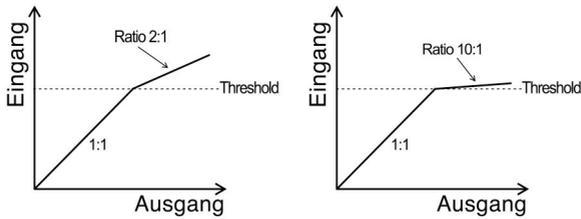
Aufgabe 6:

Abb. A.0.10: Kennlinie eines Kompressors (links) und Limiters (rechts)

Unterscheidung der Kennlinien: Ein Limiter hat eine Ratio von mindestens 10:1, die Ratio bei einem Kompressor ist wesentlich geringer.

Kapitel 16**Aufgabe 1:**

a) Spannungsanpassung $Z_E \gg Z_A$

b) Professionelle Endstufen sollten einen Dämpfungsfaktor von mindestens 100 aufweisen. Daraus errechnet sich der geforderte Innenwiderstand R_i mit $0,04 \Omega$.

$$D = \frac{4 \Omega}{0,04 \Omega} = 100$$

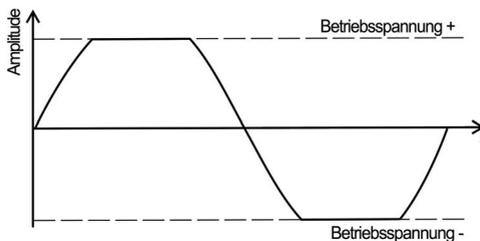
Aufgabe 2:

Abb. A.0.11: Clipping einer Sinusschwingung

Aufgabe 3:

- Entzerrung
- Aktive Frequenzweiche
- Phasengangkorrektur nach der Weiche
- Übersteuerungsschutz

Aufgabe 4:

= Hochpass (Signal für Hochtöner)



= Bandpass (Signal für Mitteltöner)



= Tiefpass (Signal für Subwoofer)

Aufgabe 5:*100V-Anlagen:*

- Leistungsverstärker mit Ausgangsübertrager
- Anpassungsübertrager vor den Lautsprechern
- Zweck: Ausgangsspannung des Verstärkers konstant halten
- Vorteil: Geringer Leitungsquerschnitt und lange Wege der LS-Kabel möglich und damit gut geeignet für weit verzweigte Netze mit zentralen Verstärkern und vielen Lautsprechern wie z.B. für Durchrufanlagen in Gebäuden
- Als Nachteil wird oft ein eingeschränkter Frequenzbereich genannt, d.h. klangliche Schwächen. Allerdings lässt sich das durch den Einsatz von qualitativ guten Übertragern vermeiden

Niederohmige Beschallungsanlagen:

- Prinzip: Ein Verstärker und ein Lautsprecher
- Ziel: Maximale Leistung der Verstärkers an den Lautsprecher
- Vorteil: Voller Übertragungsbereich, daher bevorzugte Technik für Beschallungsanlagen
- Nachteil: Verluste durch lange LS-Kabelwege bzw. zu geringen Leitungsquerschnitten; Daher sind die Verstärker nahe an den Lautsprecher positioniert. Allerdings spielt dieser Kritikpunkt bei aktiven Lautsprechern keine Rolle mehr.⁴

⁴ vgl. Ahnert und Steffen, 1993, Seite 148 und 149

Kapitel 17

Aufgabe 1:

Reihenschaltung: $Z_1 = Z + Z = 8 \Omega + 8 \Omega = 16 \Omega$

Parallele Schaltung: $\frac{1}{Z_2} = \frac{1}{Z} + \frac{1}{Z} = \frac{1}{8 \Omega} + \frac{1}{8 \Omega} = \frac{1}{4 \Omega} \rightarrow Z_2 = 4 \Omega$

Aufgabe 2:

- Herkömmliche Lautsprecher = Punktstrahler

Bei einer Entfernungsverdoppelung wird die Schalleistung auf eine viermal so große Fläche verteilt, der Schalldruckpegel nimmt um 6 dB_{SPL} ab.

$$A = \pi * (2 * r)^2$$

- Line Arrays = Linienstrahler

Bei einer Entfernungsverdoppelung wird die Schalleistung auf eine zweimal so große Fläche verteilt, der Schalldruckpegel nimmt um 3 dB_{SPL} ab.

$$A = \frac{1}{2} \pi * (2 * r)^2$$

Aufgabe 3:

Berechnung über den Leistungspegel:

$$L = 10 \lg \frac{P_2}{P_1} \quad \text{Einheit [dB]}$$

Eine Verdoppelung der Leistung führt zu einem um +3dB_{SPL} höheren Schalldruckpegel.

Aufgabe 4:

- Tieftöner: Konuslautsprecher
- Mitteltöner: Konuslautsprecher, Druckkammerlautsprecher, Folienmagnetostat, Elektrostat
- Hochtöner: Kalottenlautsprecher, Druckkammerlautsprecher, Bändchen- und Folienmagnetostat, Elektrostat

Aufgabe 5:

- *Erster Schritt:* Berechnung des Schalldruckpegels in 1m Entfernung bei 64W

$$\text{Zunahme des Schalldruckpegels: } 10 \lg \frac{64 \text{ W}}{1 \text{ W}} = 18 \text{ dB}$$

$$\text{Gesamtschalldruckpegel in 1m Entfernung: } 94 \text{ dB}_{\text{SPL}} + 18 \text{ dB} = 112 \text{ dB}_{\text{SPL}}$$

- *Zweiter Schritt:* Berechnung der Schalldruckpegelabnahme für 2m, 5m und 10m

$$\Delta L_{2\text{m}} = 20 \lg \frac{2 \text{ m}}{1 \text{ m}} = 6 \text{ dB} \rightarrow \text{Schalldruckpegel}_{2\text{m}} = 106 \text{ dB}_{\text{SPL}}$$

$$\Delta L_{5\text{m}} = 20 \lg \frac{5 \text{ m}}{1 \text{ m}} = 14 \text{ dB} \rightarrow \text{Schalldruckpegel}_{5\text{m}} = 98 \text{ dB}_{\text{SPL}}$$

$$\Delta L_{10\text{m}} = 20 \lg \frac{10 \text{ m}}{1 \text{ m}} = 20 \text{ dB} \rightarrow \text{Schalldruckpegel}_{10\text{m}} = 92 \text{ dB}_{\text{SPL}}$$

- *Dritter Schritt:* Skizzen zeichnen.

Dabei wird ersichtlich, dass es bei der Variante mit 2m Höhe nur bei waagrechter Anbringung der Lautsprecher (Abstrahlwinkel 60° Horizontal und 90° Vertikal) zu einer halbwegs flächendeckenden Beschallung kommen kann. Betrachtet man dann aber jeweils nur eine Beschallungslinie, dann fällt auf, dass die vorderen Zuhörer mit 2m Abstand einen recht hohen Schalldruckpegel bekommen, nämlich 106 dB_{SPL}, die hinteren bei 10m Entfernung nur 92 dB_{SPL}.

Variante mit 5m Höhe: Eine flächendeckende Beschallung ist bei senkrechter Anbringung (Abstrahlwinkel 90° Horizontal und 60° Vertikal) gegeben. Die vorderen Zuhörer haben in Ohrhöhe 98 dB_{SPL}, die hinteren 92 dB_{SPL} → Diese Variante ist vorzuziehen, da hier die Abnahme des Schalldruckpegel innerhalb einer Zone geringer ist. Insgesamt ist hier auch eine bessere „Ausleuchtung“ der zu beschallenden Fläche gegeben.

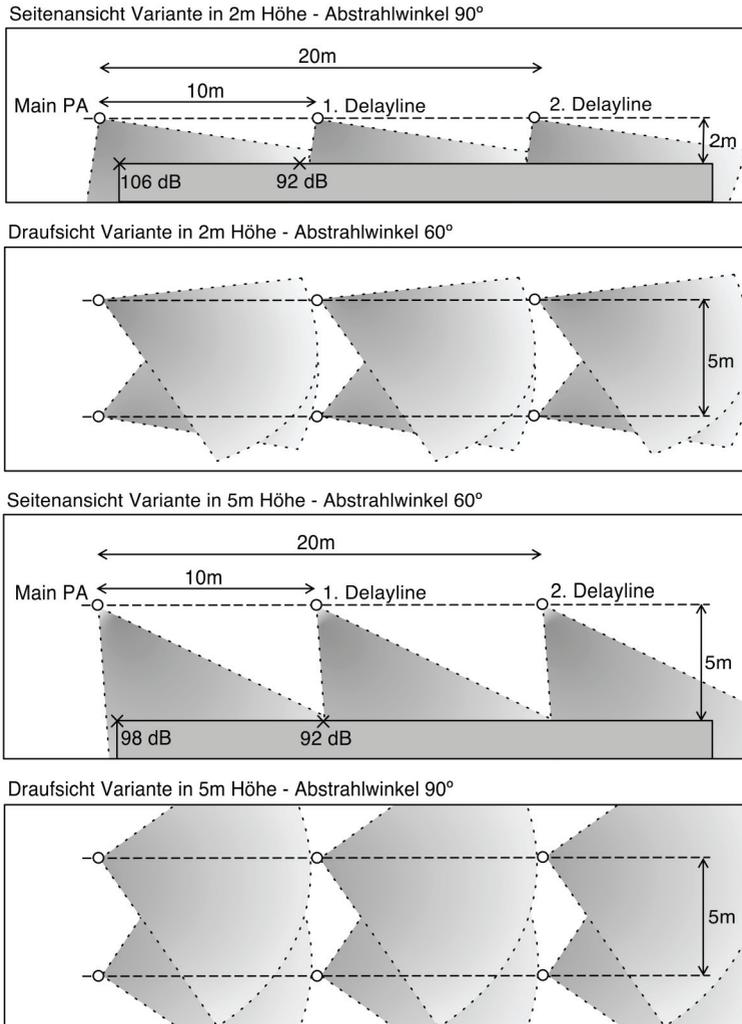


Abb. A.0.12: Verteilung des Schalldruckpegels

Kapitel 18

Aufgabe 1:

Für die drahtlose Tonübertragung nutzbarer VHF-Bereich = 174 bis 223 MHz

Aufgabe 2:

Berechnung der Intermodulationsfrequenzen dritter Ordnung:

$$2f_1 - f_2 = (2 * 760,000 \text{ MHz}) - 774,100 \text{ MHz} = 745,900 \text{ MHz}$$

$$2f_2 - f_1 = (2 * 774,100 \text{ MHz}) - 760,000 \text{ MHz} = 788,200 \text{ MHz}$$

→ Die Trägerfrequenz des Reportagemikrofons liegt sehr nahe an einer der Intermodulationsfrequenzen der Mikroportsender und sehr wahrscheinlich ist daher kein störungsfreier Betrieb möglich.

Aufgabe 3:

Squelch = Rauschsperrung. Mit dem Squelch wird ein Schwellenpegel eingestellt, den ein HF-Signal überschreiten muss, damit es im Empfänger weiterverarbeitet wird.

Aufgabe 4:

Bei einer Dolmetscheranlage wird ein Mehrkanalsender mit verschiedenen Trägerfrequenzen eingesetzt. Für jede Sprache wird ein Kanal benötigt. Die Audiosignale kommen von Steuereinheiten in den Dolmetscherkabinen. An die Steuereinheiten sind Headsets angeschlossen, die ein gleichzeitiges Hören und Sprechen zur Simultanübersetzung ermöglichen.

Aufgabe 5:

Abhängig von der Amplitude des Nutzsignals ändert sich die Frequenz einer Trägerwelle.

Kapitel 19

Aufgabe 1:

Bei einer Partyline-Intercom kann jeder Gesprächsteilnehmer mit allen anderen Teilnehmern auf der gleichen Leitung kommunizieren.

Aufgabe 2:

- Clearcom:

XLR Pin 1 = 0 V DC und Masse für Audiokanal 1

XLR Pin 2 = 30 V DC

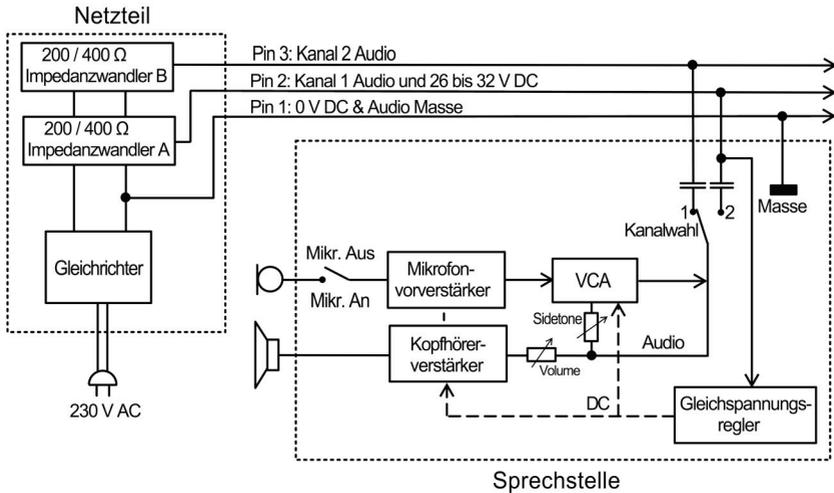
XLR Pin 3 = Audiokanal 1

- RTS:

XLR Pin 1 = Masse für Gleichstromversorgung und beide Audiokanäle

XLR Pin 2 = Audiokanal 1 und 26 bis 32 V DC

XLR Pin 3 = Audiokanal 2

Abb. A.0.13: RTS Prinzipschaltung⁵**Aufgabe 3:**

Simplex = Wechselsprechen auf einem Kanal

Duplex = Senden und Empfangen auf zwei verschiedenen Kanälen

Aufgabe 4:

Die Bundesnetzagentur. Webseite: <http://www.bundesnetzagentur.de>

Kapitel 20**Aufgabe 1:**

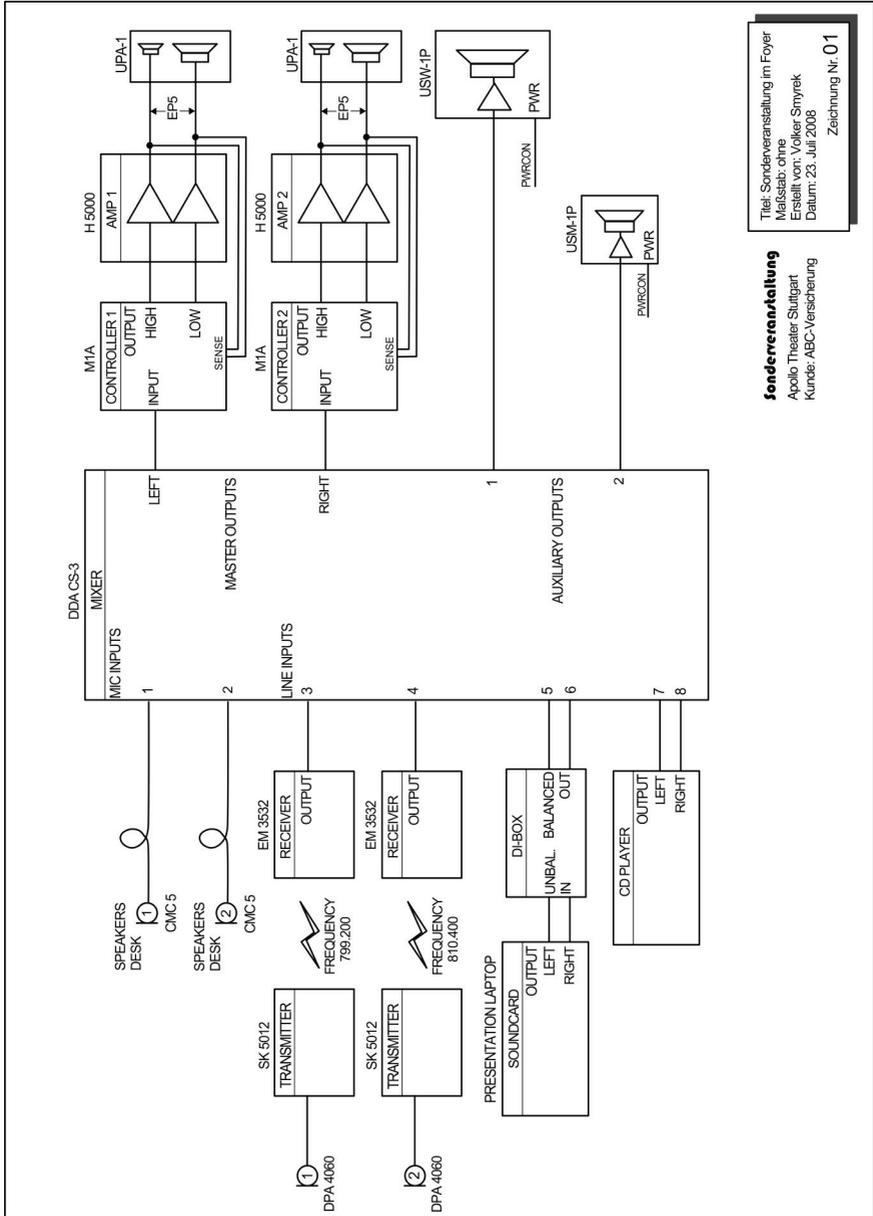
Als Bezugspunkt für die Verzögerung aller Lautsprechersysteme dient eine Position auf der Bühne, wo sich eine reale Schallquelle befindet (z.B. Schlagzeug bei einer Konzertbesprechung, oder die Schauspieler eines Bühnenstücks etc.). In den allerwenigsten Fällen befindet sich dieses Schallereignis auf einer Linie mit der Hauptbesprechung.

Aufgabe 2:

- Der Abstand von Mikrophon zum Lautsprecher
- Die Schallgeschwindigkeit (Diese ist variabel durch die Temperatur und die Luftfeuchtigkeit)

⁵ vgl. Telex, 2002, Seite 34

Aufgabe 3:



Titel: Sondernereinstellung im Foyer
 Maßstab: ohne
 Erstellt von: Volker Smynek
 Datum: 23. Juli 2008
 Zeichnung Nr.: 01

Sondernereinstellung
 Apollo Theater Stuttgart
 Kunde: ABC-Versicherung

Abb. A.0.14: Signalflossplan einer kleinen Beschallungsanlage

Kapitel 21

Aufgabe 1:

Bus, Ring, Stern oder dezentrale Strukturen

Aufgabe 2:

Die physikalischen Parameter des Netzwerkes, d.h. die Art des Mediums, Frequenzen, Modulationsverfahren etc.

Aufgabe 3:

- Ethernetbasierte Audionetzwerke: Handelsübliche Computer und Ethernettechnik. Beispiele: EtherSound und CobraNet.
- Proprietäre Audionetzwerke: Herstellerspezifische Hardware und Übertragungsprotokolle. Beispiele: A-Net, RockNet, Optocore, Nexus, AES50.

Aufgabe 4:

Der Abtastlaser der DVD hat eine kleinere Wellenlänge und damit sind engere Spuren möglich, zudem ist die Abtastgeschwindigkeit höher als bei der CD. Eine DVD kann außerdem auf beiden Seiten in jeweils zwei Schichten Daten speichern.

Aufgabe 5:

Kreativ-Aufgabe! Hier gibt es keine Musterlösung.

Kapitel 22

Aufgabe 1:

Im Gegensatz zum menschlichen Auge kann sich eine Videokamera nicht selbstständig an wechselnde Farbtemperaturen der Beleuchtung anpassen. Die Verstärkung der R- und B-Kanäle muss daher manuell nachgeregelt oder eine Automatikfunktion eingeschaltet werden.

Aufgabe 2:

- Jeweils ein Bildwandler-Chip für R, G und B (3-Chip-Projektor). Das Licht der Projektorlampe wird über ein Prisma in die Primärfarben geteilt und auf die DLP-Chips geführt
- Ein DLP-Chip besteht aus einer Vielzahl beweglicher, winzig kleiner Spiegel, welche das Licht in die Projektionslinse und damit zur Leinwand leiten
- Die Anzahl der Mikrospiegel bestimmt die Auflösung des Projektors

Aufgabe 3:

Damit beim Umschalten und Blenden zwischen den Signalen keine Bildstörungen entstehen.

Aufgabe 4:

CCD- und CMOS-Chips.

Aufgabe 5:

CCU = Camera Control Unit

Stromversorgung des Kamerazuges, Steuerung der Kameraparameter, Entzerrung zum Ausgleich der Kabellänge.

Aufgabe 6:

MPEG = Motion Picture Experts Group

MPEG-Standards definieren verschiedene verlustbehaftete Verfahren zur Bild- und Tondatenkompression.

- MPEG 2: Komprimierte Video- und Tonübertragung in Fernsehqualität. Anwendung z.B. bei DVB und DVD
- MPEG-4: Container-Format für Video, Audio und weitere Daten. Übertragung mit geringen Bandbreiten z.B. bei Mobiltelefonen

Quellen

AES Standard 10-2003 (2003): Serial Multichannel Audio Digital Interface.
New York, USA: Audio Engineering Society.

AES Standard 11-2003 (2003): Synchronization of digital audio equipment in studio operations.
New York, USA: Audio Engineering Society.

AES Standard 12id-2006 (2006): Jitter performance specifications.
New York, USA: Audio Engineering Society.

AES Tutorial No. 69 (2006): Preventing Hearing Loss.
New York, USA: Audio Engineering Society.

Ahnert, Wolfgang und Reichardt, Walter (1981): Grundlagen der Beschallungstechnik.
Stuttgart: Hirzel Verlag.

Ahnert, Wolfgang und Steffen, Frank (1993): Beschallungstechnik.
Stuttgart: Hirzel Verlag.

Albrecht, Frank-Werner, Mayer-Fasold, C., Veit, Ivar und Korthals, Thomas (1995): Beschallungstechnik.
Renningen-Malmsheim: Expert Verlag.

ARRI (2003): White Paper Technology Project D-20.
München: Arnold & Richter Cine Technik.

BC 107 (1997): Data Sheed.
Eindhoven, Niederlande: Philips Electronics.

Beta91 (2003): User Guide.
Niles, USA: Shure Incorporated.

BGI 504-20 (1998): Auswahlkriterien für die spezielle arbeitsmedizinische Vorsorge nach dem Berufsgenossenschaftlichem Grundsatz G20.
Mainz: Berufsgenossenschaft Metall Süd.

BGI 712 (1994): Lärminderungsprogramme.
Langenhagen: Steinbruchs-Berufsgenossenschaft bzw.
Köln: Carl Heymanns Verlag

BGV B 3 (2005): Unfallverhütungsvorschrift Lärm.
Hamburg: Verwaltungsberufsgenossenschaft.

Blauert, Jens (1974): Räumliches Hören.
Stuttgart: Hirzel Verlag.

Bock, Wolfgang (1981): Synthesizer.
Hamburg: Taurus Press.

Boré, Gerhart und Peus, Stephan (1999): Mikrophone.
Berlin: Georg Neumann GmbH.

Boye, Günther und Herrmann, Urbi F. (1989): Handbuch der Elektroakustik.
Heidelberg: Hüthig Verlag.

Brixen, Eddy Bøgh (2001): Audio Metering.
Broadcast Publishing & DK Audio A/S, Dänemark.

Brüssau, Horst H. (1992): Raumakustisches Beratungsgutachten zum Neubau des Musiktheaters im Bauvorhaben Musical + Hotel SI.
Gutachten einsehbar im Zentralarchiv des SI-Centrum Stuttgart, Dr. Sasse Facility Management GmbH.

Bruns, Kai und Meyer-Wegener, Klaus (2005): Taschenbuch der Medieninformatik.
Leipzig: Fachbuchverlag.

Bundesgesetzblatt (08. März 2007): Verordnung zur Umsetzung der EG-Richtlinien 2002/44/EG und 2003/10/EG zum Schutz der Beschäftigten vor Gefährdung durch Lärm und Vibrationen.
Köln: Bundesanzeiger Verlagsgesellschaft mbH.

Canon (2005): White Paper HDTV Lens Design.
Ridgefield Park, USA: Canon Broadcast & Communication Division.

Conrad, Jan-Friedrich (1995): Recording.
Bergkirchen: PPV Medien

Cremer, Lothar und Möser, Michael (2003): Technische Akustik.
Berlin: Springer Verlag.

CT-Magazin (11/2003): So arbeiten MPEG-2-Encoder.
Artikel von Holger Dambeck in der Ausgabe 11/2003.
Hannover: Heise Verlag.

Curdts, Oliver (2005): Unterlagen zu den Vorlesungen mit den Themen: Digitale Filter, Entzerrung, Mikrofone, Grundlagen der Raumakustik, Sounddesign für eine Theateraufführung.
Stuttgart: Hochschule der Medien.

Czichos, Horst und Hennecke, Manfred – Hrsg. (2008): Das Ingenieurwissen.
Berlin: Springer Verlag.

Dickreiter, Michael (1987): Handbuch der Tonstudioteknik, Band 1.
München: Saur Verlag.

Dickreiter, Michael (1990): Handbuch der Tonstudioteknik, Band 2.
München: Saur Verlag.

Dickreiter, Michael (1995): Mikrofonaufnahmetechnik.
Stuttgart, Leipzig: Hirzel Verlag.

DIN 15 905 (2007): Veranstaltungstechnik - Tontechnik, Teil 5: Maßnahmen zum Vermeiden einer Gehörgefährdung des Publikums durch hohe Schallimmissionen elektroakustischer Beschallungstechnik, Ausgabe 2007-11.
Berlin: Deutsches Institut für Normung e.V.

DIN 45 645 (1997): Ermittlung von Beurteilungspegeln aus Messungen, Teil 2: Geräuschimmissionen am Arbeitsplatz, Ausgabe 1997-07.
Berlin: Deutsches Institut für Normung e.V.

Dittmar, Manfred (1990): Schall und Schallausbreitung.
SRT-Schriftenreihe Band 6.
Nürnberg: Schule für Rundfunktechnik.

DMX-R100 (1999): Operating Instructions.
Tokio, Japan: Sony Corporation.

E3 (2003): Handbuch.
Backnang: d&b audiotechnik.

Ebner, Michael (2002): Handbuch der PA-Technik.
Aachen: Elektor Verlag.

Ebner, Michael (2004): Zulässige Lautstärke bei Veranstaltungen.
Powerpoint-Präsentation zum Vortrag beim Forumstag Lautstärke 2004 in Bonn.
Downloadadresse der Datei:
http://www.pa-forum.de/berichte/forumstag_1.ppt

Ebner, Michael, Rehm, Andreas und Stiewe, Andreas (2007):
Lärm wird sichtbar.
Informationsbroschüre zum Einsatz von dBmess bei Blue Man Group.
Oberhausen: Metronom Theater.

Eisner, Uli (2006): Mixing Workshop.
Bergkirchen: PPV Medien.

Eska, Georg (1997): Schall & Klang.
Basel: Birkhäuser Verlag.

Eurovent (2004): Recommendation concerning Presentation of Acoustical Data of Industrial Fans.
Paris, Frankreich: Eurovent / Cecomaf Technical Secretariat.
Downloadadresse des PDF-Dokuments:
<http://www.eurovent-cecomaf.org/web/eurovent/web/recommendations/rec17.pdf>

Fasold, Wolfgang und Veres, Eva (2003): Schallschutz & Raumakustik in der Praxis.
Berlin: Huss-Medien, Verlag Bauwesen.

Fastl, Hugo und Zwicker, Eberhard (2007): Psycho-Acoustics.
Berlin: Springer Verlag.

FKT Fachzeitschrift für Fernsehen, Film und elektronische Medien
(06/2008): CMOS-Kameras.
Verschiedene Artikel zum Thema in der Ausgabe 6/2008.
Berlin: Schiele & Schön Verlag.

Fleischer, Edwin (2004): Bewegtbildprojektion.
Diplomarbeit.
Stuttgart: Hochschule der Medien.

Fluch, Detlef (2008): Technische Grundlagen für Mediengestalter.
Norderstedt: Books on Demand GmbH.

Friedrich, Hans Jörg (2008): Tontechnik für Mediengestalter.
Berlin: Springer Verlag.

Friesecke, Andreas (2007): Studio Akustik.
Bergkirchen: PPV Medien.

Funkschau (07/1978): Vocoder VSM 201.
Artikel von Dietrich Buder in der Ausgabe 7/1978.
Poing: WEKA Fachmedien.
Kopie des Artikels ist online verfügbar auf der Webseite von Richard Davies:
<http://web.inter.nl.net/hcc/davies/vocpage.htm>

Goertz, Anselm (2001): Workshop Raumakustik.
Halle: Hochschule für Kunst und Design.

Goehring, Daniel (2002): Digitalkameratechnologien.
Berlin: Humboldt-Universität.
Downloadadresse:
<http://www.informatik.hu-berlin.de/~goehring/papers/ccd-vs-cmos.pdf>

Görne, Thomas (2006): Tontechnik.
Leipzig: Carl Hanser Verlag.

Görne, Thomas (2007): Mikrofone in Theorie und Praxis.
Aachen: Elektor Verlag.

H5000 (2002): Bedienungsanleitung.
Hamamatsu, Japan: Yamaha Corporation.

Hanus, Bo (2008): Akkus und Batterien richtig pflegen und laden.
Poing: Franzis Verlag.

von Helmholtz, Hermann (1968): Die Lehre von den Tonempfindungen.
Nachdruck der sechsten Ausgabe von 1912.
Darmstadt: Wissenschaftliche Buchgesellschaft.

Henle, Hubert (1993): Das Tonstudio Handbuch.
München: Gunther Carstensen Verlag.

Hoffmann, Heinz, von Lüpke, Arndt und Maue, Jürgen H. (1999):
0 Dezibel + 0 Dezibel = 3 Dezibel.
Berlin: Erich Schmidt Verlag.

Holtmeyer, Volker (2004): Kenndaten von Lautsprechern.
Bischhofsheim: IFB Consulting.
Downloadadresse des PDF-Dokuments:
www.ifbcon.de/publication/documents/d_CAVIS-2004_VH_Lautsprecher-Kenndaten.pdf

Institut Mikroelektronische Schaltungen und Systeme (2007): CMOS Image
Sensor Arrays.
München / Duisburg: Fraunhofer Gesellschaft.
Downloadadresse des PDF-Dokuments:
http://www.ims.fhg.de/uploads/media/cmos_image_sensor_arrays_en_09.pdf

Institut für Phonetik und digitale Sprachverarbeitung (2005): Modul 1C.
Kiel: Christian-Albrechts-Universität.
Downloadadresse des Textes:
<http://www.ipds.uni-kiel.de/Dokumente/ModulC/>

Itrel, Hans (2003): Farben – Natur, Technik, Kunst.
Heidelberg: Spektrum Akademischer Verlag.

JBL (1999): Sound System Design Reference Manual.
Northridge, USA: JBL Professional.

JF80z (2005): Technical Specifications.
Whitinsville, USA: Eastern Acoustic Works.

Kories, Ralf und Schmidt-Walter, Heinz (2000): Taschenbuch der
Elektrotechnik.
Frankfurt am Main: Harri Deutsch Verlag.

Krieg, Bernhard (1992): Digitale Audiotechnik ohne Ballast.
München: Franzis Verlag.

Live Sound International (05/2003): Large Frame Consoles 2003.
Artikel von Herman, Mark in der Zeitschrift Ausgabe Mai 2003.
Framingham, USA: EH Publishing.
Online verfügbar unter:
<http://www.livesoundint.com/archives/2003/may/consoles2/consoles2.php>

Lustig, Peter (1987): Vertonen.
Hamburg: Rowohlt Taschenbuch Verlag.

- Mäusl, Rudolf** (1998): Repetitorium Fernsehtechnik.
München: Rhode & Schwarz.
- Maue, Jürgen H.** (2006): Bestimmen der Lärmexposition an Arbeitsplätzen.
Sonderdruck aus der Zeitschrift Sicherheitsingenieur, Ausgabe 5/2006.
- Maute, Dieter** (2006): Technische Akustik und Lärmschutz.
München: Hanser Verlag.
- McCarthy, Bob** (2001): Meyer Sound Design Reference.
Berkeley, USA: Meyer Sound Laboratories.
- MD421** (1998): Gebrauchsanleitung.
Wedemark: Sennheiser electronic.
- Meister, Heinz** (2007): Elektrotechnische Grundlagen.
Würzburg: Vogel Buchverlag.
- Meyer, Jürgen** (1999): Akustik und musikalische Aufführungspraxis.
Frankfurt am Main: Bochinsky Verlag.
- Meyer-Schwarzenberger, Gernot** (1976): Pegel A, B und C.
SRT-Lernprogramme 113, 114 und 115.
Nürnberg: Schule für Rundfunktechnik.
- Mueller, Jens** (2004): Handbuch der Lichttechnik.
Bergkirchen: PPV Medien.
- Nusser, Rolf** (1990): Grundlagen der Stereophonie.
SRT-Schriftenreihe Band 12
Nürnberg: Schule für Rundfunktechnik.
- P7000S** (2003): Bedienungsanleitung.
Hamamatsu, Japan: Yamaha Corporation.
- Pawera, Norbert** (1993): Mikrofonpraxis.
München: Franzis Verlag.
- Pieper, Frank** (1996): Das P.A. Handbuch.
München: Gunther Carstensen Verlag.
- Pieper, Frank** (1999): Das Effekte Praxisbuch.
München: Gunther Carstensen Verlag.
- Rode, Martin** (2005): Evulation von Kammfiltereffekten bei Laufzeitstereophonie mit mehr als zwei Mikrofonen.
Magisterarbeit.
Berlin: Technische Universität Berlin.

Roederer, Juan G. (1995): Physikalische und psychoakustische Grundlagen der Musik.

Berlin: Springer Verlag.

Roland (2003): MIDI-Guide.

Norderstedt: Roland Elektronische Musikinstrumente.

Online-Version: <http://www.midiguide.de>

Rumsey, Francis (1991): Digital Audio Operations.

Oxford, GB: Focal Press.

Schenk, Christoph und Tietze, Ulrich (1999): Halbleiter-Schaltungstechnik.

Berlin: Springer Verlag.

Schiller, Ulli (2008): Total verkabelt.

Artikel in der Zeitschrift RecMag Classic, Ausgabe Sonderheft 2/2008.

Bergkirchen: PPV Medien.

Schmidt, Ulrich (1996): Digitale Videotechnik.

Feldkirchen: Franzis Verlag.

Schmidt, Ulrich (2000): Professionelle Videotechnik.

Berlin: Springer Verlag.

Schmidt, Ulrich (2002): Digitale Film- und Videotechnik.

Leipzig: Fachbuchverlag.

Schoeps (2004): Surround-Aufnahmetechniken.

Newsletter No. 6.

Karlsruhe: Schoeps GmbH.

Schreiner, Rüdiger (2007): Computer Netzwerke.

München: Hanser Verlag.

Schröder, Gottfried (1998): Technische Optik.

Würzburg: Vogel Fachbuch Verlag.

Sengpiel, Eberhard (2008a): Bündelungsgrad und Bündelungsmaß der Mikrofone.

PDF-Dokument abrufbar unter:

<http://www.sengpielaudio.com/BuendelungsgradBuendelungsmassMikro.pdf>

Sengpiel, Eberhard (2008b): Mikrofone im Kugelschallfeld.

PDF-Dokument abrufbar unter:

<http://www.sengpielaudio.com/MikrofoneImSchallfeld.pdf>

Sengpiel, Eberhard (2008c): Relativer Abstandsfaktor und wirksamer Hallradius.

PDF-Dokument abrufbar unter:

<http://www.sengpielaudio.com/RelativerAbstandsfaktor.pdf>

Sengpiel, Eberhard (2008d): Untere Grenzfrequenz beim Grenzflächenmikrofon.

PDF-Dokument abrufbar unter:

<http://www.sengpielaudio.com/UntereGrenzfrequenzbeimGrenzflaechenmikrofon.pdf>

Sengpiel, Eberhard (2008e): Zwei verschiedene Grenzflächenmikrofon-Bauarten.

PDF-Dokument abrufbar unter:

<http://www.sengpielaudio.com/ZweiVerschiedeneGrenzflaechenmikrofone.pdf>

Sennheiser Revue (1999): Planungsteil IR-Technik für die Praxis. Teil 4, Ausgabe 11/99.

Wedemark: Sennheiser electronic.

Sennheiser Revue (2002): Planungsteil HF-Technik für die Praxis. Teil 3, Ausgabe 05/02.

Wedemark: Sennheiser electronic.

SK5212 (2006): Bedienungsanleitung.

Wedemark: Sennheiser electronic.

SRT (2000): Ausbildungshandbuch audiovisuelle Medienberufe Band 1 und 2. Heidelberg: Hüthig Verlag.

Stark, Berndt (1999): Lautsprecher Handbuch. München: Richard Pflaum Verlag.

Steinmetz, Ralf (2000): Multimedia-Technologie. Berlin: Springer Verlag.

Stickel, Andrea (2003): Faszination Gehör. Bergkirchen: PPV Medien.

Stöcker, Horst (2000): Taschenbuch der Physik. Frankfurt am Main: Harri Deutsch Verlag.

Studio Magazin (04/2008): Es muss nicht immer Röhre sein. Ein Gespräch mit Mikrofonspezialist Andreas Grosser. 31. Jahrgang, Ausgabe Nr. 333. Oberhausen: Studio Presse Verlag GmbH

SUVA Pro (2001): Der persönliche Gehörschutz. Luzern, Schweiz: Schweizerische Unfallversicherungsanstalt.

Telex (2002): Handbook of Intercom Systems Engineering. Burnsville, USA: Telex Communications.

Tolan, Metin (2006): Powerpoint-Präsentation Nr. 3 zur Vorlesung Physik III im WS 2005/06 an der Universität Dortmund.

PDF-Download:

http://e1.physik.uni-dortmund.de/Physik3_0506/Vorlesung_Tolan/physik3_03_2005x.pdf

USITT (2007): Sound Graphics Standards.

PDF-Download:

http://www.usitt.org/commissions/sound/Documents/070123_USITT_Sound_Graphics_Standards_DRAFT.pdf

VDT Magazin (02/2004): Surround-Mikrofone.

Verschiedene Verfasser von Artikeln zum Thema in der Ausgabe 2/2004.

Bergisch-Gladbach: Bildungswerk des Verbandes Deutscher Tonmeister.

VDT Magazin (03/2008): Mikrofon-Technologie heute und morgen – Teil 1.

Artikel von Elke Wisse in der Ausgabe 2/2004.

Bergisch-Gladbach: Bildungswerk des Verbandes Deutscher Tonmeister.

Veit, Ivar (2005): Technische Akustik.

Würzburg: Vogel Fachbuch.

Venice (2001): Operators Manual.

Worcestershire, England: Midas / Telex Pro Audio Group.

Verordnung über die Berufsausbildung (2002): Fachkraft für Veranstaltungstechnik.

Bielefeld: W. Bertelsmann Verlag.

VSGA (03/2000): Sechste Allgemeine Verwaltungsvorschrift zum Bundes-Immissionsschutzgesetz (Technische Anleitung zum Schutz gegen Lärm – TA Lärm).

Download als PDF-Dokuments:

<http://www.umweltbundesamt.de/laermprobleme/publikationen/talaerm.pdf>

Walker, Jearl (2008): Der fliegende Zirkus der Physik.

München: Oldenbourg Wissenschaftsverlag.

Webers, Johannes (2003): Handbuch der Tonstudioteknik.

München: Markt&Technik Buch- und Software-Verlag.

Webers, Johannes (2008): Handbuch der Film- und Videotechnik.

Pöng: Franzis Verlag.

Weinzierl, Stefan – Hrsg. (2008): Handbuch der Audiotechnik.

Berlin: Springer Verlag.

White, Ron (1998): So funktionieren Computer.

Pöng: Franzis Verlag.

Wikibooks.org (2008): Computerhardware.
<http://de.wikibooks.org/wiki/Computerhardware>

Wikipedia.org (2008): Schallgeschwindigkeit.
<http://de.wikipedia.org/wiki/Schallgeschwindigkeit>

Williams, Michael (1984): A Practical Approach to Determining the Characteristics of a Spaced Pair of Directional Microphones. Paper No. 2072 of the 75th AES Convention (März 1984). New York, USA: Audio Engineering Society.

Wirsum, Siegfried (1991): Praktische Beschallungstechnik. München: Franzis Verlag.

Wittels, Tillmann (2008): Kommunikation ist alles. Artikel in der Zeitschrift PMA-Magazin, Ausgabe 4/2008. Bergkirchen: PPV Medien.

Wuttke, Jörg (2000): Mikrofonaufsätze. Karlsruhe: Schoeps GmbH.

Zastrow, Peter (1984): Phonotechnik. Frankfurt am Main: Frankfurter Fachverlag.

Zollner, Manfred und Zwicker, Eberhard (2003): Elektroakustik. Berlin: Springer Verlag.

ZVEI (1999): Professionelle Beschallungstechnik / ELA-Info Broschüre. Frankfurt am Main: Leistungsgemeinschaft Beschallungstechnik im ZVEI.

Informationen aus dem Internet wurden zuletzt im November 2008 abgerufen.

Abbildungsverzeichnis

Abb. 1.1: Gitarre als Schallerzeuger	19
Abb. 1.2: Longitudinalwelle	20
Abb. 1.3: Verdünnungs- und Verdichtungsfronten	20
Abb. 1.4: Kugelwellen und ebene Wellen	21
Abb. 1.5: Schallausbreitung bei einer Inversionswetterlage	23
Abb. 1.6: Schallausbreitung bei mit der Höhe abnehmender Temperatur.....	23
Abb. 1.7: Schallausbreitung bei Wind	23
Abb. 1.8: Stimmgabel als Beispiel für eine periodische Schwingung	24
Abb. 1.9: Konstruktion der Sinusschwingung aus einer Kreisbahn.....	24
Abb. 1.10: Überlagerung von zwei Sinusschwingungen mit gleicher Phase	25
Abb. 1.11: Überlagerung mit entgegengesetzter Phase	26
Abb. 1.12: Klang 440 Hz und 600 Hz	26
Abb. 1.13: Schwebung 440 Hz und 441 Hz.....	26
Abb. 1.14: Elektronisches Stimmgerät.....	29
Abb. 1.15: Amplituden-Zeit-Diagramm	30
Abb. 1.16: Amplituden-Frequenz-Diagramm.....	30
Abb. 1.17: Wasserfalldiagramm.....	31
Abb. 1.18: Reiner Ton (Sinusschwingung mit 440 Hz)	31
Abb. 1.19: Gewöhnlicher Ton (Note a = 220 Hz; Auf einem E-Bass).....	31
Abb. 1.20: Geräusch (Rosa Rauschen)	32
Abb. 1.21: Musik (Ausschnitt aus dem Musical „42nd Street“).....	32
Abb. 1.22: Lärm (Vorbeifahrender Zug in 5m Entfernung).....	32
Abb. 1.23: Obertonspektrum	33
Abb. 1.24: Frequenzspektren von Vokalen.....	34
Abb. 2.1: Bewertungskurven für Schalldruckpegel.....	39
Abb. 2.2: Nahfeld und Fernfeld.....	42
Abb. 3.1: Reflexion.....	49
Abb. 3.2: Reflexion an gewölbten Flächen.....	50
Abb. 3.3: Diffuse Streuung	50
Abb. 3.4: Abschattung und Beugung	51
Abb. 3.5: Beugung an einem Spalt bei großer Wellenlänge	51
Abb. 3.6: Schallstrahl an einem Spalt bei kleiner Wellenlänge	51
Abb. 3.7: Stehende Wellen zwischen zwei parallelen Flächen.....	52
Abb. 3.8: Kammfiltereffekt	53

Abb. 3.9: Dopplereffekt bei einer bewegten Schallquelle	53
Abb. 3.10: Poröser Absorber an einer Wand.....	55
Abb. 3.11: Helmholtzresonator	56
Abb. 3.12: Absorptionsgrade von verschiedenen Absorbern	57
Abb. 3.13: Raumimpulsantwort	58
Abb. 3.14: Anregung eines Raumes bei Dauerschall	59
Abb. 3.15: Nachhallzeiten	61
Abb. 3.16: Deutlichkeitsmaß.....	63
Abb. 3.17: Klarheitsmaß	64
Abb. 3.18: Schallausbreitung in einem geschlossenen Raum.....	65
Abb. 3.19: Beispiel für den Hallradius	66
Abb. 4.1: Anatomie des Gehörs	71
Abb. 4.2: Elektronenmikroskopaufnahme der Gehörknöchelchen.....	72
Abb. 4.3: Mittel- und Innenohr	73
Abb. 4.4: Schnitt durch den Schneckenkanal	73
Abb. 4.5: Frequenzkodierung auf der Basilarmembran	74
Abb. 4.6: Isophone.....	74
Abb. 4.7: Zeitliche Verdeckung	77
Abb. 4.8: Spektrale Verdeckung	77
Abb. 4.9: Delay-Line	78
Abb. 4.10: Stereowiedergabe mit Phantomschallquelle	79
Abb. 4.11: Elektronenmikroskopaufnahme von gesunden Haarzellen	80
Abb. 4.12: Irreversibler Gehörschaden (abgeknickte Haarzellen)	80
Abb. 4.13: Lärminduzierte Schwerhörigkeit	81
Abb. 5.1: Zerlegung einer Arbeitsschicht.....	87
Abb. 5.2: Gehörschutzpfropfen.....	89
Abb. 5.3: Otoplastiken.....	89
Abb. 5.4: Gehörschutzkapseln	89
Abb. 5.5: dBmess am Mischerplatz	93
Abb. 5.6: Screenshot dBmess.....	93
Abb. 5.7: Beispiel Messprotokoll	94
Abb. 6.1: Strom I und Spannung U bei Gleichstrom (Beispiel)	97
Abb. 6.2: Strom i und Spannung u bei Wechselstrom (Beispiel)	99
Abb. 6.3: Phasenverschiebung zwischen Strom und Spannung um 90°	100
Abb. 6.4: Schaltsymbol Widerstand	102

Abb. 6.5: Verschiedene Widerstände	102
Abb. 6.6: Induktivität bei Gleichstrom	103
Abb. 6.7: Schaltsymbol Induktivität	103
Abb. 6.8: Drosselspule	103
Abb. 6.9: Kapazität bei Gleichstrom	104
Abb. 6.10: Schaltsymbol Kapazität	104
Abb. 6.11: Kondensatoren	105
Abb. 6.12: RC-Tiefpass	105
Abb. 6.13: Schaltbilder Tiefpass	105
Abb. 6.14: RC-Hochpass	106
Abb. 6.15: Schaltbilder Hochpass	106
Abb. 6.16: Tiefpass zweiter Ordnung	106
Abb. 6.17: RLC-Kombination als Tiefpass 2. Ordnung	107
Abb. 6.18: RLC-Kombination als Hochpass 2. Ordnung	107
Abb. 6.19: RLC-Bandpass	107
Abb. 6.20: Bandpass als Wien-Brücke	108
Abb. 6.21: Schaltbilder Bandpass	108
Abb. 6.22: Bandsperre als Doppel-T-Filter	109
Abb. 6.23: Schaltbilder Bandsperre	109
Abb. 6.24: Kurven von Tiefpassfiltern 4. Ordnung	109
Abb. 6.25: Schaltbilder der Diode	110
Abb. 6.26: Verschiedene Dioden	110
Abb. 6.27: Charakteristik einer Diode	111
Abb. 6.28: Einweggleichrichter	111
Abb. 6.29: Brückengleichrichter	112
Abb. 6.30: Zweiweggleichrichter	112
Abb. 6.31: Gleichrichter in Mittelpunktschaltung	112
Abb. 6.32: Physikalischer Aufbau eines pnp-Transistors	113
Abb. 6.33: Transistoren	113
Abb. 6.34: Schaltbilder npn- und pnp-Transistor	113
Abb. 6.35: Basisschaltung	114
Abb. 6.36: Kollektorschaltung	114
Abb. 6.37: Emitterschaltung	114
Abb. 6.38: Obere Grenzfrequenz des Transistors	115
Abb. 6.39: Einstufiger Audioverstärker in Emitterschaltung	116

Abb. 6.40: Eingangs- und Ausgangssignal der Emitterschaltung	116
Abb. 6.41: Clipping (links) und Oberschwingungen (rechts)	117
Abb. 6.42: Verstärkungskennlinie eines Transistors	117
Abb. 6.43: Bandbreite	118
Abb. 6.44: Mitkopplung gegen Phase	119
Abb. 6.45: Operationsverstärker auf einer Platine	119
Abb. 6.46: Operationsverstärker	120
Abb. 6.47: Nichtinvertierender Spannungsverstärker	120
Abb. 6.48: Invertierender Spannungsverstärker	121
Abb. 6.49: Aktiver Tiefpass	121
Abb. 6.50: Aktiver Hochpass	122
Abb. 6.51: Allpassfilter	122
Abb. 6.52: Schaltbilder Allpass	122
Abb. 7.1: Ungeregelter Netzteil	125
Abb. 7.2: Stabilisiertes Netzteil	126
Abb. 7.3: Getakteter Netzteil	126
Abb. 7.4: Ersatzschaltung	129
Abb. 7.5: verschiedene Batterien	130
Abb. 7.6: Entladekurven Batterie und Akku	132
Abb. 8.1: logarithmische Skala	135
Abb. 8.2: VU-Meter	140
Abb. 8.3: Vergleich verschiedener Skalen zur Aussteuerung	141
Abb. 9.1: Richtcharakteristiken	147
Abb. 9.2: Druckempfänger	148
Abb. 9.3: Druckgradientenempfänger	149
Abb. 9.4: Druckgradientenempfänger mit Laufzeitglied	150
Abb. 9.5: Nahbesprechungseffekt bei Niere und Acht	151
Abb. 9.6: Druckgradienten-Charakteristiken	152
Abb. 9.7: Interferenzempfänger	153
Abb. 9.8: Kohlemikrofon	154
Abb. 9.9: Kohlemikrofon	155
Abb. 9.10: Kapsel eines Bändchenmikrofons	155
Abb. 9.11: Bändchenmikrofon	156
Abb. 9.12: Tauchspulenmikrofon	157
Abb. 9.13: Kapsel eines Tauchspulenmikrofons (Shure SM57)	157

Abb. 9.14: Impulsverhalten von Tauchspulen- und Kondensatormikrofonen	157
Abb. 9.15: Piezotonabnehmer unter dem Steg eines Kontrabasses	159
Abb. 9.16: Kondensatormikrofon in Niederfrequenzschaltung	159
Abb. 9.17: Kondensatormikrofon (Neumann U87)	160
Abb. 9.18: Phantomspeisung (P48)	161
Abb. 9.19: Doppelmembranmikrofon mit schaltbarer Charakteristik	161
Abb. 9.20: Verschiedene Charakteristiken durch Kombination zweier Nieren	162
Abb. 9.21: Variable Richtcharakteristiken	162
Abb. 9.22: Miniaturmikrofone	164
Abb. 9.23: Grenzflächenmikrofon (Shure SM91)	165
Abb. 9.24: Frequenzgang eines Mikrofons (Sennheiser MD421)	167
Abb. 9.25: Polardiagramm (Sennheiser MD 421)	168
Abb. 10.1: Mikrofonierung einer Kickdrum	174
Abb. 10.2: Mikrofonierung einer Snare	174
Abb. 10.3: Mikrofonierung von TomToms	175
Abb. 10.4: Mikrofonierung einer HiHat	175
Abb. 10.5: Mikrofon über zwei Pauken und in einem Cajón	177
Abb. 10.6: Mikrofon am großen Gong und für Chimes	177
Abb. 10.7: Mikrofonierung von Gitarrencombos	178
Abb. 10.8: Signalfluss E-Bass mit DI-Box	178
Abb. 10.9: Tonabnehmer und Mikrofon an Kontrabass	179
Abb. 10.10: Mikrofonierung von Saxophon und Oboe	181
Abb. 10.11: Mikrofonierung eines Horns	181
Abb. 10.12: Miniaturmikrofone auf der Stirn bzw. dem Wangenknochen	182
Abb. 10.13: Kopfbügelmikrofon (Carsten Lepper)	182
Abb. 10.14: Mikrofone an einem Rednerpult	183
Abb. 10.15: MS-Technik	185
Abb. 10.16: XY-Technik	186
Abb. 10.17: Öffnungswinkel und Aufnahmebereich bei Nieren-XY	186
Abb. 10.18: AB-Technik	187
Abb. 10.19: ORTF-Mikrofonierung	188
Abb. 10.20: Williams-Kurven für Mikrofone mit Nierencharakteristik	189
Abb. 10.21: Jecklin-Scheibe	190
Abb. 10.22: Kugelflächenmikrofon	190
Abb. 10.23: Kunstkopf (Neumann KU 80 aus dem Jahr 1975)	191

Abb. 10.24: Doppelt-MS von Schoeps	192
Abb. 10.25: Die Kapseln des Soundfield-Mikrofons	193
Abb. 10.26: Soundfield-Prozessor	193
Abb. 10.27: INA-5	194
Abb. 10.28: OCT-Frontsystem	194
Abb. 10.29: IRT-Kreuz	195
Abb. 10.30: Hamasaki-Square	196
Abb. 10.31: Surround-Kugelflächenmikrofon (Schoeps KFM360)	196
Abb. 10.32: Holophone	197
Abb. 11.1: Prinzipschaltbild Anpassung	201
Abb. 11.2: Pegelverluste bei einem Kabel mit 1,6 mm Durchmesser	205
Abb. 11.3: Pegelverluste bei einem Kabel mit 2 mm Durchmesser	205
Abb. 11.4: Pegelverluste bei einem Kabel mit 2,5 mm Durchmesser	205
Abb. 11.5: Unsymmetrische Audioleitung	206
Abb. 11.6: Symmetrische Audioleitung	206
Abb. 11.7: Elektronische Symmetrierung	207
Abb. 11.8: Störung (Einstreuung) bei einer symmetrischen Leitung	208
Abb. 11.9: Passive DI-Box	208
Abb. 11.10: Verschiedene DI-Boxen	209
Abb. 11.11: Brummschleife	209
Abb. 11.12: Cinch	210
Abb. 11.13: Unsymmetrische (Mono-) Klinke	210
Abb. 11.14: Symmetrische (Stereo-) Klinke	210
Abb. 11.15: Insertkabel	211
Abb. 11.16: XLR	211
Abb. 11.17: Speakon	211
Abb. 11.18: EP5 (Links) und CA-COM (Rechts)	212
Abb. 11.19: Lautsprecher-Steckfeld mit XLR und CA-COM	212
Abb. 11.20: Harting HAN 64	213
Abb. 11.21: Amphenol Socapex 337P (37-Pin)	214
Abb. 11.22: Lichtwellenleiter	215
Abb. 11.23: BNC	216
Abb. 11.24: T-DIF	216
Abb. 11.25: TosLink	217
Abb. 11.26: LC-Duplex	217

Abb. 12.1: Signalfluss PCM	221
Abb. 12.2: Analoges Eingangssignal	221
Abb. 12.3: Abtastung	222
Abb. 12.4: Abtasttheorem erfüllt	223
Abb. 12.5: Unterabtastung	223
Abb. 12.6: Haltestufe	224
Abb. 12.7: Quantisierung	224
Abb. 12.8: Spektrum Dither Noise (Apogee UV 22)	225
Abb. 12.9: Emphasis (50/15 μ s)	226
Abb. 12.10: D/A-Wandlung	226
Abb. 12.11: Analoges Ausgangssignal	227
Abb. 12.12: Abtastimpuls	227
Abb. 12.13: Vergleich PCM und DSD	228
Abb. 12.14: 1-Bit-Wandler	228
Abb. 12.15: Signalfluss bei DSD	229
Abb. 12.16: RZ-Code	229
Abb. 12.17: NRZL-Code	230
Abb. 12.18: NRZI-Code	230
Abb. 12.19: Biphase-Mark-Code	230
Abb. 12.20: Symmetrisches AES/EBU Interface	232
Abb. 12.21: S/P-DIF Interface für unsymmetrisches Koaxialkabel	233
Abb. 12.22: MADI Blockdiagramm	234
Abb. 12.23: Digitales Taktsignal mit Zeitfehlern (Jitter)	236
Abb. 12.24: Jitter auf Wordclock (oben) und regeneriertes Signal (unten)	236
Abb. 12.25: Videobild mit eingeblendetem Timecode	238
Abb. 12.26: Modulation Biphase-Mark. Oben: logisch 1, unten logisch 0	239
Abb. 12.27: Spurbild eines Videobandes mit LTC und VITC	240
Abb. 13.1: MIDI-Stecker	243
Abb. 13.2: MIDI-Anschlüsse	244
Abb. 13.3: MIDI Thru & Merge	249
Abb. 13.4: MIDI Line Driver	249
Abb. 13.5: MIDI Beispiel-Setup	250
Abb. 14.1: Analoges Beschallungspult (Cadac J-Type)	255
Abb. 14.2: Signalfluss Mono-Eingangskanal	256
Abb. 14.3: Mikrofonvorverstärker	256

Abb. 14.4: Filter und EQ	257
Abb. 14.5: Insert	257
Abb. 14.6: PFL	258
Abb. 14.7: Mute und VCA	258
Abb. 14.8: Panning und Routing.....	259
Abb. 14.9: Aux Sends.....	260
Abb. 14.10: Subgruppen und Matrix	260
Abb. 14.11: Aux-Master.....	261
Abb. 14.12: CCM eines Cadac J-Type	262
Abb. 14.13: Master Mutes eines Cadac J-Type.....	263
Abb. 14.14: Digitale Konsole (Yamaha PM1D)	263
Abb. 14.15: Screenshot des Cadac Sound Automation Manager (SAM)	265
Abb. 14.16: Dynamische Automation	266
Abb. 15.1: Systemdynamik	270
Abb. 15.2: Prinzipschaltbild eines Regelverstärkers.....	271
Abb. 15.3: Verstärkungskennlinie eines Kompressors	272
Abb. 15.4: Verstärkungskennlinie eines Limiters	272
Abb. 15.5: Oben Originalmusik, unten komprimierte Musik	273
Abb. 15.6: Verstärkungskennlinie eines Expanders.....	273
Abb. 15.7: Verstärkungskennlinie eines Noise Gates	274
Abb. 15.8: Hard und Soft Knee.....	274
Abb. 15.9: Schaltprinzip eines Duckers.....	275
Abb. 15.10: Schaltprinzip eines De-Essers	275
Abb. 15.11: Oben Original Kickdrum, unten mit verstärkten Transienten	276
Abb. 15.12: Oben Original Kontrabass, unten mit Slow-Gear-Effekt	277
Abb. 15.13: EQ in den Kanalzügen eines analogen Pultes (Cadac F-Type).....	278
Abb. 15.14: Hoch- und Tiefpass	278
Abb. 15.15: Bandpass.....	278
Abb. 15.16: Kuhschwanzfilter	279
Abb. 15.17: Glockenfilter.....	279
Abb. 15.18: Kerbfilter	280
Abb. 15.19: Graphischer EQ.....	281
Abb. 15.20: EQ einer digitalen Audio Workstation (Cubase SE)	281
Abb. 15.21: Digitales FIR-Filter	282
Abb. 15.22: Digitaler IIR-Filter 1. Ordnung	282

Abb. 15.23: Bandecho	284
Abb. 15.24: Elektronisches Analog-Delay	284
Abb. 15.25: Digitales Delay	285
Abb. 15.26: Flanger	287
Abb. 15.27: Phaser	288
Abb. 15.28: Chorus-Bodeneffekt (Boss Super Chorus)	289
Abb. 15.29: Tremolo	289
Abb. 15.30: Amplitudenmodulation	289
Abb. 15.31: Vibrato	290
Abb. 15.32: Frequenzmodulation	290
Abb. 15.33: Wah-Wah-Fußpedale	291
Abb. 15.34: Verzerrer-Fußpedale	291
Abb. 15.35: Vocoder	292
Abb. 15.36: Leslie	293
Abb. 16.1: Passive Weiche	295
Abb. 16.2: Übernahmefrequenz	296
Abb. 16.3: Aktive Weiche	296
Abb. 16.4: Prinzipschaltung eines Controllers	297
Abb. 16.5: Controller Seriell	298
Abb. 16.6: Controller Parallel	298
Abb. 16.7: Leistungsverstärker (Yamaha H5000)	299
Abb. 16.8: Frequenzgang eines Verstärkers (Yamaha H5000)	300
Abb. 16.9: Clipping einer Sinusschwingung	303
Abb. 16.10: Stereo, Parallel Mono und Bridged Mono	304
Abb. 16.11: Beispiel Stereo und Bridged Mono (Yamaha P7000S)	304
Abb. 17.1: Impulsverhalten eines Lautsprechers	308
Abb. 17.2: Konuslautsprecher	308
Abb. 17.3: Kalottenlautsprecher	309
Abb. 17.4: Druckkammerlautsprecher	309
Abb. 17.5: Bändchenlautsprecher	310
Abb. 17.6: Magnetostat	311
Abb. 17.7: Elektrost	312
Abb. 17.8: Piezo-Lautsprecher	312
Abb. 17.9: Akustischer Kurzschluss	313
Abb. 17.10: Unendliche Schallwand	314

Abb. 17.11: Geschlossene Box	314
Abb. 17.12: Bassreflexbox	315
Abb. 17.13: Bandpass-Gehäuse	315
Abb. 17.14: Transmissions-Gehäuse	316
Abb. 17.15: Exponentialhorn	316
Abb. 17.16: Front Loaded Bin	317
Abb. 17.17: Folded Horn Bin.....	317
Abb. 17.18: Rear Loaded Bin	318
Abb. 17.19: Frequenzgang eines Lautsprechers (EAW JF80z).....	319
Abb. 17.20: Impedanzverlauf (induktives Verhalten).....	321
Abb. 17.21: Reihenschaltung und paralleler Anschluss.....	321
Abb. 17.22: Frequenzabhängigkeit der Abstrahlcharakteristik	324
Abb. 17.23: Isobarendiagramme	324
Abb. 17.24: Frei schwebende Schallquelle	325
Abb. 17.25: Schallquelle auf einer Fläche.....	325
Abb. 17.26: Schallquelle auf dem Boden und an der Wand.....	326
Abb. 17.27: Schallquelle in einer Ecke.....	327
Abb. 17.28: Lautsprecher mit Splay-Winkel.....	328
Abb. 17.29: Koppelung der Hochtöner.....	329
Abb. 17.30: Kohärente und sphärische Abstrahlung.....	329
Abb. 17.31: Punktrahler.....	330
Abb. 17.32: Linienstrahler	331
Abb. 17.33: Line Array von Meyer Sound	332
Abb. 17.34: Line-Array von d&b audiotechnik	332
Abb. 17.35: ArrayCalc von d&b audiotechnik.....	333
Abb. 17.36: Skizzen zur Aufgabe	335
Abb. 18.1: Signalweg einer Funkübertragung.....	339
Abb. 18.2: Breitband- und Schmalbandtechnik	340
Abb. 18.3: Spektrum von Intermodulationsprodukten.....	341
Abb. 18.4: Intermodulationsprodukte	342
Abb. 18.5: Senderprinzip.....	342
Abb. 18.6: Kompanderprinzip.....	343
Abb. 18.7: Handsender und Taschensender mit Miniaturmikrofon	344
Abb. 18.8: Dipol	345
Abb. 18.9: Halbdipol	345

Abb. 18.10: Ground-Plane Empfangsantenne	346
Abb. 18.11: Richtantenne	346
Abb. 18.12: Antennenkabel mit N-Stecker (Belten H2000)	347
Abb. 18.13: Booster	348
Abb. 18.14: HF-Signalfloss eines Mikroportsystems mit 44 Sendern.....	349
Abb. 18.15: Empfängerprinzip	350
Abb. 18.16: Empfänger, Remote-PC, Vorhöreinrichtung und Steckfeld	350
Abb. 18.17: Mehrwege-Empfang	351
Abb. 18.18: Diversity-Prinzip	351
Abb. 18.19: Signalweg IR-Technik.....	352
Abb. 18.20: IR-Modulation	353
Abb. 18.21: Prinzipaufbau IR-Steuersender	354
Abb. 18.22: Prinzipaufbau IR-Strahler	355
Abb. 18.23: Strahler Sennheiser SZI 1219	355
Abb. 18.24: Prinzipaufbau IR-Empfänger	356
Abb. 18.25: Empfänger Sennheiser HDI 91 und HDI 407.....	356
Abb. 19.1: Clearcom Prinzipschaltung	359
Abb. 19.2: Clearcom-Sprechstelle und -Belpack	360
Abb. 19.3: Einfaches Clearcom System.....	360
Abb. 19.4: Komplexes Clearcom System	361
Abb. 19.5: Clearcom Master Station mit zwei Netzteilen.....	361
Abb. 19.6: Kommunikationsmatrix	362
Abb. 19.7: Clearcom 8x40 Matrix.....	362
Abb. 19.8: Zentrales Clearcom-Steckfeld.....	362
Abb. 19.9: Motorola Funkgeräte	363
Abb. 19.10: Telex Belpack mit Headset	364
Abb. 19.11: Ladegeräte, dahinter im Rack zwei Basis-Stationen.....	364
Abb. 19.12: Drahtlose Intercom (Telex)	365
Abb. 19.13: FreeSpeak Cell Broadcast (Telex)	365
Abb. 20.1: Zentrale Beschallung	367
Abb. 20.2: Zentrale gestützte Beschallung	368
Abb. 20.3: Dezentrale Beschallung	369
Abb. 20.4: Prinzip einer P.A.....	370
Abb. 20.5: Lautsprecher einer Konzertbeschallung	371
Abb. 20.6: Einfache parallele Signalverteilung (Y-Split)	372

Abb. 20.7: Split über Trenntrafo und mit Phantomspeisung	372
Abb. 20.8: Otoplastiken für InEar-Monitoring.....	374
Abb. 20.9: Lautsprecher in einem Theatersaal (Draufsicht).....	376
Abb. 20.10: Lautsprecher in einem Theatersaal (Seitenansicht)	376
Abb. 20.11: Bühnenlautsprecher (Draufsicht).....	377
Abb. 20.12: Personalmixer (Otztronic) unter dem Notenpult.....	377
Abb. 20.13: Akustische Rückkopplung	379
Abb. 20.14: Beispiel Bühnenanweisung (erste Seite).....	383
Abb. 20.15: Beispiel Bühnenanweisung (zweite Seite).....	384
Abb. 20.16: Beispiel Signalflussplan.....	386
Abb. 20.17: Beispiel Lautsprecher FOH	387
Abb. 20.18: Beispiel Mischerskript (Auszug).....	391
Abb. 20.19: Audiogerät	392
Abb. 20.20: Verbindung zwischen zwei Geräten.....	392
Abb. 20.21: Beschriftung der Verbindungen.....	393
Abb. 20.22: Zusammengefasste Leitungen	393
Abb. 20.23: Steckfeld	393
Abb. 20.24: Stereo-Leistungsverstärker	394
Abb. 20.25: Passiver LS, passiver Zweiwege-LS und aktiver LS	394
Abb. 20.26: Kabelgebundenes Mikrofon.....	395
Abb. 20.27: Mikroport.....	395
Abb. 20.28: Empfangsantennen	395
Abb. 21.1: Bus-Architektur eines Mainboards	397
Abb. 21.2: Bus-Topologie	398
Abb. 21.3: Ring-Topologie	399
Abb. 21.4: Stern-Topologie.....	400
Abb. 21.5: Dezentrale Netztopologie	400
Abb. 21.6: OSI-Modell.....	401
Abb. 21.7: RJ45-Stecker an einem Twisted-Pair-Kabel (CAT-5).....	404
Abb. 21.8: Ethersound mit Ring-Topologie	405
Abb. 21.9: Ethersound mit kombinierter Bus- und Stern-Topologie	405
Abb. 21.10: Aviom A-Net Input Module	406
Abb. 21.11: RockNet Ring-Topologie.....	407
Abb. 21.12: Optocore-Netzwerk	408
Abb. 21.13: Midas XL8.....	409

Abb. 21.14: Prinzip einer Soundkarte	410
Abb. 21.15: Schnitt durch eine CD	411
Abb. 21.16: Schnitt durch eine DVD (DS/DL).....	412
Abb. 21.17: Notebook-Festplatte	413
Abb. 21.18: Screenshot WaveLab (Windows XP)	416
Abb. 21.19: Screenshot Audacity (Mac OS 10.4)	417
Abb. 21.20: Screenshot Cubase SE (Mac OS 10.4)	418
Abb. 21.21: Screenshot ProTools Free (Mac OS 9)	419
Abb. 21.22: Screenshot SFX (Windows XP).....	420
Abb. 21.23: Screenshot QLab (Mac OS 10.4)	421
Abb. 22.1: Zeilensprungverfahren.....	424
Abb. 22.2: H-Oszillogramm eines BAS-Signals	425
Abb. 22.3: V-Oszillogramm eines BAS-Signals	425
Abb. 22.4: Farbempfinden des menschlichen Auges	426
Abb. 22.5: Additive Farbmischung	426
Abb. 22.6: RGB-Signale bei einem 100%-Farbbalken	427
Abb. 22.7: Burst	427
Abb. 22.8: Helligkeitsempfinden des menschlichen Auges.....	428
Abb. 22.9: Y, R-Y und B-Y bei einem 100%-Farbbalken	428
Abb. 22.10: PAL-Encoder	430
Abb. 22.11: Vektordarstellung eines PAL-Signals (100% Farbbalken).....	430
Abb. 22.12: Vektordarstellung eines NTSC-Signals (100% Farbbalken)	431
Abb. 22.13: Datenmultiplex bei 4:2:2	432
Abb. 22.14: Blockschaltbild SDI-Sender und -Empfänger	433
Abb. 22.15: DCT.....	434
Abb. 22.16: Koaxialleitung	435
Abb. 22.17: 75 Ω -Abschlusswiderstand und T-Stück	436
Abb. 22.18: Video-Trenntrafo	436
Abb. 22.19: Entzerrung des Kabelweges	437
Abb. 22.20: Videoverteilverstärker mit Entzerrung	437
Abb. 22.21: Y/C-Stecker	437
Abb. 22.22: Videokamera (Sony DSR-250P).....	438
Abb. 22.23: Linsen eines Zoomobjektivs	438
Abb. 22.24: Blendenöffnung und Tiefenschärfe.....	439
Abb. 22.25: Tiefenschärfe als Gestaltungsmittel.....	439

Abb. 22.26: Aufbau einer CCD-Speicherzelle	441
Abb. 22.27: CCD-Bildwandler und Optical Black.....	441
Abb. 22.28: FT Prinzip.....	442
Abb. 22.29: IT Prinzip.....	443
Abb. 22.30: FIT Prinzip	444
Abb. 22.31: Strahlenteilerprisma	445
Abb. 22.32: Anamorphote Bildkompression.....	446
Abb. 22.33: Bildbeschneidung.....	446
Abb. 22.34: Dynamic Pixel Management.....	447
Abb. 22.35: Ausschnitt eines Bayer-Filters.....	448
Abb. 22.36: Blockschaltbild Kameraelektronik	449
Abb. 22.37: Kamerakennlinie	451
Abb. 22.38: Beispiele für eine Kennlinienveränderung.....	452
Abb. 22.39: SchwarzwertEinstellung	452
Abb. 22.40: Clipping bei Signal mit zu hohem Videopegel.....	453
Abb. 22.41: Kniefunktion.....	453
Abb. 22.42: Kamerazug.....	454
Abb. 22.43: Professioneller Videomonitor.....	455
Abb. 22.44: Schnittzeichnung Magnetband	456
Abb. 22.45: Rotierende Kopftrommel	456
Abb. 22.46: Spurbild einer digitalen MAZ.....	457
Abb. 22.47: Video-Harddiscrecorder (doremi V1)	459
Abb. 22.48: Blockschaltbild eines Bildmischers.....	460
Abb. 22.49: Bildmischer (Panasonic MX-70).....	460
Abb. 22.50: Quadsplit.....	461
Abb. 22.51: Multiscreen mit vier Monitoren.....	461
Abb. 22.52: Bewegliche Spiegel des DLP-Chips.....	463
Abb. 22.53: Größenvergleich Ameisenbein und Spiegel des DLP-Chips.....	463
Abb. 22.54: DLP-Projektor mit einem Chip.....	464
Abb. 22.55: DLP-Projektor mit drei Chips.....	464
Abb. 22.56: Prinzip LCD	465
Abb. 22.57: Ein-Panel LCD-Projektor	466
Abb. 22.58: Drei-Panel LCD-Projektor.....	466
Abb. 22.59: Prinzip LCoS	467
Abb. 22.60: LCoS-Projektor mit einem Chip.....	467

Abb. 22.61: LCoS-Projektor mit drei Chips	468
Abb. 22.62: Einteilung der Leinwand bei der ANSI-Messung	469
Abb. 22.63: Lens Shift	471
Abb. 22.64: Vertikale Keystone-Korrektur.....	471
Abb. A.0.1: Nahbesprechungseffekt	477
Abb. A.0.2: a) Kugelschallfeld und b) Frequenzgang des Druckgradienten	478
Abb. A.0.3: Amplitude und Wellenlänge.....	498
Abb. A.0.4: Absorptionsgrad α eines Vorhangs.....	500
Abb. A.0.5: Impedanzverläufe von Widerstand, Spule und Kondensator	503
Abb. A.0.6: RL-Glied als Tiefpass bzw. Hochpass	504
Abb. A.0.7: Mikrofon-Richtcharakteristiken	507
Abb. A.0.8: DIN, NOS und ORTF in den Williamskurven	508
Abb. A.0.9: Prinzipschaltbild eines Eingangskanals	512
Abb. A.0.10: Kennlinie eines Kompressors (links) und Limiters (rechts)	513
Abb. A.0.11: Clipping einer Sinusschwingung	513
Abb. A.0.12: Verteilung des Schalldruckpegels	517
Abb. A.0.13: RTS Prinzipschaltung.....	519
Abb. A.0.14: Signalfussplan einer kleinen Beschallungsanlage.....	520

Tabellenverzeichnis

Tabelle 1.1: Schallgeschwindigkeit in verschiedenen Medien	22
Tabelle 1.2: Musikalische Intervalle	28
Tabelle 1.3: Grundton und Obertöne.....	33
Tabelle 1.4: Formanten der Vokale	34
Tabelle 2.1: Beispiele für Schalldruckpegel	38
Tabelle 2.2: Vergleich verschiedener Schallimpedanzen.....	43
Tabelle 2.3: Beispiele für die Schallleistung	45
Tabelle 3.1: Beispiele für Absorptionsgrade verschiedener Materialien.....	57
Tabelle 3.2: Berechnete Nachhallzeiten für einen Theatersaal	61
Tabelle 3.3: Mikrofon-Bündelungsgrade γ_M	67
Tabelle 4.1: Vergleich von Intensitäts- und Laufzeitstereofonie	79
Tabelle 5.1: Zeitkonstanten für Schalldruckmessungen (Effektivwerte)	94
Tabelle 5.2: Zulässige Schalldruckpegel gemäß der TA-Lärm.....	95
Tabelle 6.1: Eigenschaften der Transistorschaltungen	114
Tabelle 8.1: Spannungspegel, Verstärkungsfaktoren und Spannungen.....	139
Tabelle 8.2: Beispiel Aussteuerung Analog und Digital ($0 \text{ dB}_{FS}=24 \text{ dB}_U$).....	142
Tabelle 9.1: Empfängerprinzipien und deren Richtwirkung	147
Tabelle 9.2: Pegelabschwächung bei Nieren- und Acht-Charakteristiken	152
Tabelle 9.3: Technische Daten eines Mikrofons (Sennheiser MD421)	167
Tabelle 11.1: Trafo- vs. elektronische Symmetrierung bei Mikrofonen	207
Tabelle 11.2: Belegung HAN 64 mit 20 symmetrischen Wegen.....	213
Tabelle 11.3: Belegung Socapex 37-Pin mit 12 symmetrischen Wegen	214
Tabelle 11.4: Belegung T-DIF-Stecker.....	216
Tabelle 12.1: Hexadezimalcode	220
Tabelle 12.2: Bezeichnung für Bitfolgen	220
Tabelle 12.3: AES/EBU Bitverteilung im Subframe mit 24 Bit Audio.....	232
Tabelle 12.4: AES/EBU Bitverteilung im Subframe mit 16 Bit Audio.....	232
Tabelle 12.5: MADI-Datenframe bei 48 kHz und 56 Kanälen	234
Tabelle 12.6: ADAT-Datenframe.....	235
Tabelle 12.7: Timecode Standards und Anzahl der Frames.....	238
Tabelle 12.8: Aufteilung der Bits des SMPTE Timecode	239
Tabelle 13.1: MIDI Message Hierarchie.....	245
Tabelle 13.2: Channel Voice Messages	245
Tabelle 13.3: Beispiel einer Nachricht mit SysEx-Daten.....	248

Tabelle 13.4: MIDI Machine Control (MMC) als erweiterter MIDI-Befehl	248
Tabelle 13.5: MIDI-Channels Beispiel-Setup	250
Tabelle 15.1: Musikalische Dynamikstufen	270
Tabelle 16.1: Technische Daten eines Verstärkers (Yamaha H5000).....	299
Tabelle 17.1: Technische Daten eines Lautsprechers (EAW JF80z)	319
Tabelle 17.2: Zusammenhang von Leistung und Schalldruckpegel	320
Tabelle 17.3: Lautsprecher-Bündelungsgrade γ_Q	323
Tabelle 18.1: Dämpfungswerte verschiedener Antennenkabel	347
Tabelle 20.1: Sparten im Theater	375
Tabelle 20.2: Auswertung der AI_{Cons} -Werte	381
Tabelle 20.3: Beispiel Kanalbelegung	388
Tabelle 20.4: Beispiel Ausspielwege	389
Tabelle 20.5: Beispiele Busse	389
Tabelle 20.6: Beispiel Matrix-Mischung	389
Tabelle 20.7: Beispiel Multicore-Belegung.....	390
Tabelle 20.8: Beispiel Einspielungen	390
Tabelle 21.1: Ethernet-Paket	403
Tabelle 22.1: Group of Pictures	434
Tabelle 22.2: Blendenstufen.....	439
Tabelle 22.3: Vergleich CCD- und CMOS-Bildwandler	449
Tabelle 22.4: Logarithmische Helligkeitswahrnehmung	451
Tabelle 22.5: Vergleich einiger digitaler SD-Videoformate (4:3).....	458
Tabelle 22.6: Vergleich einiger digitaler HD-Videoformate (16:9).....	458

Sachwortverzeichnis

1

1-Bit-Wandler, 228

A

A/D-Wandler, 224

Ableitungsbelag, 204

AB-Mikrofonierung, 188

Abschattung, 50, 148, 191

Absorptionsgrad, 55, 57

Abstrahlcharakteristik, 318, 323, 327

Abtastfrequenz, 222

Abtasttheorem, 223

Achtercharakteristik, 151

Active Sensing, 247

ADAT, 217, 235

Additive Farbmischung, 426

AD-Wandler, 142

AES/EBU, 203, 214, 216, 232, 363

AES42-Standard, 166

AES50, 409

A-Filter, 40

After Fader Listening, 258

Aiff, 414

Akkumulatoren, 97, 127

Akustik-Gitarre, 178

Akustik-Linsen, 318

Akustische Kopplung, 328

Akustischer Kurzschluss, 313

Aliasing-Fehler, 223, 440

Alkali-Mangan-Batterie, 130

Allpass, 122, 281, 288

Ambisonics, 193

Amboss, 72

Amplitude, 25, 37

Amplitudenmodulation, 289, 353

A-Net, 406

Anhall, 59

Anode, 110

Anpassung, 201

ANSI-Lumen, 469

Ansteckmikrofon, 181, 183

Anstiegszeit, 141

Antenne, 344

Antennen-Booster, 347

Antennensplitter, 348

Anti-Aliasing-Filter, 222

Arbeitspegel, 141

Articulation Loss of Consonants, 381

Attack, 274

Audacity, 417

Audio-CD, 222

Audiodateien, 413

Audio-DVD, 222

Auflagemaß, 440

Aufnahmebereich, 186, 187, 188, 191

Aufprojektion, 462

Ausgangsimpedanz, 201

Außenohr, 71, 191

Ausspielwege, 260

Aussteuerung, 142

Austastlücke, 424

Automation, 264, 265

B

Bandbreite, 108, 280, 493

Bändchen-Magnetostat, 310

Bändchenmikrofon, 155

Bandecho, 284

Bandfluss, 141

Bandkompression, 142

Bandpass, 108, 276, 278, 292

Bandpass-Gehäuse, 315

Bandsättigung, 141

Bandsperre, 108

Basilmembran, 73

Basisband, 222

Basisschaltung, 114

Bassreflex-Box, 314

BAS-Videosignal, 423

Batterien, 97, 127

Bayer-Filter, 448
 Belastbarkeit, 322
 Beschallungsplan, 385
 Beschallungspult, 254, 255
 Beschleunigtes Laden, 133
 Bessel-Tiefpass, 109
 Beugung, 50
 Bewertungskurven, 39
 Bezugsschalldruck, 38, 138, 494
 Bezugsschallintensität, 44
 Bezugsschallleistung, 45, 494
 B-Format, 193
 Bildaufnahmewandler, 423
 Bildformatwechsel, 445
 Bildmischer, 459
 Bildsignalbearbeitung, 450
 Bildwechselrate, 423
 Binären Zahlen, 219
 Binaural, 191
 Biphas-Mark-Code, 230, 239
 Bitfolgen, 219
 Blechbläser, 180
 Bleiakku, 131
 Blende, 439
 Blindleistung, 100
 Blooming, 441
 Blumlein-XY, 187
 BNC-Stecker, 216, 437
 Bongos, 176
 BPM, 285
 Breitbandtechnik, 340, 354
 Brennweite, 468
 British-Skala, 141
 Broadcast WAV, 414
 Brummkompensation, 158, 170
 Brummschleife, 209, 436
 Bühnenanweisung, 382
 Bündelungsgrad, 67, 323
 Bündelungsmaß, 323
 Bundesimmissionsschutzgesetz, 95
 Bundesnetzagentur, 338
 Burst, 427, 430, 431, 459
 Bus-Topologie, 398
 Butterworth-Tiefpass, 109

Byte, 220

C

C₅₀, 63
 C₈₀, 64
 CA-COM, 212
 Cajón, 177
 Category Codes, 233
 CCD, 440
 CCIR 601, 431
 CCM, 262
 CCU, 450, 454
 CD-DA, 411
 CD-R, 411
 Cent, 29
 Center Cluster, 367, 375
 Central Control Modul, 262
 C-Filter, 40
 Channel Mode Message, 245
 Channel Pressure, 246
 Channel Voice Message, 245
 Chorus, 288
 Cinch, 210
 Clear Scan, 444
 Clearcom, 359
 Clipping, 291, 303, 453
 CMOS-Sensor, 447
 CobraNet, 406
 Component-Video, 429, 456
 Component-Videosignal, 429
 Composite-Videosignal, 429
 Congas, 176
 Control Change, 246
 Control Voltage, 243
 Controller, 297
 C-Rate, 132
 Crest-Faktor, 99, 322
 CSMA/CD, 399, 403
 Cubase, 418
 Curving, 331

D

- D/A-Wandler, 226
- Daisy Chain, 359, 398
- Dämpfungsfaktor, 301
- Datenkompression, 414
- dB_A, 40
- dB_C, 40
- dB_U, 138
- De-Emphase, 226
- De-Esser, 275
- De-Glitcher, 227
- Delay-Line, 78, 368, 370, 375
- Detailing, 450
- Deutlichkeitsmaß, 63
- Dezentrale Beschallung, 368
- Dezibel, 137
- Dezimalsystem, 219
- DI-Box, 178, 179, 208
- Differenzbänder, 222
- Diffusfeld, 59, 66, 149
- Diffusfeldentzerrung, 149, 166
- Diffusschall, 46, 165
- Diffusschallfeld, 62
- Digital Micromirror Device, 462
- Digital Phantom Power, 166
- Digitales Delay, 285
- Digitales Filter, 281
- Digitales Mikrofon, 166
- D-ILA-Projektor, 467
- DIN 15 905-5, 91
- DIN-Anordnung, 188
- DIN-Skala, 141
- DIN-Stecker, 243
- Diode, 110
- Dipol, 344
- Direct Stream Digital, 229
- Directivity Index, 323, 481
- Direktschall, 46, 63, 65, 78, 165
- Direktschallfeld, 65
- Diskrete Kosinus-Transformation, 434
- Dissonanzen, 28
- Dither, 225
- Diversity, 351
- DLP-Projektor, 462
- Doppelmembranmikrofon, 161, 162
- Doppel-T-Filter, 108
- Doppelt-MS, 192
- Dopplereffekt, 53
- Dopplerfrequenzen, 54
- Dotieren, 110
- Downfill, 375
- Downstage, 377
- Druckabsorber, 55
- Druckempfänger, 147
- Druckgradientenempfänger, 149
- Druckkammerlautsprecher, 309, 318
- Druckschwankungen, 19, 37
- Druckstau, 49, 148, 150, 191
- Drumfill, 373
- DSD, 229
- Dual Mono, 304
- Dualsystem, 219
- Ducker, 275
- Duplex, 364
- DVD, 192
- DVD±R, 411
- Dynamic Pixel Management, 446
- Dynamik, 269

E

- E-Bass, 178
- Echo, 283
- Effektive Spannung, 99
- Effektivwert, 99, 322
- E-Gitarre, 177, 277
- Eigenresonanzem, 307
- Eigenstörspannung, 169
- Eimerkettenspeicher, 284
- Eingangsempfindlichkeit, 301
- Eingangsimpedanz, 201, 298
- Einzelmikrofonverfahren, 173
- Elektretmikrofon, 161
- Elektrische Energie, 98
- Elektrische Leistung, 98, 137
- Elektrodynamisch, 307
- Elektrodynamisches Prinzip, 155

Elektromagnetische Wellen, 337
 Elektromagnetisches Feld, 344
 Elektronische Symmetrierung, 206
 Elektronischer Shutter, 444
 Elektrostat, 311
 Elektrostatisch, 307
 Elektrostatisches Prinzip, 159
 Embedded Audio, 432
 Emitterschaltung, 114, 115
 Empfängerprinzip, 147
 Empfindungsgrößen, 135
 Emphasis, 226
 Enhancer, 293
 Entfernungshören, 75
 Entladeschlußspannung, 132
 EP5, 212
 EQ, 257
 Equalizer, 277
 Ethernet, 403
 EtherSound, 405
 Eustachische Röhre, 72
 Exciter, 293
 Expander, 273
 Exponential-Horn, 316

F

Faltungshal, 286
 Farbbalkengenerator, 459
 Farbdifferenzkomponenten, 427
 Farbbempfinden, 426
 FBAS, 429
 Federhall, 286
 Feedbackunterdrückung, 280
 Fehlererkennung, 231
 Fehlerkorrektur, 231
 Fehlerverschleierung, 231
 Feldeffekt-Transistor, 114, 159
 Fernfeld, 21, 41, 43
 Festkomma-Berechnung, 283
 Festplatte, 398, 412
 Filter, 105, 109, 257, 277
 Flanger, 287
 Flankensteilheit, 106

Flare, 450
 Flöte, 180
 FM-Synthese, 411
 FOH-Platz, 369
 Folded Horn Bins, 317
 Formanten, 34
 Fourier-Transformation, 30
 Frame Transfer, 442
 Frame-Interline-Transfer, 443
 Freifeld, 65, 149
 Freifeldentzerrung, 149, 166
 Freifeld-Übertragungsfaktor, 168
 Frequenz, 25, 54
 Frequenzbereich, 118
 Frequenzgang, 167, 277, 319
 Frequenzmodulation, 290, 339, 353
 Frequenzplanung, 341
 Frequenzspektrum, 30
 Frequenzweiche, 295
 Front Loaded Bins, 316
 Frontfill, 375
 Full Scale, 142
 Funkloch, 351

G

Gamma-Vorentzerrung, 451
 Gehörgang, 71, 191
 Gehörgefährdung, 92
 Gehörknöchelchen, 72
 Gehörschutz, 86, 88
 Hörverlust, 81
 Geräusch, 32
 Geräuschspannung, 169
 Gesangsmikrofon, 182
 Geschlossene Codierung, 431
 Geschwindigkeitstransformation, 309
 Gesetz der ersten Welle, 78, 198
 Gleichrichter, 111
 Gleichrichterschaltung, 98, 125
 Gleichspannungsnetzteil, 125
 Gleichstrom, 97, 111
 Gleitkomma-Berechnung, 283
 Glockenfilter, 279

Glockenspiel, 176
 Gong, 176
 GOP, 434
 GPI, 363
 Grafikkarte, 397
 Graphischer Equalizer, 280
 Grenzflächenmikrofon, 164, 183, 188
 Grenzfrequenz, 106, 164, 204
 Grenzschalldruckpegel, 170
 Groß-AB, 188
 Große Terz, 29
 Große Trommel, 176
 Großmembran, 163
 Ground-Plane-Antenne, 345
 Grundton, 31, 33
 Güte, 108, 279, 280, 493

H

Haarzellen, 73
 Haas-Effekt, 78
 Halbdipol, 345
 Halbleiter, 110
 Halbtonschritt, 28, 29
 Hallfolie, 286
 Hallgerät, 286
 Hall-Parameter, 287
 Hallplatte, 286
 Hallradius, 66, 194, 195, 285
 Hallraum, 285
 Haltestufe, 224
 Hamasaki-Square, 196
 Hammer, 72
 HAN 64, 213
 Handmikrofon, 182
 Handschallpegelmesser, 86
 Handsender, 343
 Hard Knee, 274
 Hard Mute, 258
 Harmonische, 33
 Hauptbeschallung, 370, 375
 Hauptmikrofon, 184, 198
 Head Related Transfer Function, 191
 Headroom, 142

Helligkeitsempfinden, 428, 451
 Helmholtzresonator, 56, 314
 Hexadezimalcode, 220
 HF-Modulation, 339
 HF-Tonübertragung, 337
 High Definition, 458
 HiHat, 175
 Hochfrequenzschaltungen, 159
 Hochpass, 106, 122, 278, 295
 Hochtöner, 295, 303, 307
 Hochtonhorn, 318
 Höhenlokalisierung, 76
 Hold, 274
 Holophone, 197
 Holzbläser, 180
 Hörempfindung, 19
 Hörereignis, 75
 Hörermüdung, 80
 Hörgerät, 352
 Hörnerv, 73
 Hörschaden, 80
 Hörschnecke, 73
 Hörschwelle, 37, 40
 Hörtest, 27, 31
 H-Oszillogramm, 425
 Hot Spot, 469
 HRTF, 191
 Hub, 340, 403
 Hubbegrenzung, 340

I

Impedanz, 43, 103, 156, 299, 321
 Impedanzwandler, 43, 72
 Impulsverhalten, 156, 157, 308, 309
 INA-5, 194
 Induktionsgesetz, 155
 Induktivität, 100, 102
 Induktivitätsbelag, 204
 In-Ear-Monitoring, 338, 373
 Infill, 375
 Infrarotlicht-Empfänger, 356
 Infrarotlicht-Modulation, 353
 Infrarotlicht-Strahler, 355

Infrarotlicht-Übertragung, 352
 Infraschall, 25
 Inline-Pult, 254
 Innenohr, 72
 Innenwiderstand, 128
 Insertkabel, 211
 Intensitätsstereofonie, 79, 184
 Interferenzempfänger, 152
 Interferenzen, 25, 49, 148, 379
 Interlacing, 424
 Interleaving, 231
 Interline Transfer, 443
 Intermodulation, 341, 352
 Interpolation, 231
 Intervall, 27
 Inversionswetterlage, 23
 IRT-Kreuz, 195
 Isobarendiagramm, 324
 Isolatoren, 110
 Isophone, 75

J

Jecklin-Scheibe, 190

K

Kalotte, 308
 Kalottenlautsprecher, 309
 Kamerakennlinie, 451
 Kameraobjektiv, 438
 Kammerton, 28
 Kammfilter, 52, 183, 287
 Kanalbelegung, 388
 Kanal-Codes, 229
 Kapazität, 100, 104, 128
 Kapazitätsbelag, 203
 Kaskadierung, 265
 Kathode, 111
 Kennschalldruckpegel, 320
 Kerbfilter, 280
 Keyboard, 179
 Keystone Korrektur, 471
 Kickdrum, 173, 276

Klang, 32
 Klangfarbe, 71, 76, 277
 Klarheitsmaß, 64
 Klein-AB, 188
 Kleinmembran, 163, 181, 183
 Klemmspannung, 129, 132
 Klinke, 210
 Klirrfaktor, 118, 170, 300
 Kniefunktion, 274, 453
 Koaxialkabel, 435
 kohärente Signale, 143
 Koinzidenzmikrofon, 187
 Kollektorschaltung, 114
 Kombinationsschwingungen, 25
 Kompander, 343, 350
 Komponenten-Codierung, 432
 Kompressor, 272
 Kondensatormikrofon, 159
 Konsonanzen, 28
 Kontrabass, 179
 Konuslautsprecher, 307, 316
 Konzertflügel, 179
 Kopftrommel, 456
 Koppelfrequenz, 380
 Kugelcharakteristik, 148
 Kugelflächenmikrofon, 190, 196
 Kugelschallquelle, 43, 323, 325
 Kugelwelle, 20
 Kuhschwanzfilter, 279
 Kunstkopf, 191
 Kunstlicht, 354
 Kurzzeitspektrum, 30

L

Ladegeräte, 133
 Ladeschlußspannung, 132
 Ladestrom, 133
 Lärm, 32, 85
 Lärmexposition, 87
 Lärminderungsprogramm, 86
 Lärmquellen-Katasters, 90
 Lärmschutz, 85
 Lärmschwerhörigkeit, 81

LärmVibrationsArbSchV, 85
 Laserprojektor, 470
 Laufzeit, 22, 52, 187, 189, 198, 368
 Laufzeitdifferenzen, 76
 Laufzeitglied, 149
 Laufzeitstereofonie, 79, 187
 Lautsprecherkabel, 205
 Lautsprecherwiedergabe, 186, 188
 Lautstärke, 39, 74
 Lautstärkeempfindung, 37, 39, 54, 135
 Lautstärkepegel, 74, 75
 LCD-Projektor, 465
 LCoS-Projektor, 467
 Leerlaufspannung, 129
 Leistungsanpassung, 201, 346, 435
 Leistungsaufnahme, 301
 Leistungspegel, 137, 143
 Leitfähigkeit, 110
 Leitungsbelag, 203
 Leitwert, 101
 Lens on Chip, 444
 Lens Shift, 471
 Leslie, 179, 293
 Leveller, 276
 Lichtwellenleiter, 214, 217, 233, 264
 Limiter, 272, 340, 373
 Line Arrays, 328
 Lineare Verzerrungen, 319
 Linienstrahler, 328, 330
 Lithium-Ionen Akku, 132
 Logarithmus, 135
 Logatome, 380
 Longitudinal Timecode, 240
 Longitudinalwelle, 20
 LTC, 240
 Luftfeuchtigkeit, 21

M

MADI, 216, 234, 363
 Magnetband, 141
 Magnetfeld, 307
 Magnetfeldstörfaktor, 170
 Magnetostat, 310, 321

Mainboard, 397
 Make-Up Gain, 272
 Marimba, 176
 Matrix, 260, 362
 Matrix-Mischung, 389
 MAZ, 456
 Memory-Effekt, 131, 133
 Messmikrofon, 91, 92, 166
 Messprotokoll, 93
 MIDI, 158, 220, 243, 265, 410
 MIDI Line Driver, 249
 MIDI Timecode, 240
 MIDI-Merger, 249
 MIDI-Router, 249
 MIDI-Thru, 249
 MIDI-Timecode, 247
 Midstage, 377
 Mikrofondynamik, 269, 270
 Mikrofonierung, 173, 183
 Mikrofonvorverstärker, 115, 256
 Mikroport, 337, 395
 Mikroport-Empfänger, 339, 350
 Mikroport-Sender, 339, 342
 Miniaturmikrofon, 163, 182, 343
 Mischerskript, 391
 Mischpultautomation, 238
 Mithall, 59
 Mitkopplung, 118
 Mittelohr, 72
 Mittelpunktschaltung, 111
 Mittenfrequenz, 107, 279, 290, 493
 mLAN, 251
 Modem, 52
 Monitorlautsprecher, 373
 Monitorpult, 371
 Mono-Bridged, 304
 MOS-Kondensator, 441
 Motorfader, 259, 264
 Motorola, 364
 MPEG, 415, 433
 MS-Mikrofonierung, 185, 192
 MTC, 240
 Multibandkompressor, 276
 Multicore, 213, 369, 390

Multiscreen, 461
 Multisync-Betrieb, 462
 Musikalische Dynamik, 269
 Musikleistung, 300

N

Nachhall, 58, 59, 198
 Nachhalldauer, 61, 62
 Nachhallzeit, 60, 62
 Nachverdeckung, 77
 Nahbesprechungseffekt, 150, 198
 Nahfeld, 20, 41, 43, 173
 Narrow Coverage, 318
 Natürliche Skala, 27
 Nearfill, 370
 Nennabschlussimpedanz, 169
 Nennhub, 340
 Nennimpedanz, 168, 205, 321
 Nennleistung, 299
 Nennspannung, 128
 Netzteil, getaktet, 126
 Netzteil, stabilisiert, 126
 Netzteil, ungeregelt, 125
 Netz-Topologie, 398
 Nexus, 408
 Nichtleiter, 110
 Nichtlineare Verzerrungen, 319
 Nichtrekursive Filter, 282
 Nickel-Cadmium-Akku, 131
 Nickel-Metallhydrid-Akku, 131
 Niederfrequenzschaltung, 159
 Nierencharakteristik, 150
 NL-4, 211
 Noise Gate, 363
 Noise Shaping, 225, 228
 Noise-Gate, 273
 Nordic-Skala, 141
 Normalladung, 133
 Normpegel, 140
 NOS, 188
 Notch, 52
 Note On / Off, 246
 NRZ-Code, 230

NRZI, 230, 235
 NRZL, 230
 NTSC, 430, 431

O

Obertöne, 31, 33
 Obertonspektrum, 33
 Objektivsteuerung, 450
 OCT, 194
 Öffnungswinkel, 186, 188
 Ohm'sches Gesetz, 101, 137
 Ohrmuschel, 71
 Oktavbänder, 61
 Oktavbandfilter, 29, 280
 Oktave, 29
 Operationsverstärker, 119
 Optical Black, 441
 Optische Filter, 440
 Optocore, 407
 Optokoppler, 289, 436
 ORTF, 188
 OSI-Schichtenmodell, 401
 OSS, 190
 Otoplastiken, 88, 373
 Outfill, 370
 Ovale Fenster, 72
 Overhead, 176, 181
 Oversampling, 229

P

PAL, 429, 431
 PanPot, 259
 Partyline, 359
 Pauken, 176
 Peak, 52
 Peak Program Meter, 141
 Pegel, 38, 135
 Pegel, absolut, 138
 Pegel, relativ, 136
 Pegel, Umkehrfunktion, 38, 142
 Pegeladdition, 143
 Pegeldifferenzen, 76, 184

Percussion, 176
 Perilymphe, 72
 Permanent Threshold Shift, 80
 Phantomschallquelle, 79
 Phantomspeisung, 160, 208, 372
 Phase, 25
 Phasengang, 109, 282, 297
 Phasenkorrektur, 309
 Phaser, 288
 Piano, 180
 Piezo, 158, 179, 286, 307, 312, 470
 Piezoelektrischer Wandler, 158
 Piezomikrofon, 158
 Pitch Bend, 246
 Pitch Shift, 290
 Pixel Shift, 471
 Plattenschwinger, 55
 p-Leiter, 110
 Plosivlaute, 153
 pnp-Transistore, 113
 Polardiagramm, 167, 324
 Polarisationsspannung, 311
 Polyphonic Key Pressure, 246
 Popschutz, 153
 Pre Fader Listening, 258
 Pre-Emphase, 226
 Program Change, 246
 Programmdynamik, 269, 271
 ProTools, 419
 Puls Amplituden Modulation, 224
 Pulse Code Modulation, 221
 Pulse Width Modulation, 228
 Punktschallquelle, 330
 Pythagoräische Skala, 27

Q

QLab, 421
 Quantisierung, 225, 434
 Querflöte, 180

R

RAID, 413, 459

Range, 274
 Rapid Speech Transmission Index, 381
 Ratio, 272
 Raumimpulsantwort, 58, 285
 Raummikrofone, 285
 Raumresonanzen, 52
 RC-Kombination, 105, 106
 Reale Spannungsquelle, 128
 Rear Loaded Bins, 317
 Referenzspannung, 138
 Referenzwert, 142
 Reflexion, 49, 52, 58, 59, 65
 Regelverstärker, 271
 Registerdurchsichtigkeit, 64
 Reiner Ton, 31
 Rekursive Filter, 282
 Release, 274
 Resonanzfrequenzen, 34, 52, 55
 RGB-Videosignal, 427
 Richtcharakteristik, 68, 147, 167
 Richtrohr, 152
 Richtwirkung, 67, 180
 Ride, 175
 Ring-Topologie, 399
 RockNet, 406
 Rosa Rauschen, 32
 Routing, 259
 RT₆₀, 60
 Rückkopplung, 118, 374, 378, 379
 Rückkopplungsfaktor, 119
 Rücklaufzeit, 141, 301
 Rückprojektion, 462
 Rundes Fenster, 72
 Rundfunknormpegel, 140
 RZ-Code, 229

S

S/P-DIF, 216, 233
 SACD, 229
 Schallampel, 367
 Schallausbreitung, 19, 23
 Schalldosimeter, 86
 Schalldruck, 37

- Schalldruckabsorber, 55
- Schalldruck-Isobaren, 324
- Schalldruckpegel, 37, 39, 62, 143
- Schallemission, 44
- Schallenergie, 46
- Schallereignis, 75
- Schallgeschwindigkeit, 21
- Schallimpedanz, 43
- Schallintensität, 44, 325
- Schallintensitätspegel, 44
- Schalleistung, 45
- Schalleistungspegel, 45
- Schallpegelmessungen, 92
- Schallpegeltopografie, 91
- Schallpegelverteilung, 379
- Schallquelle, 19, 78
- Schallschatten, 50
- Schallschnelle, 40, 41, 151
- Schallschnelleabsorber, 55
- Scheinleistung, 100
- Schmalbandtechnik, 340, 354
- Schmerzgrenze, 37, 40
- Schnecke, 72, 73
- Schnelleabsorber, 55
- Schnellladen, 133
- Schutzleiter, 209
- Schwarzabgleich, 454
- Schwarzwert, 452
- Schwebung, 26
- Schwerhörigkeit, 81
- Schwingspule, 157, 307, 309
- Schwingung, 19, 24
- SDI, 432
- Seitenlokalisation, 76
- Selbstentladung, 128
- Sensitivity, 302
- SFX, 420
- Shading, 450
- Sicke, 308
- Sidfill, 373
- Siderack, 369
- Signalabtastung, 222
- Signalfluss, 386, 392
- Signal-Rausch-Abstand, 225, 301
- Silbenverständlichkeit, 380
- Silberoxid-Batterie, 130
- Simplex, 363
- Simulationsstrahler, 367
- Simultanverdeckung, 77
- Sinusdauerleistung, 300
- Sinusschwingung, 24
- Skin-Effekt, 203
- Slow Gear, 277
- SMPTE, 238
- Snake, 369
- Snare, 174
- SNR-Wert, 90
- Soft Knee, 274
- Soft Mute, 258
- Solo in Place, 258
- Soundfield, 193
- Soundkarte, 410
- Spannung, 98
- Spannungsanpassung, 202, 301
- Spannungspegel, 137, 143, 302
- Spannungspegel, absolut, 142
- Spannungsquelle, 97
- Spannungsverstärkung, 117
- SpeakerSense, 297
- Speakon, 211
- Speech Transmission Index, 381
- Spitzenhub, 340
- Spitzenpegel, 141
- Spitzenschalldruckpegel, 85
- Spitzenwert, 322
- Splay Angle, 327
- Splitpult, 254
- Splitscreen, 461
- Sprachbeschallung, 183
- Sprachverständlichkeit, 63, 380
- Squelch, 352
- Stacking, 328
- Stagebox, 369
- Standard Definition, 458
- Standardfernsehsystem, 423
- Stapediusreflex, 72
- Steckfeld, 393
- Stehende Wellen, 52

Steigbügel, 72
 Stereobasis, 186
 Stereo-Basis, 79
 Stern-Topologie, 400
 Sendersender, 354
 Stimmgerät, 29
 Strahlenteiler, 445
 Streicher, 181
 Streuung, 50
 Strom, 97
 Stromanpassung, 202
 Studiopegel, 140, 142
 Stützlautsprecher, 368
 Stützmikrofon, 198
 Subwoofer, 315, 370, 375
 Summenbänder, 222
 Surround, 68, 192, 375
 Surround-Panning, 264
 Switch, 403
 Symmetrische Signalführung, 206
 Synchronsignalerzeugung, 450
 System Common Message, 245
 System Exclusive Message, 245
 System Realtime Message, 245
 Systemdynamik, 269, 270
 Szenenspeicher, 265

T

TA Lärm, 95
 Tagesdosis, 88
 Taktgenerator, 227
 Taschensender, 344
 Tastgrad, 227
 Tauchspule, 307
 Tauchspulenmikrofon, 156
 T-DIF, 216
 Telekommunikationsgesetz, 338
 Telex, 364
 Temporary Threshold Shift, 80
 Terzbandfilter, 29, 280
 Threshold, 272
 Tiefenschärfe, 439
 Tiefpass, 105, 121, 222, 278, 295

Time Base Corrector, 460
 Timecode, 238, 266
 Tinnitus, 81
 TomToms, 174
 Tonabnehmer, 158, 179
 Tonbandaufnahmen, 141
 Tonhöhe, 25, 27, 54, 135, 290
 Tonhöhenmodulation, 246
 Tonhöhenverhältnisse, 27
 TosLink, 233, 235
 Trafosymmetrisch, 206
 Trägerfrequenz, 340
 Transient Designer, 276
 Transistor, 113, 119
 Transmissions-Gehäuse, 315
 Tremolo, 289
 Trennkörper, 189
 Trenntrafo, 208
 Trennübertrager, 372
 Trennverstärker, 160
 Trittschall, 277
 Trommelfell, 71, 191
 Tschebyscheff-Tiefpass, 109
 TV-Kanal, 338

U

U_0 , 139
 UART, 244
 Überanpassung, 202
 Übernahmefrequenz, 295
 Überprotektion, 90
 Übertrager, 154
 Übertragungsbereich, 167, 300
 UHF, 114, 338
 Ultraschall, 25
 Unsymmetrische Signalführung, 206
 Unteranpassung, 202
 Unterteilte Zentralbeschallung, 368
 Upstage, 377

V

VCA, 258, 271

Vektorskop, 455
 Verdeckung, 76
 Verdichtungsfront, 20
 Verdünnungsfront, 20
 Vermaschtes Netz, 400
 Verpolungsschalter, 257
 Versatzwinkel, 186
 Verstärkungsfaktor, 139, 302
 Verstärkungsgrad, 302
 Vertical Interval Timecode, 240
 Vertikal-Impuls, 424
 Verzerrer, 291
 VHF, 114, 338
 Vibrato, 290
 Videokreuzschiene, 437
 Videomonitor, 455
 Videosteckfeld, 437
 Video-Trenntrafo, 436
 Videoverstärker, 436
 VITC, 240
 Vocoder, 292
 Vokale, 34
 Vollausschlag, 141
 Vollaussteuerung, 140, 142
 Vorsorgeuntersuchung, 86, 90
 Vorverdeckung, 77
 Vorverstärker, 221
 V-Oszillogramm, 425
 VU-Meter, 140

W

Wah Wah, 290
 Wandlerprinzip, 153, 307
 Wasserfalldiagramm, 30
 Wave, 413
 Waveformmonitor, 425, 455
 WaveLab, 416
 Wave-Table-Synthese, 410
 Wechselstrom, 98, 111, 307
 Wechselstromkreis, 100
 Wedge, 373

Weißabgleich, 454
 Weißbegrenzung, 453
 Wellenform, 30
 Wellenlänge, 25, 49, 53, 329, 337
 Wellenwiderstand, 436
 Wettereinflüsse, 23
 Wide Coverage, 318
 Widerstand, 101, 102
 Widerstandsbelag, 203
 Wiedergabedynamik, 269, 271
 Wiedergabefrequenzgang, 379
 Wien-Brücke, 108
 Williams-Kurven, 188
 Wind, 23, 153
 Windschutz, 179
 Wirkleistung, 100
 Wirkungsgrad, 201, 307, 310, 311, 317
 Wohltemperierte Skala, 27
 Wordclock-Verteilung, 237

X

XLR, 211
 Xylophon, 176
 XY-Mikrofonierung, 186

Y

Y/C, 437
 Y-Split, 371
 YUV, 429

Z

Zeichenkette, 219
 Zeitkonstanten, 94
 Zeitliche Verdeckung, 76
 Zentrale Beschallung, 367
 Zentrale gestützte Beschallung, 368
 Zink-Kohle-Batterie, 130
 Zweiweglautsprecher, 295
 Zwischenfrequenz, 350

Über den Autor

Dipl.-Ing. (FH) Volker Smyrek, Jahrgang 1973, war nach der Ausbildung an der School of Audio Engineering (SAE) in Frankfurt vier Jahre als Ton- und Bildtechniker bei zahlreichen Außenübertragungen und Studioproduktionen der ARD, des ZDF und privaten Fernsehsendern wie z.B. RTL und Deutsche Bank TV tätig.

Seit dem Jahr 2000 arbeitet er in Stuttgart als FOH-Mischer für Musical-Produktionen wie *Die Schöne und das Biest*, *Tanz der Vampire*, *42nd Street*, *Elisabeth*, *3 Musketiere* und *Blue Man Group*. Er bildet im Apollo Theater Fachkräfte für Veranstaltungstechnik im Bereich Tontechnik aus.

Neben dem Beruf absolvierte Volker Smyrek von 2001 bis 2005 den Diplomstudiengang Audiovisuelle Medien an der Hochschule der Medien (HdM) in Stuttgart. Im Jahr 2006 war er Sound Designer für das Musical *Grease* im Theater St. Gallen.



Gelegentlich ergreifen wir die Feder
Und schreiben Zeichen auf ein weißes Blatt,
Die sagen dies und das, es kennt sie jeder,
Es ist ein Spiel, das seine Regeln hat.
Hermann Hesse, Das Glasperlenspiel

