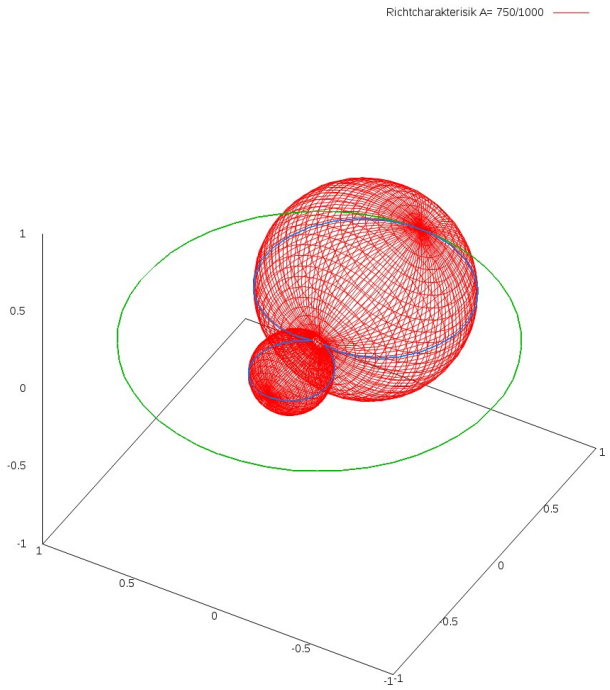
Tontechnik - eine Einführung



Wolfram Wagner

19. April 2021

Lizenz: Creative Commons, CC by-sa, Version 4
Eine aktuelle Fassung des Dokuments ist verfügbar unter
`http://www.baggy-trousers.de/Tontechnik.pdf`
Eine englische Fassung des Dokuments ist verfügbar unter
`http://www.baggy-trousers.de:/AudioTechnology.pdf`
Der Autor ist dankbar für Anmerkungen, Rückmeldungen aller Art, auch Korrekturen.
E-Mail: mrthehowlingwolf@gmail.com

Inhaltsverzeichnis

1 Überblick **11**

2 Das Schallfeld **13**
2.1 Schwingungen, Wellen . . . 13
2.1.1 Schwingungen . . . 13
2.1.2 Wellen . . . 13
2.2 Pegel, dB . . . 13
2.3 Die Sinus-Welle, Fouriertransformation . . . 16
2.4 Die Sinus-Welle . . . 16
2.4.1 Fouriertransformation . . . 16
2.5 Das ebene Schallfeld - Freifeld . . . 18
2.6 Die Kugelwelle . . . 18
2.7 Interferenz . . . 18
2.8 Ebene Reflektion, Kammfilter . . . 19
2.9 Der Raum . . . 21
2.9.1 Raummoden . . . 21
2.9.2 Nachhall, Diffusfeld . . . 21
2.10 Ausdehnung von Quellen . . . 23
2.11 Ausdehnung von Mikrofonen . . . 23
2.11.1 Interferenz . . . 23
2.11.2 Reflektion . . . 23

3 Das Hören **25**
3.1 Aufbau des Ohrs . . . 25
3.2 Wahrnehmungsgrenzen . . . 25
3.2.1 Kurven gleicher Lautstärke . . . 25
3.2.2 Verdeckung . . . 27
3.3 Lokalisation . . . 27
3.3.1 Winkel zur Mittelebene . . . 27
3.3.2 Winkel innerhalb der Symmetrieebene: vorne, hinten, oben,unten . 28
3.3.3 Entfernung . . . 28
3.4 Wirkung auf das Unterbewusstsein . . . 28

4 Das Mikrofon **29**
4.1 Eigenschaften . . . 29
4.1.1 Empfindlichkeit . . . 30
4.1.2 Frequenzgang . . . 30
4.1.3 Richtdiagramm . . . 31
4.1.4 Rauschpegel . . . 33
4.1.5 Grenzschalldruck . . . 35
4.1.6 Ausgangsimpedanz . . . 35

4.2 Richtcharakteristiken . . . 36
4.2.1 Druckempfänger - Kugelcharakteristik . . . 36
4.2.2 Druckgradientenempfänger - Die „Acht”, Nahbesprechungseffekt . . 37
4.2.3 Kombinationen - Niere, Superniere, Hyperniere, breite Niere . . . 44
4.2.4 Kombination mit Interferenz-Effekten: Richtrohr, Arrays . . . 53
4.2.5 Geometrische Akustik: Reflektion, Brechung . . . 54
4.3 Wandlerprinzipien . . . 54
4.3.1 Das (NF-)Kondensatormikrofon . . . 55
4.3.2 Mikrofone nach dem Prinzip der elektromagnetischen Induktion . . 59
4.3.3 Spezielle Mikrofone . . . 64
4.3.4 Aktive Wandler . . . 65

5 Mehrere Mikrofone/Signale, Stereophonie 67
5.1 Stereophonie - nicht unbedingt genau zwei Kanäle . . . 67
5.2 2-Kanal Stereophonie . . . 67
5.2.1 Wiedergabe . . . 67
5.2.2 Pegelstereophonie . . . 67
5.2.3 Zeitdifferenzstereophonie . . . 72
5.2.4 Kombinationen von Pegel- und Zeitdifferenz . . . 73
5.2.5 Alternative Mikrofonanordnungen . . . 74
5.2.6 Hauptmikrofone und Stützen . . . 74
5.2.7 Ohrbezogene Signale . . . 75
5.3 Verallgemeinertes Stereo: Surround . . . 76
5.3.1 5.1 . . . 76
5.3.2 Mehr Kanäle . . . 81
5.3.3 Virtuelle Schallquellen mit Richtungsangabe . . . 82
5.3.4 Ambisonic . . . 82
5.3.5 Wellenfeld-Synthese . . . 82

6 Elektrische Übertragung 83
6.1 Spannungsanpassung . . . 83
6.2 Asymmetrische Übertragung . . . 83
6.3 Symmetrische Übertragung . . . 84
6.4 Kabel, Steckverbindungen . . . 85
6.5 Die DI-Box . . . 86
6.5.1 Passive DI-Box . . . 86
6.5.2 Aktive DI-Box . . . 87
6.6 Phantomspeisung . . . 87
6.7 Analog/Digital-Wandlung und zurück . . . 87
6.8 Digitale Übertragung . . . 89
6.8.1 S/PDIF . . . 89
6.8.2 AES/EBU . . . 89
6.8.3 AES42 . . . 90
6.8.4 Integration in Video-Signale, HDMI, DisplayPort . . . 90
6.8.5 USB . . . 90
6.9 Funkübertragung . . . 90
6.9.1 Analog, FM . . . 90
6.9.2 Digital . . . 91
6.10 Digitale Speicherung - Formate . . . 91

6.11 Digitale Kompression - ohne Verluste . . . 91
6.12 Digitale Kompression - mit Verlusten . . . 92

7 Elektrische und digitale Verarbeitung der Signale 93
7.1 Verstärker, Pegel . . . 93
7.1.1 Mikrofonvorverstärker . . . 93
7.1.2 Endstufen . . . 93
7.2 Automatische Pegelkontrolle Limiter, Expander, Gate . . . 94
7.2.1 Kompressor . . . 94
7.2.2 Limiter . . . 96
7.2.3 Expander . . . 97
7.2.4 Gate . . . 97
7.3 Mischung . . . 97
7.4 Filter . . . 98
7.5 Equalizer . . . 98
7.5.1 „Kuhschwanz" . . . 98
7.5.2 Graphischer Equalizer . . . 99
7.5.3 Parametrischer Equalizer . . . 99
7.6 Zeit-Effekte . . . 100
7.6.1 Delay, Echo . . . 100
7.6.2 Hall, Raum, Early Reflection, Verzögerung, Platte, Spirale . . . 100
7.7 Modulation . . . 101
7.7.1 Tremolo . . . 101
7.7.2 Vibrato . . . 101
7.7.3 Phasing . . . 102
7.7.4 Flanging . . . 102
7.7.5 Chorus . . . 102
7.7.6 Rotary . . . 102
7.8 Frequenzbeeinflussung . . . 103
7.8.1 Harmonizer . . . 103
7.8.2 Autotune . . . 103
7.8.3 Double Tracking . . . 103
7.9 Nichtlineare Kennlinie: Sättigung, Verzerrung . . . 104
7.10 Analoge Bearbeitung . . . 104
7.11 Digitale Bearbeitung . . . 105
7.11.1 FIR . . . 105
7.11.2 IIR . . . 105
7.12 Programme zur Audio-Bearbeitung . . . 106
7.12.1 Wave-Editoren . . . 106
7.12.2 Digital Audio Workstation, DAW . . . 106

8 Wiedergabe 109
8.1 Lautsprecher . . . 109
8.1.1 Qualität der Wiedergabe . . . 109
8.1.2 Wandlertypen . . . 110
8.1.3 Gehäuse . . . 113
8.1.4 Schallführung . . . 116
8.1.5 Passive Lautsprecher und Weichen . . . 119
8.1.6 Aktive Lautsprecher und Weichen . . . 120

8.1.7 DSP-basierte Lautsprecher . . . 120
8.2 Raum . . . 120
8.3 Kopfhörer . . . 121

9 Praxis der Aufnahme 123
9.1 Voraussetzungen . . . 123
9.1.1 Musik, Musiker, Instrumente, Sprecher . . . 123
9.1.2 Gemeinsam, Nacheinander? . . . 123
9.1.3 Die Psychologie der Aufnahme . . . 124
9.1.4 Perfektion - Genie - „Magie” . . . 124
9.1.5 Live - Studio . . . 124
9.2 Die Mikrofonierung . . . 125
9.2.1 Close Miking . . . 125
9.2.2 Multi-Mikrofonierung . . . 126
9.2.3 Einige konkrete Schallquellen . . . 126
9.2.4 Der große geschlossene Klangkörper - Orchester, Chor, Orgel . . . 133
9.2.5 Das Schlagzeug . . . 134
9.3 Mischung der Aufnahme . . . 135
9.3.1 Das Ziel bei Aufnahmen: Simuliertes perfektes Ereignis, nicht Dokumentation . . . 135
9.3.2 Aufräumen . . . 135
9.3.3 Balance der Schallquellen . . . 135
9.3.4 Klang der einzelnen Kanäle . . . 135
9.3.5 Lokalisierung . . . 136
9.3.6 Rauminformation . . . 136
9.3.7 Kombination von Effekten: Erzeugen von Tiefenstaffelung . . . 136
9.3.8 Fokus . . . 137
9.3.9 Dynamik . . . 137

10 Praxis der Beschallung 139
10.1 Echtzeit . . . 139
10.2 Die Rückkoppelung . . . 139
10.2.1 Begrenzung der Lautstärke bzw. Verstärkung . . . 139
10.2.2 Sinnvolle Ausrichtung von gerichteten Lautsprechern, Isolation . . . 140
10.2.3 Nahmikrofonie . . . 140
10.2.4 Richtmikrofone, geschickt ausgerichtet . . . 140
10.2.5 Vorsicht bei Anhebung von Frequenzbereichen . . . 140
10.2.6 DI-Boxen, wo immer möglich . . . 141
10.2.7 Möglichst resonanzarme Wandler . . . 141
10.2.8 Wenig Hall im Monitor . . . 141
10.2.9 Vorsichtiger Umgang mit Kompressoren & Co . . . 141
10.2.10 Equalizer . . . 141
10.2.11 Feedback-Killer . . . 141
10.3 Erschütterung, Wind und Popp . . . 142
10.4 Wettereinflüsse . . . 142
10.5 PA - Beschallung des Publikums . . . 142
10.5.1 Minimallösung, kein Bass . . . 143
10.5.2 Voller Frequenzbereich, Subwoofer . . . 143
10.5.3 Klassischer Stack . . . 143

10.5.4 Vertikales Array 144
10.6 Monitor 144
10.6.1 Monitorboxen 144
10.6.2 In-Ear 145

Abbildungsverzeichnis

2.1 Kammfilter 4,3 mm Abstand 19
2.2 Kammfilter 10 mm Abstand 19
2.3 Kammfilter 100 mm Abstand 20
2.4 Pegelverhältnisse Direktschall und Hall im Raum 22

3.1 Aufbau des Ohres, aus Wikipedia, Lizenz CC by-sa Version 4, Urheber Geo-Science-International, Zugriff 2016-06-07 26
3.2 Kurven gleicher Lautstärke, aus Wikipedia Zugriff 2016-06-0 27

4.1 Beipiel eines Frequenzgangs, aus [18], Seite 253. Es handelt sich um ein Bändchenmikrofon 30
4.2 Beipiel eines Richtchdiagramms, aus [18], Seite 248 32
4.3 Frontale Einsprache bei Stabmikrofon 32
4.4 Seitliche Einsprache 33
4.5 Kugelcharakteristik 36
4.6 Achter-Charakteristik 38
4.7 Frequenzgang des Gradientenempfängers, linear und logarithmisch 40
4.8 Nahbesprechungseffekt 45
4.9 REF, Gamma und DSF in Abhängigkeit des Parameters A 47
4.10 Niere 48
4.11 Winkel der Auslöschung bei der Superniere im Raum 49
4.12 Superniere 50
4.13 Hyperniere 51
4.14 BreiteNiere 52
4.15 Alle Charakteristiken im Überblick 53
4.16 Mikrofon mit Kugelcharakteristik 55
4.17 Frequenzgang des Rauschens eines Mikrofons im Vergleich zu typischen Umgebungsgeräuschen, aus Peus [20], Seite 7 57
4.18 Induktion an einem bewegten linearen Leiter 59
4.19 Schematischer Aufbau eines dynamischen Mikrofons mit Kugelcharakterisitik 60
4.20 Prinzipielle Frequenzgänge Dynamisches Mikrofon mit Kugelcharakteristik 61
4.21 Schematischer Aufbau eines dynamischen Mikrofons mit Richtwirkung . . . 62
4.22 Prinzipielle Frequenzgänge dynamisches Mikrofon mit Gradientenanteil (gerichtet) 63
4.23 Absenkung von Bass oder Mitten bei einem dynamischen Mikrofon 63
4.24 Prinzipieller Aufbau eines Bändchenmikrofons, rechts ein Schnitt von a nach b 64

5.1 XY-Technik: Aufnahmewinkel in Abhängkeit vom Mikrofonwinkel 69
5.2 Beispiele: Aufnahmebereich von zwei Mikrohonen mit Nierencharakteristik 70
5.3 XY-Technik: Aufnahmewinkel in Abhängigkeit vom Mikrofonwinkel bei Hypernieren-Charakteristik 71

5.4 5.1 Lautsprecherpositionen im Kino 78
5.5 5.1 Lautsprecherpositionen im Studio und Zu Hause 79
5.6 IRT-Kreuz 80
5.7 ORTF-Surround 81

6.1 Klinken- und Cinchstecker 84
6.2 XLR Stecker 85
6.3 Stereo-Klinkenstecker 85
6.4 Prinzipschaltung zur Phantomstromversorgung 87

7.1 Parameter eines Kompressors 95
7.2 Anwendung eines Kompressors: Verlängerung des Ausklangs 96
7.3 Anwendung eines Kompressors: Verkürzung des Ausklangs 97
7.4 Prinzipschaltbild einer analogen Mischstufe 98

9.1 Mikrofonierung eines Flügels: Endposition 129
9.2 Mikrofonierung eines Flügels: Seitenposition 130
9.3 Mikrofonierung eines Flügels: Bei den Hämmern, AB und XY-Technik . . . 130
9.4 Mikrofonierung eines Flügels: Bei den Hämmern, Mikrofonarray 131
9.5 Beispiel einer Stereofläche: Links-Rechts und Vorne-Hinten 138

1 Überblick

Noch nie war die Ausrüstung für brauchbare Tontechnik so preiswert zu bekommen. Bei geschickter Auswahl von Komponenten kann man mit minimalem technischen Aufwand eine gute Wandlung in elektrische oder digitale Signale erreichen, die Signale bearbeiten, Wiedergeben oder dauerhaft digital speichern. Die inhärenten Abnutzungserscheinungen und Generationsverluste der analogen Speichertechnik brauchen nicht mehr zu interessieren. Nach der Digitalisierung kann beliebig ohne Verluste bearbeitet werden, mit perfekter Linearität im Frequenz- und Amplitudenbereich. Die Anforderungen an den passenden Rechner sind heute trivial zu erfüllen.

Das heißt auch: Man hat eine Ausrede weniger als früher, wenn das Ergebnis nicht überzeugt.

Eine weitere Voraussetzung für den Erfolg wird aber nicht verschwinden: die notwendigen Kenntnisse und Fähigkeiten, die Technik sinnvoll und gezielt einzusetzen.

Dabei will ich mit diesem Text eine erste Hilfestellung liefern. Wenn es mir gelingt heißt das aber auch: Noch eine Ausrede weniger. Das nehme ich gerne auf meine Kappe.

Erste Schritte von Aufnahmen sind bei Beschränkung auf jeweils einem Kanal pro Durchgang (oder überhaupt) schon mit Mikrofonen mit eingebautem A/D Wandler und USB Schnittstelle machbar, die durch Elektret-Mikrofontechnik recht brauchbar sind. Eine Kombination von mehreren Kanälen für z.B. Stereo-Aufnahmen oder noch mehr gleichzeitig aufgenommene Stimmen (ganze Band, Orchester mit Stützmikrofonen, Schlagzeug) ist aber auf die Art nicht möglich, da weitere Exemplare dieser Mikrofone nicht im digitalen Takt synchron wären und der Zusammenhang speziell der Phasen nicht gegeben ist. Im Mutitracking-Verfahren kann man aber beliebig viele Schallquellen nacheinander und jeweils Mono aufnehmen und nachträglich mischen und bearbeiten.

Nicht unnötig sparen darf man auch hier schon an der Lösung zum Abhören, damit man das Ergebnis realistisch beurteilen kann. Eine typische Gefahr ist es sonst, Schwächen der Abhörlösung in der Mischung auszugleichen, z.B. viel zu viel Bass zu verwenden, weil die Abhör-Lautsprecher die Frequenzen zu schwach oder praktisch gar nicht wiedergeben. Die entsprechend dieser Anforderung konstruierten Lautsprecher werden als Studiomonitore bezeichnet. Kopfhörer eignen sich nicht, um eine Mischung wirklich zu beurteilen. Typischerweise engt man beispielsweise das Stereobild zu sehr ein, weil das Signal an beiden Ohren unnatürlich stark getrennt ist. Ebenso ist es schwer, das Maß an Hall zu beurteilen, da kein echter Raum beim Hören dabei ist.

Wenn man dann mindestens zwei gleiche Mikrofone – am besten Kleinmembran mit austauschbaren Kapseln, zumindest Kugel und Niere oder je zwei Mikrofone – und ein Sound-Interface mit mindestens zwei Eingängen besorgt, öffnet sich auch der Bereich der Stereo-Mikrofonanordnungen. Mehr Kanäle lassen sich auch hier im Multitracking-Verfahren nacheinander aufnehmen. Eine oder zwei DI-Boxen runden die Ausrüstung ab, falls auch elektronische Quellen direkt aufgenommen werden sollen.

Für die Kombination von Haupt- und Stützmikrofone braucht man dann ein Interface mit ausreichend vielen Kanälen (Acht, besser 16, viel hilft viel) und entsprechend viele möglichst vielseitige (=neutrale) Mikrofone.

Wenn das Ziel nicht die Aufnahme ist, sondern eine direkte Wiedergabe, sind die entsprechenden Mikrofone und/oder DI-Boxen, ein Mischpult, Verstärker und passende Lautsprecher notwendig. Die beiden letztgenannten Komponenten können in Form von Aktiven Lautsprechern kombiniert sein. In der Regel gehören zumindest bei Musik auch Monitor-Lautsprecher für die Künstler dazu. Mit Effektgeräten kann man die Rückkoppelung im Zaum halten und den Klang optimal formen.

Wenn ein nicht trivial kleines Publikum zu beschallen ist, sollten die Beschallungslautsprecher (PA = Public Access) auf mehr als Ohrhöhe gebracht werden, damit die hinteren Reihen die Höhen nicht durch die vorderen abgeschattet bekommen. Außer bei sehr bassschwachen Signalen (Sprache) sollte immer ein Subwoofer auf dem Boden mit verwendet werden, denn die typische Reflektion der hochgestellten Lautsprecher am Boden führt zu einer ersten Auslöschung im Bassbereich, selbst wenn die Lautsprecher sie wiedergeben.

In jedem Fall ist es unverzichtbar, eine möglichst genaue Vorstellung vom Endergebnis zu haben und zu wissen, wie man es systematisch erreicht. Dabei ist immer der Grundsatz zu beachten, dass das Gesamtergebnis unbedingten Vorrang von Details hat (Klang eines einzelnen Instruments z.B.).

Im folgenden versuche ich vom Schwerpunkt her, die Konzepte zu erläutern und nicht, fertige Rezepte zu liefern. Das macht die Einführung eventuell trockener und schwerer verständlich. Es hilft aber ungemein, ein Ergebnis zielgerichtet anzugehen, Probleme zu identifizieren und einen eigenen Weg und Stil zu finden. Bei fertigen Rezepten ist man schnell im vorgefundenen Bereich gefangen, zumal sie oft nicht auf die jeweilig vorgefundene Situation so passen, wie man sich das wünscht.

Ansonsten lässt sich am meisten lernen, indem man die Konzepte versteht und Übung bekommt und auf das Verständnis der Konzepte abgleicht, diese also im Wortsinn begreift.

2 Das Schallfeld

2.1 Schwingungen, Wellen

2.1.1 Schwingungen

Bei (speziell mechanischen) Schwingungen reagiert ein System auf eine Störung, indem es Energie zwischen potentieller Energie durch Verlassen der Gleichgewichtslage und Bewegungsenergie bei Ausbleiben weiterer Störungen zyklisch austauscht. Wenn das Potential quadratisch zur Auslenkung verläuft, d.h. die rückstellende Kraft proportional zur Auslenkung ist, ergibt sich eine sinusförmige Bewegung. Man spricht von einem harmonischen Oszillator.

Bei elektrischen Schwingungen wird die Energie entweder zwischen einem Kondensator (potentiell, im elektrischen Feld) und einer Spule (Strom und Magnetfeld) ausgetauscht oder in aktiven Oszillatorschaltungen in rückgekoppelte Verstärkerschaltungen mit einem analogen Verhalten.

2.1.2 Wellen

Wenn eine Störung des Gleichgewichtzustandes sich räumlich fortpflanzt, spricht man von einer Welle. Die typischen Wellengleichungen erlauben dabei jede Wellenform, so lange sie über begrenzte Bereiche von Raum und Zeit quadratintegrabel bleibt (das entspricht einer endlichen Leistung, sollte also normalerweise erfüllt sein).

2.2 Pegel, dB

Einer Stelle im Schallfeld kann eine eine Leistungsdichte zugeordnet werden, das Produkt von Schalldruck und Schallschnelle. Im elektrischen Fall ist es das Produkt von Spannung und Strom.

In allen Fällen gibt es typischerweise ein konstantes Verhältnis den jeweiligen beiden Größen, deren Produkt die Leistung oder Leistungsdichte ergibt. Das Verhältnis ist dabei ein Widerstand, entweder mechanisch oder akustisch (Wellenwiderstand). Das Quadrat einer der proportionalen Größen ist dabei immer proportional zur Leistung oder Leistungsdichte. Man muss dazu noch mit dem Widerstandswert multiplizieren oder durch ihn dividieren, je nachdem, welche Größe man zugrunde legt.

Im akustischen Bereich kann der Die Leistungsdichte sich im wahrnehmbaren Bereich (Hörschwelle bis Schmerzschwelle) von ca. 12 Zehnerpotenzen bewegen.

Die Betrachtung dieses riesigen Wertebereichs vereinfacht sich, indem man die Leistung oder Leistungsdichte logarithmisch betrachtet. Dies entspricht auch einigermaßen der Wahrnehmung.

Man darf nicht vergessen, dass der Logarithmus auf (positive) Zahlen definiert ist, keinesfalls auf Messgrößen. Daher kann eine logarithmische Betrachtung immer nur gegen

eine Bezugsgröße stattfinden. Man bildet den Logarithmus aus dem Verhältnis des jeweiligen Wertes mit dem Referenzwert, die physikalische Einheit kürzt sich heraus.

Wenn man den natürlichen Logarithmus zugrunde legt, spricht man von *Neper*. Das wird in der Technik selten verwendet.

Mit dem dekadischen Logarithmus spricht man von *Bel*[1]. Da diese Einheit in praktischen Belangen oft zu grob ist, verwendet man ein Zehntel der Einheit, das *Dezibel*, kurz dB. Die Größe wird als Pegel bezeichnet, Formelbuchstabe L von Level (englisch).

Damit ergibt sich bei der Leistung P im elektrischen Fall und analoger Leistungsdichte im akustischen Fall der Zusammenhang:

$$L = 10 \log_{10}(P/P_{\text{ref}}) \tag{2.1}$$

wegen der quadratischen Abhängigkeit der Leistung von den genannten Grundgrößen, im akustischen Fall dem Schalldruck p

$$L = 10 \log_{10}(p^2/p_{\text{ref}}^2) = 10 \cdot 2 \log_{10}(p/p_{\text{ref}}) = 20 log_{10}(p/p_{\text{ref}}) \tag{2.2}$$

der Schnelle (*nicht Schallgeschwindigkeit)*, hier als vs bezeichnet

$$L = 10 \log_{10}(vs^2/vs_{\text{ref}}^2) = 10 \cdot 2 \log_{10}(vs/vs_{\text{ref}}) = 20 log_{10}(vs/vs_{\text{ref}}) \tag{2.3}$$

und im elektrischen Fall der Spannung

$$L = 10 \log_{10}(U^2/U_{\text{ref}}^2) = 10 \cdot 2 \log_{10}(U/U_{\text{ref}}) = 20 log_{10}(U/U_{\text{ref}}) \tag{2.4}$$

und dem Strom

$$L = 10 \log_{10}(I^2/I_{\text{ref}}^2) = 10 \cdot 2 \log_{10}(I/I_{\text{ref}}) = 20 log_{10}(I/I_{\text{ref}}) \tag{2.5}$$

Die entsprechenden Widerstandswerte stehen jeweils in Nenner und Zähler und heben sich daher weg.

Beispiel

$$P = U \cdot I = U \cdot U/R = U^2/R \tag{2.6}$$

und für die Leistungsbestimmung

$$\begin{aligned} L &= 10 \log_{10}(P/P_{\text{ref}}) \\ &= 10 \log_{10}(UI/(U_{\text{ref}} I_{\text{ref}})) \\ &= 10 \log_{10}(UU/R)/(U_{\text{ref}} U_{\text{ref}}/R) \\ &= 10 \log_{10}(U^2/U_{\text{ref}}^2) \\ &= 10 \log_{10}((U/U_{\text{ref}})^2) \\ &= 10 \cdot 2 \log_{10}(U/U_{\text{ref}}) \\ &= 20 \log_{10}(U/U_{\text{ref}}) \end{aligned} \tag{2.7}$$

In der Tontechnik ist vor allem der Schalldruck und die Spannung von Interesse, da sie ineinander überführt werden.

Die folgenden Referenzpegel haben sich eingebürgert:

Schalldruck p_0 ist definiert als 20 μPa für L_p

[1]Nach Alexander Graham Bell, dem Erfinder des Telefons

Spannung hier gibt es, zum Teil historisch motiviert, mehrere Bezugspegel. Durch Anfügen an das dB-Symbol gibt man an, was gemeint ist.

U_0	Einheit
1 mW an 600 Ω, also ca. 0,775 V	dBm (veraltet)
0,775 V	dBu
1 V	dBV

Mit etwas Verständnis und Übung kann man mit dB Werten überschlägig ganz gut im Kopf rechnen. Aus Multiplikation wird wie immer bei Logarithmen eine Addition, analog aus Division eine Subtraktion. Eine Potenz wird zum Faktor.

Einige Beispiele:

$$U_1/U_2 = 10 \tag{2.8}$$

daraus folgt eine Pegeldifferenz von 20 dB

$$U_1/U_2 = 1000 \tag{2.9}$$

daraus folgt eine Pegeldifferenz von 60 dB, die Potenz 3 von 10 wird multipliziert.

Bei vielen real interessanten Fällen kommt einem zugute, dass

$$1000 = 10^3 \simeq 2^{10} = 1024 \tag{2.10}$$

Die 1000 entsprechen 60 dB (s.o), also auch in etwa die 1024. Das ist aber

$$log_{10}(2) \cdot 10 \tag{2.11}$$

daher entspricht

$$U_1/U_2 = 2 \tag{2.12}$$

in etwa 6 dB. Das ist eine Vervierfachung der Leitung und Verdoppelung der Spannung.

Die Wurzel daraus halbiert den dB-Wert, so dass

$$U_1/U_2 = \sqrt{2} \tag{2.13}$$

einer Pegeldifferenz von 3 dB entspricht. Der genaue Wert ist irrational, die nächst bessere vernünftige Näherung wäre 3.01 dB. Da dies drittel Prozent in der Praxis nicht wirklich einen Unterschied macht (niemand hört ein hundertstel dB Unterschied), reichen die ca. 3 dB als praktischer Wert für eine Leistungsverdoppelung.

Ein etwas weniger triviales Beispiel, das aber auch überschlägig im Kopf gerechnet werden kann:

> Ein Lautsprechersystem erzeugt bei Ansteuerung mit 1 W im 1 m Abstand 98 dB Pegel. In einem Abstand von 8 m sollen 105 dB Spitzenpegel erreicht werden. Wie groß müssen der Verstärker und die Belastbarkeit des Lautsprechers sein?
>
> Die Leistung verteilt sich mit der durchstrahlten (Teil-)Kugelfläche, also quadratisch zum Abstand. Wenn also in 8 m 105 dB erreicht werden sollen, sind das Pro Abstandshalbierung je 6 dB mehr. Das passiert in dem Fall 3 Mal. Der Lautsprecher muss also in 1 m Abstand

105 dB+$(3 \cdot 6)$ dB= 123 dB

Pegel erreichen. Bei 1 W erreicht er 98 dB, die Differenz ist

123 dB−98 dB= 25 dB.

Rechnen wir weniger krumm und mit Sicherheitsaufschlag mit 26 dB, so sind das Faktor 100 für 20 dB und die restlichen 6 dB ergeben einen Faktor 4. Mit 400 W an Verstärkerleistung und Belastbarkeit des Lautsprechers ist man auf der sicheren Seite.

2.3 Die Sinus-Welle, Fouriertransformation

2.4 Die Sinus-Welle

Bei fast allen Darstellungen der Mathematik hinter akustischen oder elektroakustischen Vorgängen wird der Fall der Sinus-Welle zugrunde gelegt. Das hat gute Gründe.

Der mathematisch einfachste Fall einer periodischen Bewegung ist der harmonische Oszillator. Eine Realisierung ist ein Massepunkt um quadratischen Potential (lineare Kraftabhängigkeit) einer Feder. Bei kleinen Auslenkungen ist das für jedes stabile System in zunehmend besserer Näherung erfüllt (Taylor-Reihe).

Was bis jetzt nach nur dem einfachsten Spezialfall aussieht reicht aber viel weiter und deckt tatsächlich alle Fälle ab, in denen das System linear ist. Das ist ohnehin eine Forderung an praktisch alle Geräte und Wandler in der Elektroakustik, die sonst nur eingeschränkt eine Trennung von Signalkomponenten und damit klare Wahrnehmung erlauben.

Das Schöne an linearen Systemen ist, dass man aus einer Beschreibung der Reaktion auf eines von mehreren Eingangssignalen die auf eine gewichtete Summe (Linearkombination) berechnen kann, ebenso allgemein bei einem Signal, das aus einem Integral über beliebig viele Eingangsfunktionen darstellbar ist.

2.4.1 Fouriertransformation

Die Fouriertransformation ist ein mächtiges Werzeug, um viele wichtige Informationen zu einem System zu berechnen und darzustellen. Sie verschiebt die Betrachtung von einer Zeitbasis in eine Frequenzbasis und umgekehrt.

Eine zeitlich diskrete Funktion auf einem begrenzten Intervall kann in die Summe von endlich vielen Sinus- und Cosinusfunktionen zerlegt werden. Eine alternative Darstellung ist die Angabe der Amplitude jeder Frequenz und der zugehörigen Phase, noch weiter zusammengefasst jeweils eine komplexe Amplitude. Bei zyklischen Funktionen genügt die Betrachtung einer einzigen Periode. In der digitalen Signalverarbeitung liegt eigentlich immer dieser Fall vor, notfalls, indem das Signal in mehrere Abschnitte aufgeteilt wird.

Wenn die zeitliche Quantelung wegfällt, wird aus den Summen eine unendliche Summe, die Transformation funktioniert aber immer noch. Umgekehrt: Wenn es eine höchste vorkommende Frequenz gibt, reicht es aus, an zwei gleichverteilten Stützstellen pro Periode der höchsten Frequenz im Zeitverlauf den Funktionswert anzugeben, um den vollständigen Zeitverlauf zu kennen. Das beschreibt das Shannon'sche Abtasttheorem, eine der Grundlagen der digitalen Signalverarbeitung.

Wenn man das Intervall auf den gesamten Bereich der reellen Zahlen ausdehnt, werden die Summen durch Funktionen (genau genommen ihre Verallgemeinerung, Distributionen)

über der Frequenz ersetzt, auch für Sinus und Cosinus getrennt, als Amplituden- und Phasenfunktion oder als komplexwertige Funktion. Der Fall ist in einem Bereich komplexer: bereits eine einzige zyklische Sinus-Funktion führt in der Transformation zu einem Divergieren bei der zugehörigen Frequenz, da der Integrgrationsbereich unendlich ist. Deswegen ist hier kein Funktionswert definiert, aber das Integral über den Punkt. Keine Funktion kann diese Eigenschaft haben, allerdings die dafür eingeführte Verallgemeinerung, eine Distribution. Die einfachste Distribution, die außer am Ursprung überall den Wert 0 hat, aber deren Integral den Wert 1 liefert, sobald 0 im Integrationsintervall liegt, heißt Deltafunktion. Sie ist zwar wie gesagt keine Funktion, sondern eine Verallgemeinerung, eine Distributin. Man verwendet den eigentlich falschen Namen aber als Eigennamen.

Die Deltafunktion hat eine wichtige Bedeutung: Wenn man die Antwort eines linearen Systems auf diese Funktion kennt, ist es auch möglich, durch die mathematische Operation der Faltung die Antwort auf beliebige Eingänge zu berechnen. Die Antwortfunktion auf das Delta wird als Impulsantwort oder Green'sche Funktion bezeichnet. Ihre Fouriertransformierte ist die Antwortfunktion auf beliebige Sinusförmige Signale und umgekehrt.

Es ist in der Praxis erheblich effizienter, die Eingangsfunktion und die Green'sche Funktion nach Fourier zu transformieren, zu Multiplizieren und das Ergebnis zurückzutransformieren als die äquivalente Faltung direkt zu berechnen.

Die Fouriertransformation ist umkehrbar, bei geschickter Wahl gewisser Vorfaktoren und Betrachtung im Komplexen sogar symmetrisch. Daher auch der Name Transformation: beide Betrachtungen sind vollständig, mit allen Informationen.

Das ist jetzt alles sehr theoretisch und ich habe nur die Ergebnisse wiedergegeben, aber es hat wichtige Folgen in der Praxis.

Es genügt, das Verhalten eines Systems zu kennen, wenn ein beliebiges Sinus-Signal oder auch ein Impuls am Eingang eingespielt wird.

Wenn jemand einwendet, die Beschreibung der Antwort auf Sinus-Signale sei irrelevant, da Musik ja auch nicht aus Sinus-Signalen bestünde, beweist er/sie seine Unkenntnis. Wie jedes Signal kann man auch Musik in Sinus-Signale (mit jeweils passender Phase) zerlegen unter Erhalt der gesamten Information. Sonst wäre der Vorgang nicht umkehrbar.

Wenn eine Impulsantwort reell ist (wie der Name sagt, also im wirklichen Leben immer) und nur nach dem Impuls ungleich 0 ist (das System also nicht in die Zukunft sehen kann, mir ist noch nichts anderes begegnet), gibt es noch interessante Beziehungen zwischen dem vollständigen Amplitudengang und dem Phasengang (Kramers-Kronig Relationen). Bis auf Verzögerungs- und Allpasseffekte kann man die minimalen Phasengänge aus den Amplitudengängen berechnen. Viele Wandler arbeiten minimalphasig. Wenn man Resonanzen oder Auslöschungen in deren Frequenzgang sieht, ist sofort klar, dass damit Phasenverschiebungen in deren Bereich und Umgebung auftreten, z.B. ein Nachklingen bei Resonanzen.

Unter Ausnutzung von zahlentheoretischen Zusammenhängen kann die Fouriertransformation bei gut in kleine Primfaktoren zerlegbare Zahl von Stützstellen sehr effizient numerisch berechnet werden, besonders, wenn es sich um eine Potenz der Zahl 2 handelt. Dann können viele Vorfaktoren in der Berechnung bei geeigneter Sortierung der Werte auf eine große Summe zusammengefasst werden. Das entsprechende Verfahren nennt sich Fast Fourier Transformation (FFT).

Summa summarum: Der Frequenzgang eines Systems ist eine der wichtigsten charakterisierenden Eigenschaften. Bei einem linearen System ist er bei vollständiger Auflösung und Einbeziehung der Phasen sogar eine vollständige Beschreibung.

2.5 Das ebene Schallfeld - Freifeld

Dies ist der einfachste Fall. Die Verhältnisse hängen nur von der Position in einer Richtung ab, senkrecht dazu ändert sich nichts.

Legen wir die X-Achse in die Ausbreitungsrichtung. Dann reicht eine eindimensionale Betrachtung.

Für eine nach rechts in X-Achse laufende Welle ergibt sich die einfache Gleichung

$$p(x,t) = \sqrt{2}\, p_{\text{eff}} \sin\left(2\pi\left(\frac{x}{\lambda} - (t-t_0)f\right)\right) = \sqrt{2} p_{\text{eff}} \sin\left(2\pi\left(\frac{xf}{c} - (t-t_0)f\right)\right) \quad (2.14)$$

Dabei sind p der momentane Druckunterschied zum statischen Druck, p_{eff} der Effektivwert des Schalldrucks, λ die Wellenlänge, f die Frequenz, c die Schallgeschwindigkeit. Letztere ist von der Temperatur abhängig, jedoch nicht vom Luftdruck.

2.6 Die Kugelwelle

Kugelwellen gehen im theoretischen Grenzfall von einem Punkt aus, realistischer von einer (kleinen) „atmenden" Kugel. Damit vermeidet man die Singularität im Ursprung (unendlicher Druck, unendliche Leistungsdichte).

Man kann das Ergebnis ebenfalls eindimensional darstellen, diesmal aber in Abhängigkeit vom Radius r, da alle anderen Polarkoordinaten keinen Einfluss auf das Feld haben.

Im Grenzfall großer Entfernungen geht die Welle lokal in eine ebene Welle über.

Der Amplitudenverlauf ist hier aber nicht konstant mit r, da die zu p_{eff} quadratische Leistungsdichte sich auf die jeweilige Kugelfläche verteilt, also mit $\frac{1}{r^2}$ abnimmt. Der Druck nimmt daher mit $\frac{1}{r}$ ab.

$$p(r,t) = \frac{1}{r}\sqrt{2} p1_{\text{eff}} \sin\left(2\pi\left(\frac{r}{\lambda} - (t-t_0)f\right)\right) = \frac{1}{r}\sqrt{2} p1_{\text{eff}} \sin\left(2\pi\left(\frac{rf}{c} - (t-t_0)f\right)\right) \quad (2.15)$$

2.7 Interferenz

Bei Signalen, die keinerlei Zusammenhang besitzen (sie sind unkorreliert) addiert sich bei Überlagerung (im Mittel) die Leistungsdichte, die proportional zum Quadrat des Schalldrucks ist. Es gilt also bei effektiven Schalldrucken p_1 bis p_N als Resultierendes Gesamtsignal p_{res}

$$p_{\text{res}} = \sqrt{(p_1^2 + p_2^2 + \ldots + p_N^2)} = \sqrt{\left(\sum_{i=1}^{N} p_i^2\right)} \quad (2.16)$$

Wenn jedoch eine konstante Phasenbeziehung besteht, wirkt sich das auf den resultierenden Druck aus. Er kann besonders bei gleicher Amplitude zwischen 0 und dem doppelten Druck schwanken. Für sinusförmige Signalanteile mit einem Phasenunterschied $\delta\phi$ gilt:

$$p_{\text{res}} = (p_1 + p_2) \cdot \cos(\delta\phi) \quad (2.17)$$

2.8 Ebene Reflektion, Kammfilter

Bei der ebenen Reflektion an einer schallharten Wand (Die Schallschnelle staut sich vollständig, die Welle wird vollständig zurückgeworfen, nach dem gleichen Reflektionsgesetz wie in der geometrischen Optik) wirkt die Interferenz besonders drastisch.

Da zumindest nahe an der Wand der Pegel der ein- und ausfallenden Welle praktisch gleich ist, werden die beiden Extreme Verstärkung auf +6 dB und Auslöschung erreicht.

Bei Einfall in der Normalenrichtung (senkrecht zur Wand) ergibt sich für jede Sinuskomponente jeweils im Abstand $\frac{\lambda}{4} \cdot N$ für ungerade N eine Auslöschung und bei geradem N eine Verstärkung. Bei einem gegebenen Abstand δ wird der Frequenzgang durch die Überlagerung mit dem frequenzabhängigen Faktor $V(\delta, c, f)$ moduliert, der sich berechnet nach

$$V(\delta, c, f) = 1 + \cos\left(\frac{4\pi\delta}{\lambda}\right) = 1 + \cos\left(\frac{4\pi\delta f}{c}\right) \tag{2.18}$$

Die Auslöschungsstellen nennt man Knoten, die verstärkenden Stellen Bäuche des Wellenfeldes.

Hier folgen einige resultierenden Frequenzgänge als Beispiele, linear und doppelt logarithmisch (wie üblich).

Die erste Auslöschung im Hörbereich erfolgt bereits in 4.25 mm Wandabstand.

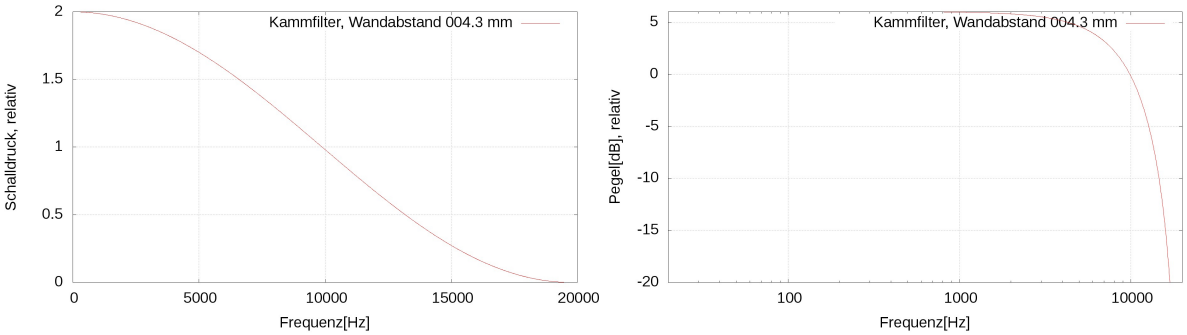


Abbildung 2.1: Kammfilter 4,3 mm Abstand

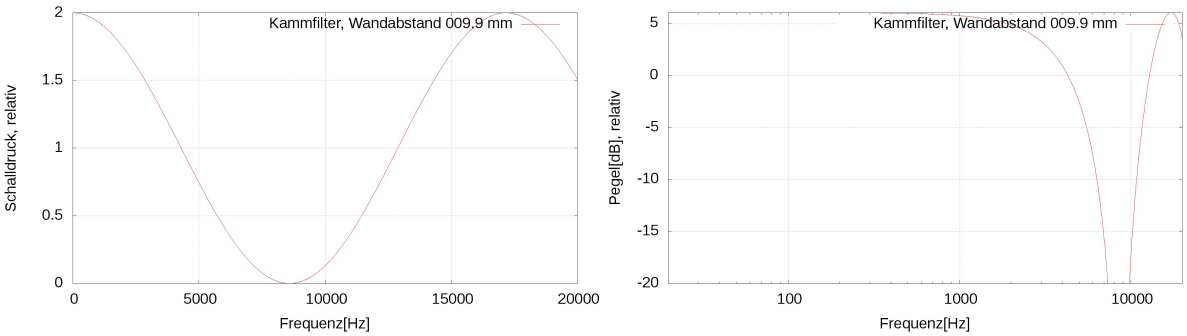


Abbildung 2.2: Kammfilter 10 mm Abstand

Die Veränderungen durch kleinste Abstandsänderungen liegen weit jenseits von allem, was die Abweichungen von Ideal bei Geräten oder Wandlern verursachen.

Eine Animation des Vorgangs bei Abstandsänderung ist unter der Youtube Playlist Audio Visualisation[41] in linearer Darstellung und in dB zu finden.

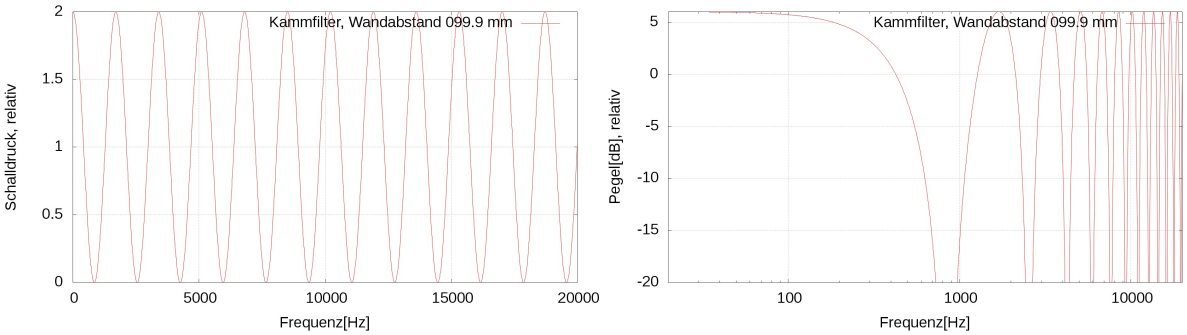


Abbildung 2.3: Kammfilter 100 mm Abstand

Abgesehen von der Absorption gelten die Regeln für die Wege des Schalls in beiden Richtungen gleich. Daher ist der Effekt gleich, wenn eine nicht richtende Quelle und das Mikrofon ihre Position tauschen.

Daraus folgt, dass der gleiche Effekt auch bei der Schallabstrahlung auftritt. Wenn die Quelle nicht stark richtet, addiert sich das zeitverschobene Echo von der Wand mit dem Originalklang.Das Echo ist aber oft durch die Quelle (falls sie nicht allzu klein ist) an manchen Positionen abgeschattet, was bei der Positionierung des Mikrofons beachtet werden sollte. Je nach Abstrahlcharakteristik der Quelle und den geometrischen Gegebenheiten muss man aber darauf achten, den Effekt nicht zu übersehen (oder zu überhören).

Ein häufiger Fall ist in den Graphiken nicht enthalten, kann aber leicht im Kopf extrapoliert werden: bei 1 m Abstand erfolgt die Auslöschung knapp unter 100 Hz, also im Bass. Wenn man dort eine Bassbox positioniert, sind Leistung und Wirkungsgrad egal, in dem Bereich kommt kein Schalldruck zustande.

Neben der Tatsache, dass bei Abständen ab 5 cm zu viele Nullstellen auftreten, als dass man noch versuchen könnte, etwas zu korrigieren, ist wichtig zu bedenken, dass es sich im Extremfall (gleiche Amplitude von ein- und auslaufenden Wellen) um Nullstellen handelt. In den Frequenzen ist kein Teil des Signals mehr enthalten. Linear lässt sich das nicht ausgleichen, die Multiplikation mit 0 ist unerbittlich.

Es ist wichtig, zu erwähnen, dass für divergierende Wellen (endlicher Abstand der Quelle) und bei teilweiser Reflektion die einlaufende Welle eine höhere Amplitude als die auslaufende hat. Statt einer vollständigen Auslöschung gibt es dabei eine Absenkung im Frequenzgang an den entsprechenden Orten. In einem Raum ist der Effekt auch dadurch abgemildert, dass der diffuser Raumklang sich inkohärent addiert und damit die Lücken im Frequenzgang zumindest teilweise füllen kann.

Um den Kammfiltereffekt zu vermeiden oder zenigstens zu minimieren, sollten die folgenden Vorkehrungen getroffen werden:

- Weder die Quelle noch das Mikrofon sollten sehr nahe an einer Wand stehen. In ihrer direkten Umgebung sind die Amplituden von direktem und reflektiertem Schall am ähnlichsten.

- Wenn es um die Aufnahme einzelner Quellen geht. sollten das Mikrofon und die Quelle wesentlich näher zueinander als jedes von beiden zur Wand sein. Das maximiert den Amplitudenunterschied zwischen direktem und reflektierten Schall. Außerdem mimimiert es den Effekt des Raumklangs, was das Signal klarer werden lässt. (Nahmikrofonierung, Close Miking)

- Nahe Oberflächen sollten so behandelt sein, dass Reflektionen minimiert werden.
- Wenn mehrere Mikrofone das Signal der gleichen Quelle (mit) aufnehmen, sollten ihre Entfernungen so weit wie möglich unterschiedlich sein. Eine Faustregel besagt, die Entfernungen sollen sich mindestens um den Faktor drei unterscheiden(Drei zu eins Regel).

2.9 Der Raum

2.9.1 Raummoden

Wenn mehrere Wände einen typischerweise geschlossenen Raum umgeben, findet die Reflektion mit zugehörigem Interferenzverhalten an ihnen allen statt. Zusätzlich bilden sich Wege, auf denen der Schall in geometrisch-akustischer Näherung auf geschlossenen Wegen hin und her reflektiert wird. Das führt zu den bekannten „stehenden Wellen", die im Extremfall (ohne Dämpfung) auf dem gesamten Bereich in Phase schwingen. Eigentlich sind es keine Wellen mehr, sondern Räumlich verteilte Schwingungen bei den zugehörigen Frequenzen, sie sich nicht mehr bewegen, sondern ortsfeste Knoten und Bäuche haben.

Bei den Frequenzen, die zu den Moden passen, sammelt sich die Energie auf, der Raum hat jeweils eine Resonanz. Der Schallpegel bei gleicher Anregung steigt extrem an und ein Signalanteil dieser Frequenz bleibt abhängig von der Bedämpfung eine teilweise überraschende Zeit im Raum bestehen. Beides führt zu großen Problemen bei einer sauberen Basswiedergabe.

Basssignale im Raum akustisch aufzunehmen wird durch die Raummoden erheblich kompliziert. Wenn der Raum nicht sehr groß ist (Konzerthalle) oder die Moden durch Dämpfungsmaßnahmen gezähmt sind, bleibt in der Praxis oft ausschließlich die Aufnahme aus der Nähe, wo das direkte Signal lauter ist als der Beitrag der Modenstruktur.

Dämpfungselemente, die (in der Regel durch höhenreflektierende Oberfläche) gezielt im Bass wirken, werden als Bassfalle bezeichnet.

2.9.2 Nachhall, Diffusfeld

Bei mittleren und hohen Frequenzen wird die Dichte der Resonanzfrequenzen der Moden so dicht, dass sie nicht mehr einzeln wahrnehmbar sind. Die Frequenz, ab der die Bandbreite einer Mode so groß wird, dass die Moden sich im Frequenzbild überlappen, nennt man Schrödingerfrequenz.

Die Beschreibung der Schallaubreitung kann jetzt durch die Betrachtung der Schallwege mittels geometrischer Akustik (analog zu geometrischer Optik) betrachtet werden. Sie erfolgt im Fall des Raumes statistisch.

Wenn durch vielfache Reflektionen in chaotischen Winkeln ein statistisch gleichmäßiger Schalleinfall von allen Seiten vorliegt, spricht man vom Diffusfeld. Es wird in einem Hallraum (nur harte Wände, aber chaotisch geformt, keine parallelen Wände, evtl. zylindrische Körper zur Streuung) sehr gut genähert.

Bei theoretischen Betrachtungen ist das ein Modell für den Einfluss des Raumhalls, meist verglichen zum Nahfeld (Kugelwelle) einer einzelnen Quelle.

Das Diffusfeld wird als ortsunabhängig und zu einer gleichzeitig betrachteten Quelle inkohärent angenommen, auch wenn sie davon angeregt wurde. Bei Signalen mit extrem langer Kohärenzzeit trifft das nicht wirklich zu.

Ein Aufschaukeln zu beliebig hohen Pegeln wird durch immer vorhandene Verluste verhindert. Nach Ende der Anregung nimmt der Schalldruck exponentiell ab. Die Zeit, in der die Abschwächung 60 dB erreicht, bezeichnet man als Hallzeit t_{60}. Typischerweise hört man danach keinen Hall mehr.

Bei einer Messung ist es oft schwierig, wirklich bis zum Erreichen von -60 dB zu messen, insbesondere, wenn Störschall gleichzeitig auftritt. Man misst dann Beispielsweise bis zum Abfall auf -20 dB und verdreifacht den Wert (Extrapolation). Den auf -60 dB extrapolierten Wert nennt man t_{20}. Idealerweise ist also $t_{20} = t_{60}$!

Das direkte und das diffuse Signal werden als unkorreliert angenommen, also ist der resultierende Schalldruck

$$p_{\text{res}} = \sqrt{p_{\text{Kugel}}^2 + p_{\text{Diffus}}^2} \tag{2.19}$$

Hier ist der Effekt auf den Schalldruck einzeln und im Resultat graphisch dargestellt. Bitte beachten: der Ursprung ist wegen der Singularität und fehlenden praktischen Relevanz unterdrückt. Die absoluten Werte sind willkürlich, nicht die +3 dB am Kreuzungspunkt der Einzelkurven.

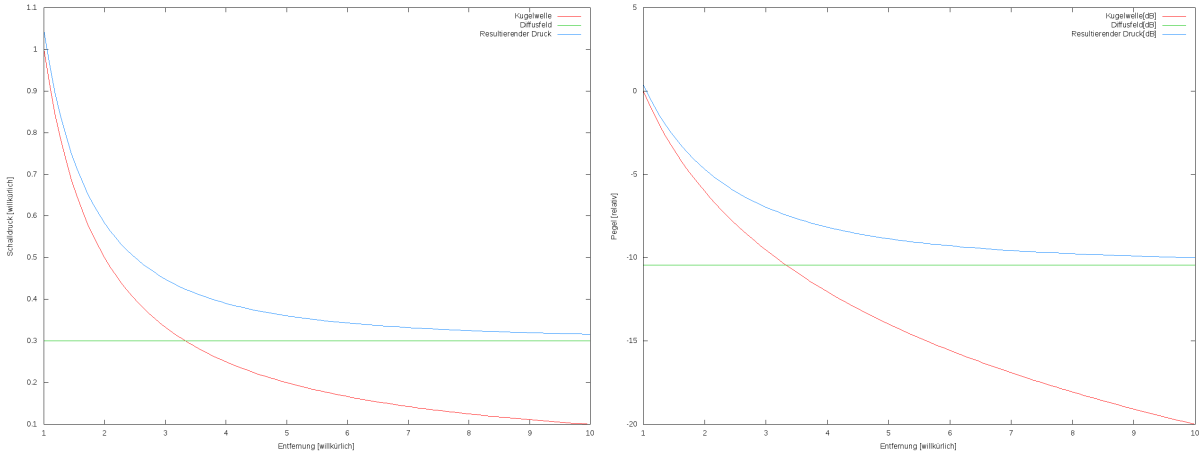


Abbildung 2.4: Pegelverhältnisse Direktschall und Hall im Raum

Der Schnittpunkt zwischen direktem und diffusem Hall definiert den Hallradius, den Radius, an dem der Hall den gleichen Schalldruck wie das direkte Signal hat.

Die Nachhallzeit kann verringert und der Hallradius vergrößert werden, im dem man Dämpfende Elemente, meist poröse Stoffe (Glaswolle, offenporiger Schaumstoff, z.B. Basotect, mikrogelochte Folien) einbringt. Vorsicht ist geboten, das diese bei geringer Schichtdicke vor allem bei hohen Frequenzen wirken und damit der Bass unangenehm basslastig wird.

Wenn die Struktur des Nachhalls (meist wegen planparalleler Wände und Flatterechos) zu regelmäßig ist, helfen Diffusoren, die durch gekrümmte Oberflächen oder passend räumlich verteilte Tiefe der Reflektionsstelle mittels Beugung den Schall nach allen Richtungen verteilen, ohne den Nachhall zu verringern.

2.10 Ausdehnung von Quellen

Alle Schallquellen, die größer als $\frac{1}{4}\lambda$ sind[2] (also bei 20 KHz und 17 mm Wellenlänge eigentlich alle) und zumindest teilweise mit gleicher Phase schwingen, richten den Schall, in der Regel stark frequenzabhängig. Dabei werden die Höhen mit ihren kurzen Wellenlängen in der Regel am stärksten gebündelt.

Man muss bei einer Mikrofonierung eine Stelle (oder mehrere...) finden, an der der Klang den Erwartungen entspricht.

2.11 Ausdehnung von Mikrofonen

2.11.1 Interferenz

Bei hohen Frequenzen tritt bei seitlicher Beschallung und nicht allzu kleinen Membranen eine Interferenz auf, da nicht alle Teile der Membran mit der selben Phase erregt werden. Das führt zu einem Abfall des Frequenzgangs im Höhenbereich. Je größer die Membran ist, umso stärker ist der Effekt.

2.11.2 Reflektion

Sobald der Durchmesser der Membran in die Größenordnung der Wellenlänge kommt, wird das Schallfeld verändert. Insbesondere wird der Schall an der Membran reflektiert. Im Grenzfall hoher Frequenzen ist der Schalldruck der reflektierten Welle genau so groß wie der der einfallenden. Da die Phase am Ort der Reflektion gleich ist, ergibt sich eine Anhebung um 6 dB. Der Übergang erfolgt typischerweise etwa innerhalb einer Oktave.

Den gleichen Anstieg mit gleichmäßigerem und breiteren Übergang erhält man an einer Kugelfläche. Man kann für diesen Effekt entweder eine (meist Holz-)Kugel von z.B. 5 cm für das Mikrofon[3] passend durchbohren und es einfügen. Die Neumann-Modelle M50 und M150 haben eine solche Anordnung (trotz ihres Aussehens mit Kleinmembrankapseln) fest eingebaut. Für AB-Hauptmikrofone(siehe Kapitel 5.2.3, Seite 72) und Decca-Trees(siehe Kapitel 5.2.5, Seite 74 kann man das Signal meist direkt verwenden. Die gleichmäßige Höhenanhebung gleicht die Abnahme durch Entfernung und typischen Höhenabfall im Raumhall recht gut aus.

[2] Ab dann sind Bereiche in der Abstrahlung gegenphasig

[3] Das muss natürlich ein reiner Druckempfänger sein, da die rückseitigen Schalleinlässe anderer Kapseln abgedeckt würden.

3 Das Hören

3.1 Aufbau des Ohrs

Das Außenohr, vor allem die Hörmuschel sammelt nicht nur Schallenergie ein, sondern hat mehrere Eingangsbereiche und von denen ausgehend (offene) Schallleiter, die einen Teil des Schallsignals mit einem Umweg und entsprechend Verzögerung in die inneren Ohrteile geben. Das führt über Resonanzen und Interferenzen zu richtungsabhängigen Verfärbungen, vor allem in der Richtung oben/unten.

Von dort geht es über den Gehörgang zum Trommelfell. Der Gehörgang bildet eine Resonanzstruktur (einseitig offenes Rohr), die im Bereich der höchsten Empfindlichkeit die Wahrnehmungsgrenze bis nahe ans Wärmerauschen der Luft senkt.

Das Trommelfell nimmt die Druckschwankungen auf und leitet über die kleinen Knöchelchen Hammer, Amboss und Steigbügel die Schwingungen mechanisch transformiert und von der Impedanz her angepasst an die Hörschnecke. Dort werden die verschiedenen Frequenzen relativ grob getrennt und durch die Härchen der Hörzellen aufgenommen. Gesammelt werden die Signale durch den Hörnerv. Von dort werden sie zum Hörzentrum im Gehirn geleitet. Dabei wird insbesondere die Trennung der Frequenzen extrem verschärft.

3.2 Wahrnehmungsgrenzen

Die Grenzen der Wahrnehmung beim Hören liegen bei ca. 0-130 dB vom Schalldruck (daher rührt die ursprüngliche Definition von 0 dB bei 1 KHz) und 16-20000 Hz von den Frequenzen. Mit zunehmendem Alter steigt die Hörschwelle an und dir obere Grenzfrequenz sinkt. In letzter Zeit gibt es Messungen, die zur Vermutung führen, dass auch noch unter 16 Hz Schall wahrgenommen werden kann. Das ist aber in der Tontechnik kaum von Belang, da es mit dem jetzigen Stand der Technik kaum möglich ist, solch tiefe Frequenzen wiederzugeben und in der Musik und erst recht bei Sprache spielen sie auch keine Rolle.

Der Wahrnehmungsbereich spannt aber im Bereich der beiden Größen Schalldruck und Frequenz keineswegs ein Rechteck auf.

3.2.1 Kurven gleicher Lautstärke

Die zuerst von Fletcher und Munson gemessenen und später mit verbesserter Ausstattung verfeinerten Kurven gleicher Lautstärke sind nach unten durch die Hörschwelle der jeweiligen Frequenz begrenzt. Das Maß Phon ist die empfundene Lautstärke verglichen mit der eines Tons der Frequenz von 1 KHz beim Pegel von gleich vielen dB.

Der empfindlichste Bereich ist der zwischen 2 und 4 KHz, was der Resonanz des Ohrkanals als einsetig offene Pfeife entspricht.

Im Bassbereich gibt es zwei Auffälligkeiten, nämlich, dass

- ein Pegel von 70 dB notwendig ist, damit überhaupt der volle Frequenzbereich wahrgenommen wird. Bei 60 dB liegt die tiefste wahrnehmbare Frauenz z.B. bereits bei

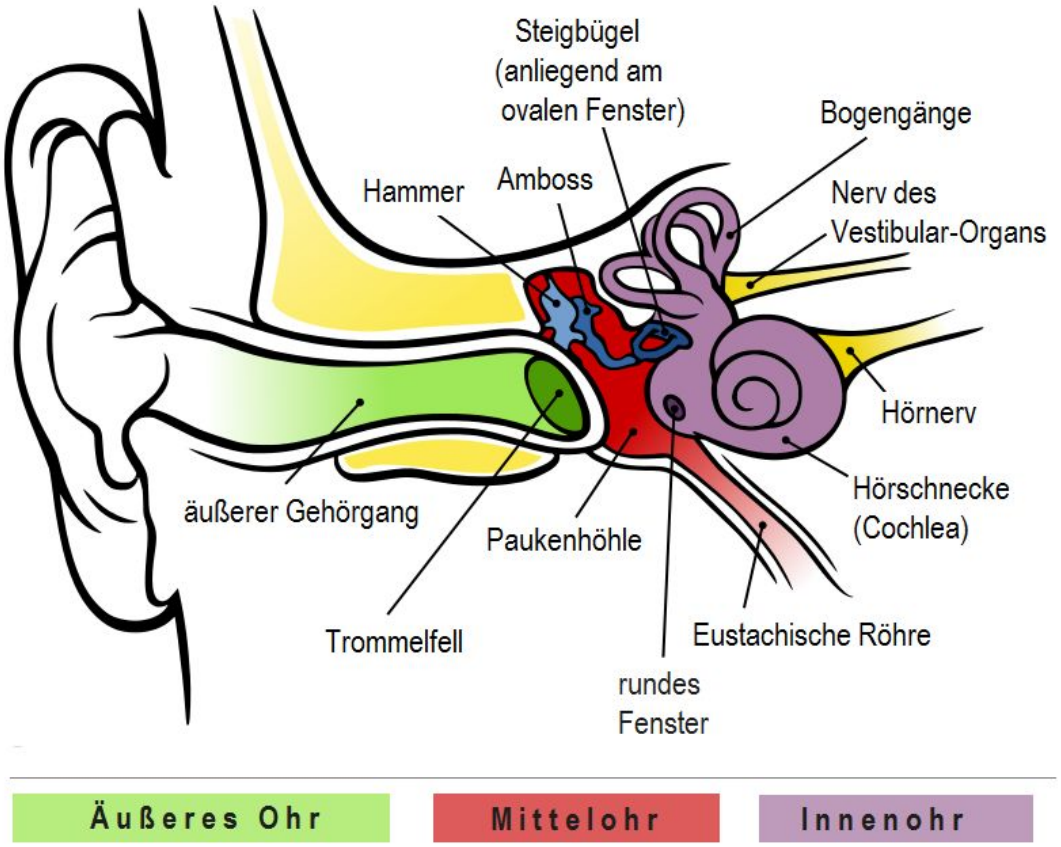


Abbildung 3.1: Aufbau des Ohres, aus Wikipedia, Lizenz CC by-sa Version 4, Urheber Geo-Science-International, Zugriff 2016-06-07

30 Hz, bei 20 dB bei fast 150 Hz (rote Kurve).

- die gehörten Lautstärken oberhalb von 20 phon enger zusammen liegen als bei anderen Frequenzen. Man sieht das deutlich beim Wert, der zu 20 Hz gehört. Die Kurven obehralb von 20 Phon liegen nicht 20 dB nach oben voneinander entfernt, sondern eher 10 dB. Eine Abweichung im Basspegel ist also auffälliger als in anderen Bereichen.

Für die Wiedergabe bedeutet das: bei niedrigen Pegeln braucht man keinen tiefen Bass, er wird ohnehin nicht wahrgenommen. Nur das macht bestimmte Zwerge von Lautsprechern erträglich.

Außerdem: zum Beurteilen einer Mischung ist ein gewisser Mindestpegel (oft genommen: 85 dB, damit auch eine Pegelreserve nach unten zur Beurteilung da ist) notwendig, da der Bassanteil sonst nicht ausreichend wahrgenommen wird. Der passende Bassanteil ist Lautstärkeabhängig. Eigentlich sollte ein Normpegel vereinbart sein, so wie es bei Filmen mittlerweile üblich ist.

Wenn man den Zielpegel und den Wiedergabepegel kennt, was bei eingemessenen AV-Receivern oder Kinosälen der Fall ist, kann man den bekannten Fehler im Basspegel auch korrekt berechnen und durch Anhebung oder Absenkung korrigieren. In ganz grober Form versucht der Loudness- oder Countour-Regler mancher HiFi-Verstärker das gleiche zu erreichen.

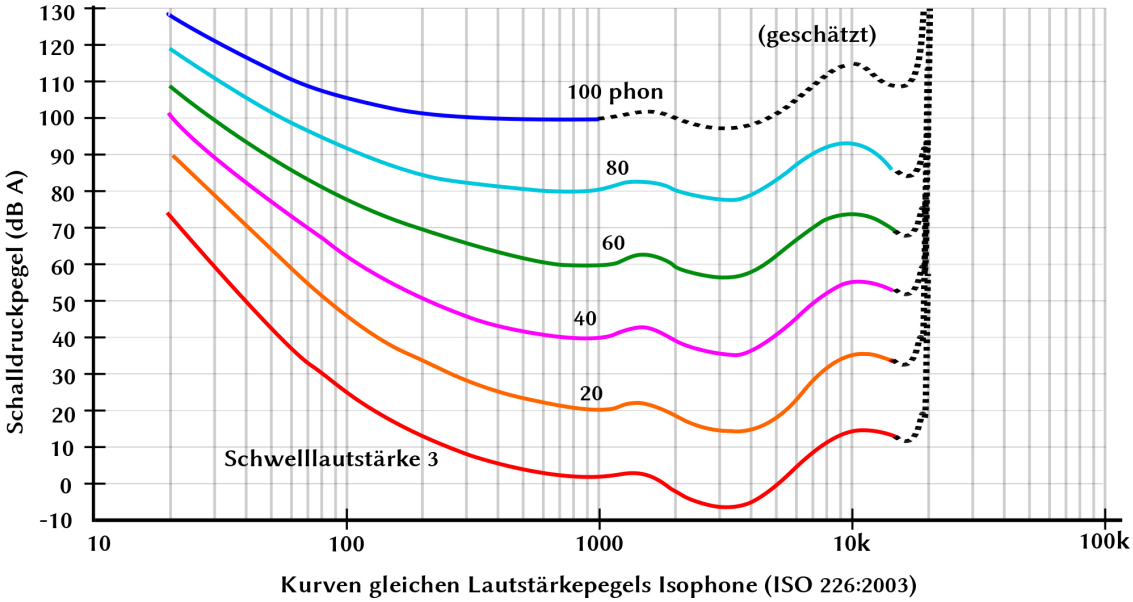


Abbildung 3.2: Kurven gleicher Lautstärke, aus Wikipedia Zugriff 2016-06-0

3.2.2 Verdeckung

Die Wahrnehmung eines Tons führt dazu, dass in unmittelbarer Umgebung, insbesondere zu den Höhen, die Warhnehmugnsschwelle für weitere Töne steigt.

Die verlustbehafteten digitalen Kompressionssmethoden nutzen das aus, indem die verdeckten Signale in geringerer Auflösung oder überhaupt nicht gespeichert werden.

Eine Folge des Effekts ist, dass hohe Pegel im Bass wenig Platz für Details in höheren Frequenzbereichen lassen, vor allem in unteren Mittenbereich oder für weitere Bassignale. Daher ist eine übertriebene Wiedergabe des Bassbereichs für ein klares Klangbild unbedingt zu vermeiden, ebenso sollten nicht mehrere Quellen gleichzeitig starke Anteile in dem Bereich haben. Man spricht in dem Zusammenhang von Aufräumen im Bass.

3.3 Lokalisation

Das Gehör hat neben der Erkennung der Signalstruktur eines Klanges ganz wesentlich die Aufgabe der Lokalisation. Dazu werden verschiedene Aspekte des Schallfeldes ausgewertet.

3.3.1 Winkel zur Mittelebene

Der Winkel der Quelle bezüglich der Mittelebene wird vor allem an zwei Parametern der Ohrsignale festgemacht.

Differenz der Ankunftszeit an beiden Ohren. Das Signal kommt am zugewandten Ohr früher an. Der Umweg um den Kopf ist dabei zu berücksichtigen. Die Differenz ist maximal in der Größenordnung einer Millisekunde. Bei langsam oder gar nicht zeitlich verändertem Klang fällt dieses Merkmal bis auf eine Phasenverschiebung weg. Stationäre Klänge sind von daher verhältnismäßig schlecht und ungenau zu lokalisieren.

Pegeldifferenz und Frequenzgangsunterschied an beiden Ohren. Über die Abschattung des Kopfs kommt vor Allem der Höhenbereich am abgewandten Ohr abgeschwächt an.

Beide Effekte werden im Bassbereich immer schwächer, meist geht man davon aus, dass unter $150 - 200$ Hz keine Lokalisierung mehr möglich ist.

Beim Hören wird der Kopf laufend etwas hin- und herbewegt und die Änderungen dadurch werden beim Hören mit ausgewertet, was die Präzision der Lokalisierung erhöht. Fällt das weg wie bei ohrbezogenen Aufnahmen[1], ist die Lokalisierung speziell im wichtigen Bereich nach vorne gestört. Da die Bewegung weiter stattfindet, die damit korrelierten Änderungen aber fehlen, ergeben sich widersprüchliche Wahrnehmungen.

3.3.2 Winkel innerhalb der Symmetrieebene: vorne, hinten, oben,unten

Durch die Färbung des Schalls in der Ohrmuschel (die individuell verschieden ist) kann das Gehör bei bekannten Quellen oder Bewegung auch den Winkel nach oben oder unten bestimmen, allerdings bei weitem nicht mit der Auflösung wie beim Winkel in der horizontalen Ebene speziell nach vorne.

Die entscheidenden Frequenzbereiche wurden von Jens Blauert identifiziert und werden als richtungsbestimmende oder Blauert'sche Bänder bezeichnet.[2] Ein hoher Pegel im Bereich von 1 KHz sowie 10-15 KHz führt zu einer Lokalisierung hinten, von 8 KHz nach oben, bei ca. 400 Hz und 4 KHz nach vorne.

Zusammenfassend führt eine Absenkung bei 1 KHz und 7-15 KHz sowie Verstärkung bei 400 Hz und 4 KHz zu einer erhöhten Präsenzwahrnehmung, der Gegensatz zu einem eher diffusen Klangeindruck. Laut Sengpiel sollte zur Erzielung dieses Effekts jeweils mit Q-Faktoren von 2-4 und maximal 6 dB gearbeitet werden.

3.3.3 Entfernung

Die Entfernung wird bestimmt durch die Lautstärke bei bekannten Signalen, die Struktur von Echos früher Reflektionen, den Anteil eines möglicherweise vorhandenen Nachhalls und durch die Höhendämpfung bei großen Entfernungen (durch die z.B. aus dem Knall eines Blitzes ein Donnergrollen wird).

3.4 Wirkung auf das Unterbewusstsein

Das Gehör dient universell auch als wichtiger Sinn zur Warnung. Daher wirkt es sehr schnell und stark auf das Unterbewusstsein und die Stimmung. Kein anderer Sinn kann so schnell zu Adrenalin-Ausschüttung führen wie das Gehör beim Einbrechen eines unerwarteten extrem lauten Signals.

Positiv eingesetzt ist das einer der Gründe, warum Musik derart berühren oder aufputschen kann, insbesondere bei rhythmischem Bass.

[1] Siehe vor allem Kunstkopf, Kapitel 5.2.7, Seite 76

[2] Beschreibung siehe `http://www.sengpielaudio.com/DieBedeutungDerBlauertschenBaender.pdf`,auf [24]

4 Das Mikrofon

Das Mikrofon ist die Komponente, die den Schall auffängt und in ein Signal wandelt, das verarbeitet und/oder gespeichert werden kann.

Jede Information, die durch Beschränkungen des Mikrofons verloren geht, kann später nicht mehr zurückgewonnen werden. Daher ist es wichtig, auf seine Eigenschaften zu achten und es in geeigneter Weise einzusetzen, angefangen mit der Positionierung.

Das Ausgangssignal ist typischerweise eine elektrische Spannung oder ein digitaler Zahlenwert.

Das Kapitel definiert zunächst in Abschnitt 4.1 die Parameter, die die allgemein die Eigenschaften eines Mikrofons beschreiben, unabhängig vom jeweiligen Typ.

Die meisten Mikrofone nutzen eine Membrane, die vom Schalldruck bewegt wird. Sie kann mit einem Wandler verbunden sein, der auf ihre Position (statisch, z.B. Kondensator, Piezo oder Kohlemikrofone) oder Bewegung reagiert (dynamisch im allgemeinen Sinn, dynamisch im engen Sinn also Schwingspule, Bändchen). Die Membrane reagiert auf Druckdifferenzen. Je nach Grundkonstruktionen der Mikrofonkapsel ergibt sich ein

Druckempfänger. Eine Seite (die Rükseite) ist im einfachsten Fall geschlossen, um einen statischen Referenzdruck zur Verfügung zu stellen. Dieser theoretische Idealfall ist ungeeignet für reale Konstruktionen, da der Luftdruck sich mit dem Wetter oder unterschiedlichen Höhen allmählich ändert. Diese Variation geht über typische Schalldrücke hinaus. Daher ist die Rückseite nicht vollständig geschlossen, sondern eine Kapillaröffnung erlaubt der Rückseite, den durchschnittlichen Umgebungsdruck anzunehmen, wobei sie trotzdem vom Außenschall isoliert ist.

Gradienten- oder Druckdifferenzempfänger. Die Rückseite ist für das Schallfeld vollständig offen und die Konstruktion ist symmetrisch zur Ebene, die normal zur Achse der maximalen Empfindlichkeit steht.

Kombination von Gradienten- und Druckempfänger. Die Rückseite is teilweise offen. Die Meisten Mikrofone für Musikanwendungen gehören dieser Kategorie an.

Diese unterschiedlichen Prinzipen und Intefrenzen führen zu den verschiedenen Richtcharaktereistiken, die im Abschnitt 4.2, Seite36 beschrieben werden.

Danach folgt im Abschnitt 4.3, Seite 54 eine Übersicht der Wandlerprizipien und der verwendeten Konstruktionen. Dort werden auch Empfehlungen gegeben, welcher Typ von Mikrofon für verschiedene Aufgaben jeweils am besten geeignet ist.

4.1 Eigenschaften

Die Funktion von Mikrofonen kann durch eine Reihe wichtiger objektiver Messwerte charakterisiert werden. Diese sind wichtig für die Beurteilung der Eignung bei verschiedenen Einsatzbereichen.

4.1.1 Empfindlichkeit

Die Empfindlichkeit gibt die Ausgangsspannung für einen Schalldruck von 1 Pa an, was 94 dB entspricht. Sie kann als $Sens$ in mV angegeben werden der als G im logarithmischen Maß dBV

$$G = 20 \cdot log_{10}(Sens/1\ \mathrm{V}) \tag{4.1}$$

Da akustische Schalldruckpegel relativ zur näherungsweisen Hörschwelle 0 dB angegeben werden, ergibt der elektrische Ausgangspege L_{el} für eine Schallpegen L_{ac}, indem man die Emfindlichkeit G addiert und die 94 dB von 1 Pa abzieht

$$L_{el} = L_{ac} + G - 94\ \mathrm{dB} \tag{4.2}$$

Da Empfindlichkeit allgemein sowohl frequenz- als auch winkelabhängig ist (siehe unten), wird der Referenzwert angegeben für eine Frequenz von 1 KHz und einer ebenen Welle, die aus Richtung der maximalen Empfindlichkeit ankommt. Diese Richtung wird ab hier die *Achse* genannt.

Um so wenig relatives Rauschen vom Vorverstärker zu bekommen, wie möglich, sollte der Wert hoch sein. Typische Werte sind ca. 40 dB für Kondensatormikrofone und ca. -50 dB für dynamische Mikrofone.

Man sollte sich klar machen, das dieses nicht der wichtigste Wert eines Mikrofons ist. Seine Variation über die Frequenz oder den Eintrittswinkel sind jedoch entscheidend (siehe unten).

4.1.2 Frequenzgang

Diese Messkurve hat den größten Einfluss auf das Klangbild, das durch das Mikrofon erreicht wird. Dargestellt wird doppelt logarithmisch der Ausgangspegel in dB gegen die Frequenz bei konstantem Schalldruck, siehe Abbildung 4.1.2, Seite 30.

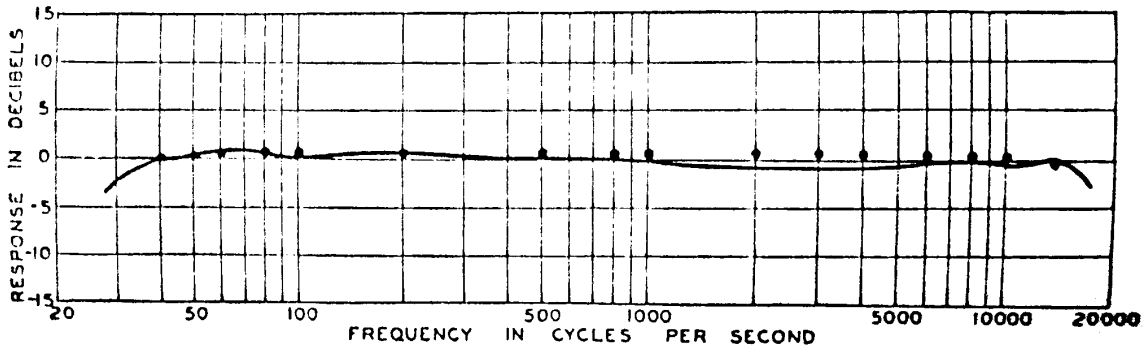


Abbildung 4.1: Beipiel eines Frequenzgangs, aus [18], Seite 253. Es handelt sich um ein Bändchenmikrofon

Wenn nur eine Kurve angegeben ist, wird dabei ein (hoffentlich) ebene Schallwelke aus der Hauptachse im freien Schallfeld gemessen. Seltener wird im 180° Winkel auch gemessen und das als zweite Kurve angegeben oder alternativ eine Kurve der Emfpindlichkeit für diffusen Schall.

Bei Richtmikrofonen ist der Frequenzgang wegen des Nahbesprechungseffekts entfernungsabhängig (genauer abhängig vom Krümmungsradius der einfallenden Wellen). In

seltenen Fällen werden für einige Abstände zusätzliche Messungen angefügt. Leider ist nicht geregelt, in welchem Abstand die Hauptkurve gemessen wurde.

Außer bei sehr kleinen (Mess-)Mikrofonen ist der Frequenzgang immer winkelabhängig. Meist werden aber keine weiteren Frequenzgänge angegeben. Man kann sie aber in begrenzter Auflösung aus dem Richtdiagramm entnehmen.

Leider geben viele – vor allem günstige –Anbieter sehr stark geglättete Kurven in ihren Prospekten an.

Die ideale Kurve ist flach (konstant) innerhab des Übertragungsbereichs.

Normalerweise sollte das Mikrofon nicht von sich aus die Klang ändern, sondern so präzise und transparent wie möglich sein. Klangänderungen im weiteren Verlauf der Verarbeitungskette durch einen Equalizer können genau wie notwendig eingebracht werden und sind nicht durch die Hardware festgelegt. Warum sollte z.B. ein bestimmter Frequenzgang optimal für *alle* Stimmen sein?

Davon abgesehen können die folgenden Abweichung von einer flachen Frequenzgangkurve unproblematisch oder gar, je nach Anwendungsfall, vorteilhaft sein:

Anstieg der Empfindlichkeit direkt vor der oberen Grenzfrequenz. Das ist nützlich bei ungerichteten Mikrofonen, um die Einschnürung der Richtcharakteristik bei den oberen Frequenzen auszugleichen, Falls der Umgebungsschall aufgenommen werden soll. Ansonsten ist der Klang zu dumpf, weil die Höhen außerhalb der Achse nicht vollständig mit aufgenommen werden. Der gleiche Effekt kann mittels Equalizer erreicht werden, dabei wird aber das Rauschen des Mikrofons in dem Bereich mit angehoben.

Anstieg der Empfindlichkeit in den oberen Mitten durch Schallreflektion. Das kann sinnvoll sein, falls diese Frequenzen ohnehin angehoben werden sollen. Allerdings kann es sein, dass der Effekt nicht an der optimalen Frequenz für den vorliegenden Fall einsetzt, und dann wäre es oft einfacher, ein neutrales Mikrofon einzusetzen und im Equalizer den gewünschten Frequenzgang einzustellen, als die möglicherweise komplexe Differenz zwischen dem Frequenzgang des Mikrofons und dem Zielfrequenzgang.

Allmählich gleichmäßig ansteigende Höhenanhebung. Das kann der Dämpfung von hohen Frequenzen in der Luft bei großen Entfernungen entgegenwirken. Auch hier kann das eine Equalizer bewirken, er hebt aber das Rauschen mit an. Der Effekt kann durch die Verwendung einer reflektierenden Kugel um ein ungerichtetes Mikrofon erreicht werden

Gleichmäßige Absenkung niedriger Frequenzen bei Richtmikrofonen. Dies kann den Nahbesprechungseffekt bei Richtmikrofonen (siehe unten) für einen gegebene Entfernung ausgleichen, wenn es typischerweise in diesem Abstand verwendet wird. Manchmal ist das am Mikrofon schaltbar. Wenn diese Absenkung direkt durch das Mikrofon erfolgt, kann es unter Umständen das Übersteuern eine Vorverstärkers vor dem ersten Equalizer oder vor einem Übertrager verhindern, vor allem bei Wind- oder Popp-Geräuschen.

4.1.3 Richtdiagramm

Das Richtdiagramm ist eine Darstellung der Winkelabhängigkeit der Empfindlichkeit meist im Polardiagramm, siehe Abbildung 4.1.3, Seite 32.

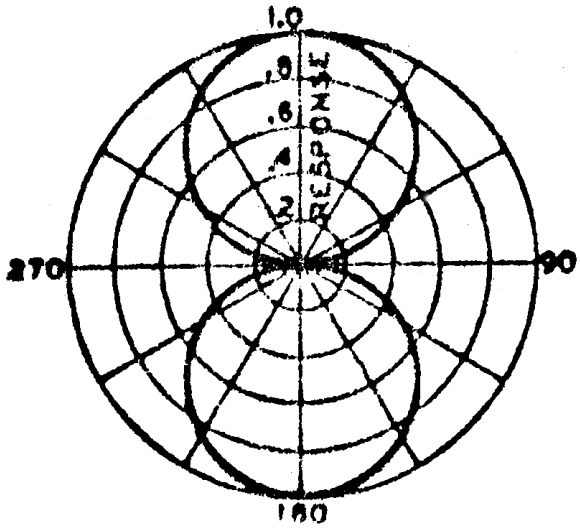


Abbildung 4.2: Beipiel eines Richtchdiagramms, aus [18], Seite 248

Wichtig ist, die Einsprechrichtung / Achse zu beachten, die im folgenden den Bezug der Winkel darstellt. Bei den meisten stabförmigen Mikrofonen ist er in der Symmetrieachse, siehe Abbildung 4.3.

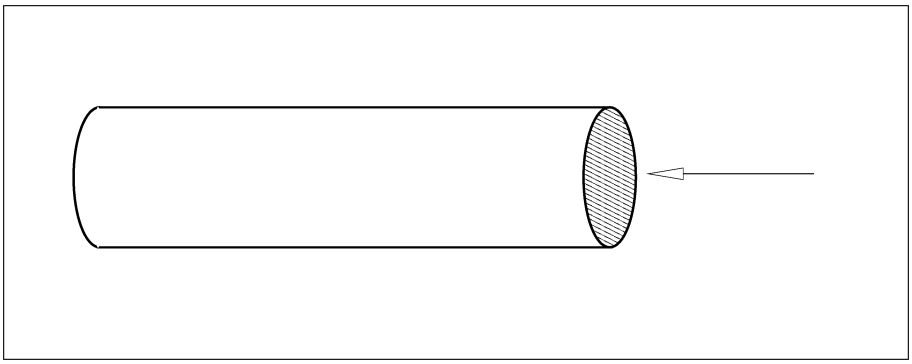


Abbildung 4.3: Frontale Einsprache bei Stabmikrofon

Bei anderen Mikrofonen dagegen, so wie bei fast allen Großmembranmikrofone liegt sie auf einer (sinnvollerweise markierten) Seite, siehe Abbildung 4.4.

Bei achtförmiger Richtcharakteristik[1] kann man nur mit seitlicher Einsprache arbeiten, weil sonst die notwendige Vorne-Hintensymmetrie nicht erreichbar ist.

Die Empfindlichkeit wird teilweise in dB angegeben, teilweise linear im Betrag. Das ist bei Vergleichen unbedingt zu beachten. Die Graphik sollte die Richtcharakteristik für viele Frequenzen enthalten, um aussagekräftig zu sein. Manchmal findet man nur eine einzige Kurve für 1 KHz, die typischerweise der nominellen Form am nächsten kommt.

Da in der Regel das Richtdiagramm frequenzabhängig ist, klingen Aufnahmen, die nicht nur eine Schallquelle festhalten, sondern auch Schallkomponenten aus verschiedenen Winkeln wie zum Beispiel einen diffusen Raumanteil, auch bei gleichem oder durch Equalizer angeglichenem Frequenzdiagramm bei verschiedenen Mikrofonen deutlich unterschiedlich.

Starke Frequenzabhängigkeit des Richtdiagramms sind vor allem problematisch bei XY-

[1] Siehe Abschnitt 4.2.2 Seite 37

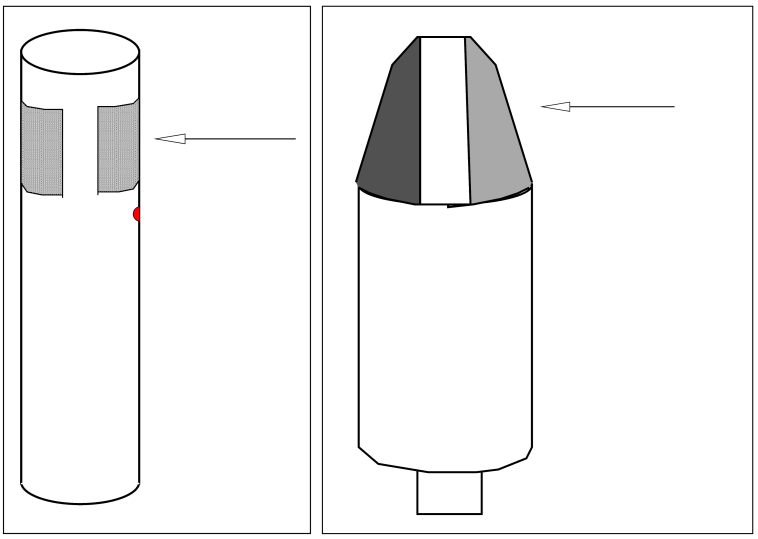


Abbildung 4.4: Seitliche Einsprache

Techniken[2], da die Lokalisiertung frequenzabhängig und damit inkonsistent wird. Ebenso kann es bei der Verwendung zur Beschallung Probleme geben, wenn die richtungsabhängige Abschwächung bei einigen Frequenzen schlechter als nominell ist, weil das die Rückkoppelungsgefahr erhöht.

Die Mikrofone werden in der Regel so hergestellt, dass sie eine Richtcharakteristik annähern, die aus den idealisierten Kugelfunktionen 0.[3] und 1. Ordnung[4] hergeleitet werden können. Siehe Kapitel 4.2, Seite 36.

4.1.4 Rauschpegel

Kein Mikrofon kann ein rauschfreies Signal erzeugen, denn schon der eigentlich statische Luftdruck ist eine Mittlung von extrem vielen durch die Wärmebewegung auftreffenden Teilchen. Zumindest dies muss auch im Mikrofonsignal auftreten.

Die Spannung dieses Rauschsignals nimmt mit der Wurzel des Durchmessers und der vierten Wurzel der Fläche zu, im Gegensatz zum Nutzsignal, dessen Spannung bei kohärenter Beschallung proportional zum Membrandurchmesser und damit der Wurzel der Fläche zunimmt (Die dazu quadratische Schallleistung ist proportional zur Fläche). Daher ist prinzipiell der beste mögliche Signal-Rauschabstand (absolut) proportional zur Wurzel des Membrandurchmessers.

Daneben gibt es bei jedem Mikrofon auch ein Wärmerauschen des Widerstandes der Impedanz. Beim Kondensatormikrofon ist dieser Widerstand stark frequenzabhängig (proportional $\frac{1}{f}$), so dass vor allem im Bassbereich ein starkes Rauschen auftritt. Die entsprechende Komponente des Rauschens ist damit Proportional zu $\frac{1}{\sqrt{f}}$. Glücklicherweise ist das Gehör bei geringen Pegeln im Bassbereich sehr unempfindlich. Bei Kondensatormikrofonen steuert auch die Schaltung des Impedanzwandlers Rauschen bei. In den Mitten und den Höhen liegt ein gut konstruiertes Kondensatormikrofon nahe am theoretischen Optimum.

[2]Siehe Kapitel 5.2.2, Seite 68
[3]Kugel, siehe Kapitel 4.2.1, Seite 36
[4]Acht, siehe Kapitel 4.2.2, Seite 37

Bei dynamischen Mikrofonen ergibt sich das thermische Rauschen des Wicklungswiderstandes. Wegen der niedrigeren Empfindlichkeit gegenüber dem Kondensatormikrofon ist es besonders wichtig, dass der Mikrofonvorverstärker möglichst rauscharm ist, ganz besonders bei Bändchenmikrofonen.

Da die Empfindlickeit des Ohres bei niedrigen Pegeln sich extrem mit der Frequenz ändert, wird das gemessene Sprektrum gefiltert (gewichtet) und danach integriert, um eine Näherung des wahrgenommenen Pegels zu erreichen.

Zwei unterschiedliche Angaben sind verbreitet.

- Eine Messung bewertet das Rauschen mit einer Kurve, die an die Empfindung bei niedrigen Pegeln angepasst wurde, die sogenannte ANSI A-Kurve. Sie senkt den Bass massiv ab, ebenso die Höhen, aber nicht so stark.

- Besser mit Erkenntnissen zur Psychoakustik verträglich ist die CCIR-bewertete Angabe. Sie bewertet impulsförmige Störungen stärker und senkt die äußeren Frequenzen nicht so stark ab. Es gibt wegen der Unterschiede im Ansatz keine Umrechnung, die Zahlen liegen aber deutlich höher als bei der A-bewerteten Kurve - typischerweise in der Größenordnung von 10 dB. Daher wird diese Angabe von Marketingabteilungen nicht favorisiert.

Um akustisch sinnvolle und vergleichbare Werte zu bekommen, ist es notewendig, den Rauschpegel mit auf akustischen Pegeln zu vergleichen. Um das zu erreichen, wird der elektrische Rauschpegel L_{el} von der logarithmischen Empfindlichkeit G abgezogen. Das Ergebnis ist das Singal-Rausch Verhältnis SNR.[5]

$$SNR = G - L_{el} \tag{4.3}$$

Um das Mikrofonrauschen mit dem Pegel von akustischen Signalen zu vergleichen, kann man den Pegel eines akustischen Rauschens berechnen, das zum gemessenen Rauschsignal führen würde, wäre das Mikrofon rauschfrei. Diesen Pegel nenn man den Äquivalenten Rauschpegel. Seinen Wert erhält man, indem man SNR von 94 dB abzieht.[6]

$$L_{eq} = 94 \text{ dB} - SNR = L_{el} - G + 94 \text{ dB} \tag{4.4}$$

Ein Beispiel:

Ein Mikrofon hat eine Empfindlichkeit von -40 dBV (10 mV/Pa). Das gemessene und gewichtete elektonische Rauschen in Stille ist -116 dBV. Das Signal-Rauschverhältnis und der äquivalente Rauschpegel ergeben sich als

$$SNR = G - L_{el} = -40 \text{ dB } - (-116 \text{ dB}) = 76 \text{ dB} \tag{4.5}$$

$$L_{eq} = L_{el} - G + 94 \text{ dB} = -116 \text{ dB} - (-40 \text{ dB}) + 94 \text{ dB} = 18 \text{ dB} \tag{4.6}$$

Ein typische Wert des A-gewichteten effektiven Rauschpegels für ein 20 mm Kondensatormikrofone ist im Bereich von 15 bis 20 dB.

Eigentlich unnötig zu sagen: Der äquivalente Rauschpegel sollte so niedrig wie möglich sein, SNR so hoch wie möglich.

[5] Vorsicht: der Dynamikbereich, den das Mikrofon abdeckt ist erheblich größer, das so ziemlich jedes Mikrofon mit Schallpegeln über 94 dB arbeiten kann. Das Signal-Rausch Verhältnis und der Dynamikbereich dürfen nicht verwechselt werden!

[6] Man vergleicht den Rauschpegel zur Hörschwelle beo 0 dB und nicht mit 1 Pa, äquivalent zu 94 dB akustisch.

4.1.5 Grenzschalldruck

Ab einem gewissen maximalen Schalldruck MPL (Maximum Pressure Level) beginnt jedes Mikrofon, zusätzliche Harmonische und Intermodulation zu generieren. Bei dynamischen Mikrofonen gibt es in der Regel keine praktische Einschränkung.

Der Auto geht davon aus, dass der hohe Grenzschalldruck von dynamischen Mikrofonen daher rührt, dass die Mechanik einer Schwingspule keine engen mechanischen Grenzen impliziert. Er erfuhr von einer Diskussion, in der ein Mitarbeiter der Firma Sennheiser angab dass einige ihrer Mikrofone Signalen mit Spitzenwerten von 200 V erzeugen kann. Wenn man beispielsweise davon ausgeht, es könnte der Typ MD421 gewesen sein mit einer Empfindlichkeit von 2 mV/Pa, dann bedeutet das, es ist in der Lage (wie linear auch immer...), 100.000 Pa, 100 dB über 94 dB zu verarbeiten. Das liegt im Bereich des normalen Luftdrucks. Wenn das so stimmt, existiert für das Modell keine praktische relevante Grenze im normalen Einsatz.

Kondensatormikrofone auf der anderen Seite benötigen einen Impedanzwandler im Mikrofon, dessen Ausgangsspannung begrenzt ist.

Moderne hochwertige Kondensatormikrofone erreichen oft Werte bis 130 dB, mit vorheriger Abschwächung zum Teil noch 10 dB mehr. Vorsicht: bei nicht benötigter Abschwächung verschlechtert sich der Rauschpegel in etwa um die Abschwächung, da das Rauschen der Verstärkerstufen gleich bleibt.

Günstige Kondensatormikrofone haben gerade in dem Bereich zum Teil ihre Probleme. Sie klirren manchmal schon bei 110 dB, was bei Nahbesprechung relativ leicht erreicht werden kann.

Es ist bei Vergleichen darauf zu achten, bei welchem Klirrfaktor der Grenzschalldruck angegeben wird, üblich sind 1% oder 3%.

Mit den Werte von $MSPL$ und SNR kann man die Dynamik eines Mikrofone DR (Dynamic Range) berechnen. Zu SNR muss die Differenz zwischen 94 dB und $MSPL$ addiert werden, weil das Mikrofon diesen Pegelbereich auch noch verarbeiten kann.

$$DR = SNR + MSPL - 94 \text{ dB} \tag{4.7}$$

Nehmen wir an, der $MSPL$ des Mikrofons, das beim Kapitel über den Rauschpegel als Beispiel gewählt wurde, sei 130 dB, dann hat es einen Dynamikbereichch DR von

$$DR = 76 \text{ dB} + 130 \text{ dB} - 94 \text{ dB} = 112 \text{ dB} \tag{4.8}$$

Der Grenzschalldruck $MSPL$ sollte so hoch wie möglich sein und mit ihm der Dynamikbereich DR.

4.1.6 Ausgangsimpedanz

Wegen der Spannungsanpassung im elektroakustischen Bereich sollte die Ausgangsimpedanz möglichst niedrig sein. Das erlaubt auch, lange Kabel zu verwenden, ohne dass deren Kapazität die hohen Frequenzen absenkt. Ebenso werden Einstreuungen im Wesentliche kurzgeschlossen.

Kondensatormikrofone bieten durch ihre Ausgangsstufe Werte bis in den Bereich um 50 Ohm.

Typische Werte für dynamisch Mikrofone bewegen sich zwischen 200 und 600 Ohm.

Hochohmige Mikrofone zur direkten Ansteuerung von Röhreneingänge sind heute nur noch Spezialfälle, z.B. zur klangformenden Wiedergabe von einer Mundharmonika über einen Gitarrenverstärker für einen typischen Blues- oder Rocksound.

4.2 Richtcharakteristiken

Im Folgenden gebe ich die Richtungsabhängigkeit jeweils auf drei Weisen an, in einem ebenen kartesischen Koordinatensystem[7], in ebenen Polarkoordinaten[8] und in dreidimensionalen Polarkoodinaten.

Alle Darstellungen sind für die Achse (oder Hautpteinfallsrichtung, 0°) auf 1 Normiert.

4.2.1 Druckempfänger - Kugelcharakteristik

Die einfachste Richtcharakteristik hat der ideale kleine Druckempfänger, sie ist richtungsunabhängig.

In der dreidimensionalen Darstellung ergibt sich eine Kugel, im Schnitt ein Kreis.

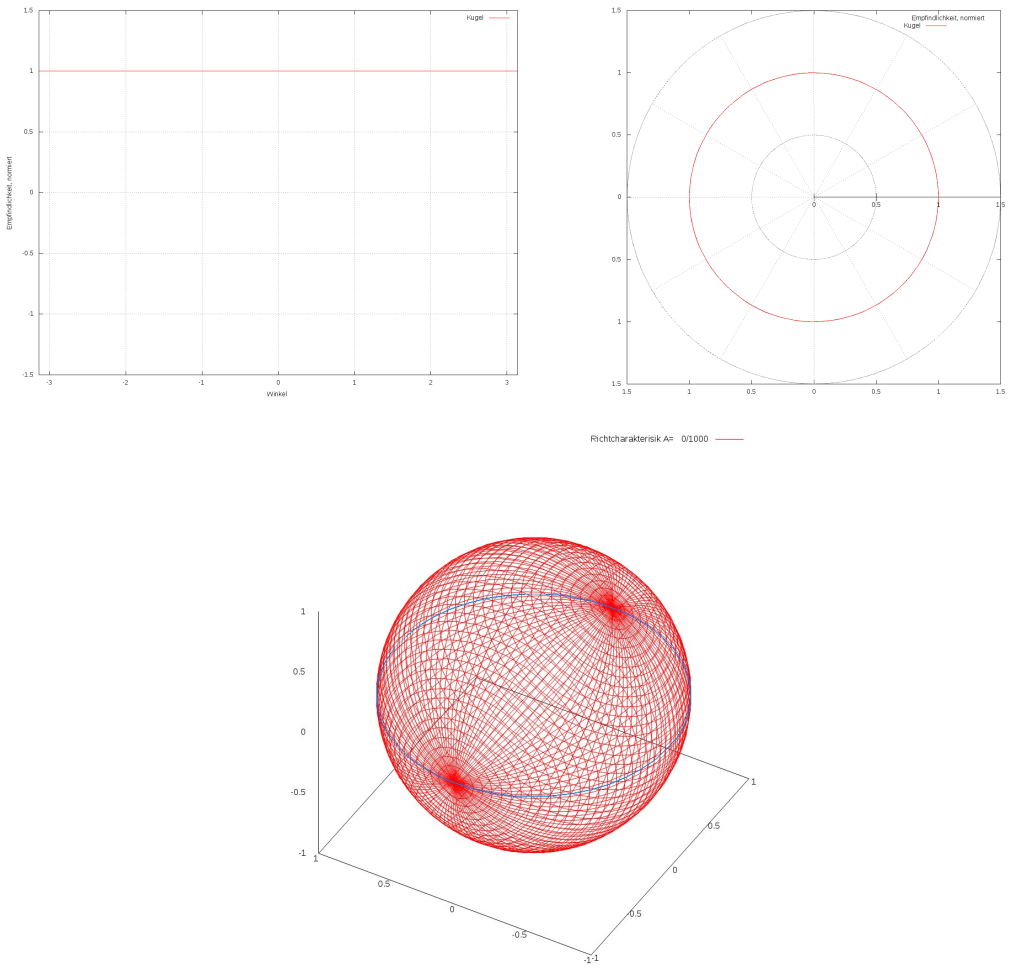


Abbildung 4.5: Kugelcharakteristik

Die Charakteristik hat auch den Vorteil, dass der Frequenzgang unabhängig von der Entfernung zur Schallquelle ist.[9]

[7] Diese Darstellung zeigt am besten die unterschiedlichen Steigungen der Empfindlichkeit über den Winkel.

[8] die häufigste Darstellung

[9] genau genommen geht es um die Krümmung der Wellenfronten, die für kleine Quellen wiederum reziprok zur Entfernung der Schallquelle ist.

Wegen der endlicher Abmessungen der Kapsel ergibt sich eine Interaktion mit dem Schallfeld, sobald sie bei zunehmenden Frequenzen in den Bereich der Wellenlänge kommen. Die hauptsächlichen Effekte sind

Reflektion: Die einfallende Welle wird bei abnehmender Wellenlänge (zunehmender Frequenz) zunehmend reflektiert. Die Membrane ist deutlich weniger nachgiebig als die Luft. Sie hat die Wirkung einer festen Wand und stoppt die Bewegung der Luft durch die Schallwelle (fast...) vollständig. Mathematisch erhält man das Verhalten, indem man vor der Membrane ein ansonsten identisches Schallfeld addiert, das sich in der umgekehrten Richtung bewegt. An der Position der Membrane hebt sich die Bewegung auf (wie gefordert) und der momentane Druck verdoppelt sich (ca +6 dB). Bei großen Wellenlängen tritt der Effekt nicht auf, da die Luft zur Seite ausweichen kann, wo sie nicht aufgehalten wird. Das ist aber nicht möglich, wenn die Phase sich wesentlich ändert, bevor die Luft den Rand der Membrane erreichen kann. Die Ausgleichsbewegung kommt dort zu spät.

Interferenz: Schallwellen, die nicht genau aus Achsenrichtung einfallen, erreichen die verschiedenen Stellen der Membrane zu verschiedenen Zeiten, da sie einen unterschiedlichen Weg zurücklegen. Dadurch sehen verschiedene Orte der Membran verschiedenen Phasen der Welle. Das Gesamtsignal ist dann ein gewichteter gleitender Durchschnitt der Wellenform. Das glättet die Welle, was die hohen Frequenzen absenkt. In der Folge weicht die Richtcharakteristik von der Kugelform ab. Sie wird enger und auch die Empfindlichkeit nach hinten nimmt ab (Schatteneffekt).

Da bei üblichen Membrangrößen von Kleinmembranmikrofonen von 20 mm die Wellenlänge bei 17 KHz erreicht wird, zeigen sich am oberen Ende des Übertragungsbreichs beide Effekte. Jetzt hat der Hersteller die Wahl.

Freifeldentzerrung: Er kann das Mikrofon so abstimmen, dass der frontale Frequenzgang so glatt wie möglich wird. Dafür fällt er in allen anderen Richtungen ab, ebenso wie der durchschnittliche Frequenzgang über alle Richtungen, der Diffusfrequenzgang.

Diffusfeldentzerrung: Er lässt den Freifeldfrequenzgang durch die Reflektion ansteigen und linearisiert den durchschnittlichen Frequenzgang über alle Richtungen.

Da das relative Verhalten zu allen Winkeln dabei unberührt bleibt, lassen sich die Abstimmungen durch einen Equalizer nachträglich ändern.

Das freifeldentzerrte Mikrofon nimmt eine davor befindliche kleine Schallquelle optimal auf, das diffusfeldentzerrte dagegen ein verteiltes Schallfeld, wie zum Beispiel den Raumhall.

4.2.2 Druckgradientenempfänger - Die „Acht", Nahbesprechungseffekt

Die systematisch erste Ordnung an Richtungsabhängigkeit nach der Theorie der Kugelfunktionen ergibt sich durch einen Empfänger, der idealerweise für den Gradienten des Drucks empfindlich ist. Wer das Wort nicht kennt: es handelt sich um die Ableitung der Druckfunktion nach einer vorgegebenen Richtung. Da diese für alle in einem Winkel α zu der Vorzugsrichtung (sagen wir: X-Achse) einlaufenden Wellen proportional zur Projektion auf diese Richtung ist, kommt ein Vorfaktor $\cos(\alpha)$ zur Empfindlichkeit dazu.

Formelmäßig ist die Empfindlichkeit damit

$$E_{\text{rel}}(\alpha) = \cos(\alpha) \tag{4.9}$$

Graphisch in einem Polarkoordinatensystem ergibt sich ein Kreis mit Radius $\frac{1}{2}$ um $(\frac{1}{2}, 0, 0)$, wobei der negative Teil graphisch mit dem positiven zusammenfällt. Wenn man aber den Betrag aufträgt, um sichtbar zu machen, dass mit umgekehrten Vorzeichen nach der negativen Seite die gleich Empfindlichkeit besteht, erhält man zwei Halbkreise um $(-\frac{1}{2}, 0, 0)$ und $(\frac{1}{2}, 0, 0)$, die berühmte Acht.

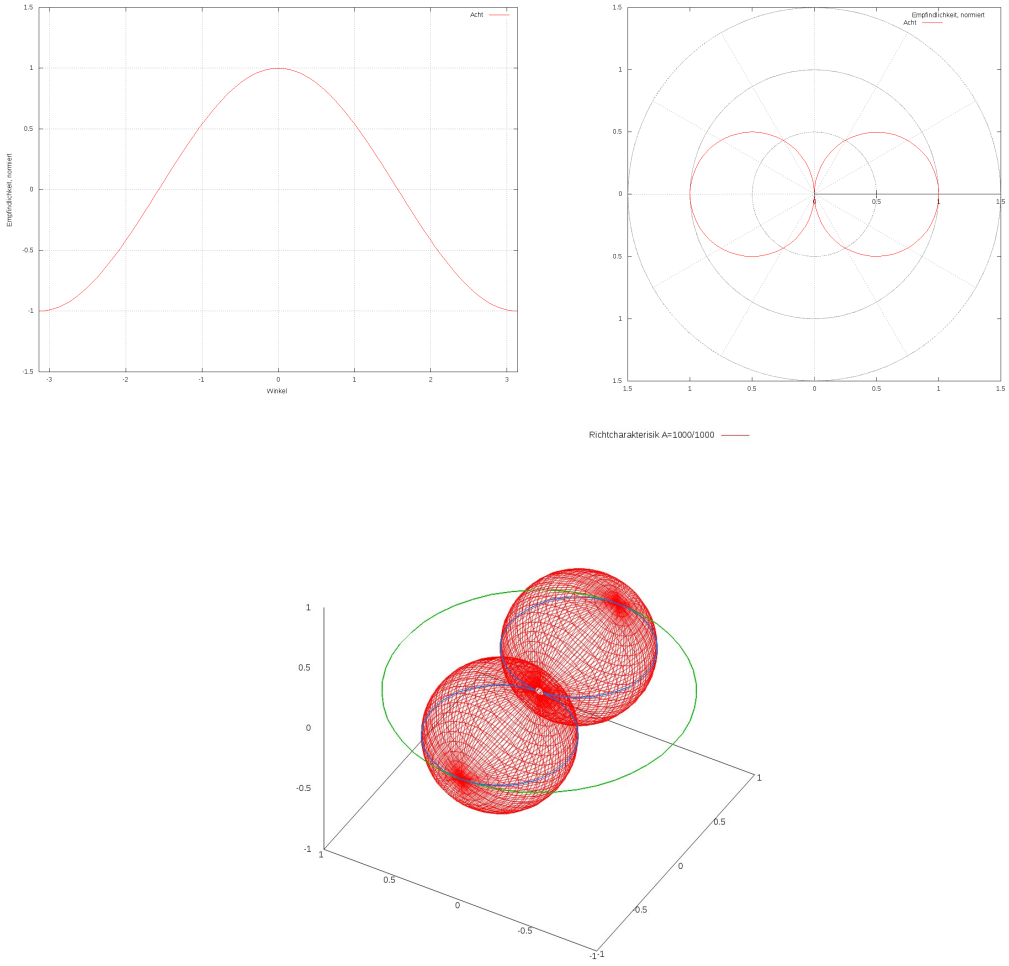


Abbildung 4.6: Achter-Charakteristik

Klanglich unvorteilhaft ist aber, dass durch die Ableitung nach dem Ort als innere Ableitung ein Faktor $\frac{2\pi}{\lambda}$ mit der Wellenlänge λ dazukommt, der bei frequenzunabhängiger Schallgeschwindigkeit c proportional zu $\frac{2\pi f}{c}$ ist. Man hätte bei einer solchen Realisierung also fast nur Höhen im Signal, der Pegelunterschied zwischen 20 KHz und 20 Hz liegt beim linearen Faktor 1000 für die Spannung, also 60 dB[10]! Zusätzlich ergibt sich durch die Ableitung eine Phasenverschiebung um 90° gegenüber dem Druckverlauf des Signals.

Beides lässt sich kompensieren, indem man der Ableitung nach dem Ort ein Integral in der Zeit gegenüberstellt. Mechanisch erreicht man das z.B., indem man bei einem

[10]Das sind nach Faustrechnung in etwa 10 Oktaven (1024 statt 1000) mit jeweils nahe 6 dB.

dynamischen Mikrofon, speziell bei Bändchenmikrofonen, die Resonanzfrequenz an das untere Ende des Übertragungsbereich setzt, also die Membran sehr locker spannt.

Bei Kondensatormikrofonen muss die Resonanz in den mittleren Übertragungsbereich gelegt werden und die Resonanz muss durch Dämpfung verbreitert werden (eine dämpfungskontrollierte Bewegung ist in dem Fall druckproportional). Man kann den Übertragungsbereich eventuell durch Resonanzen an den Rändern erweitern.

Dadurch ist jedes mit dem Gradientenempfänger arbeitende Mikrofon gegen Erschütterungen und Luftstöße um ein vielfaches empfindlicher als Druckempfänger.

Statt mit Ableitungen kann man die Effekte auch mit Differenzen auf kurzen Abständen erklären und verstehen. Das kommt der realen Situation sogar näher, denn die endliche Größe der Membran führt dazu, dass der frontal einfallende Schall die Rückseite erst nach einem Umweg zwischen 0 und dem Durchmesser (vorne Mitte bis hinten Mitte) mit der entsprechenden Verzögerung erreicht. Als Näherung gehen wir für diese Betrachtung von einem einzigen mittleren Umweg aus, die wir als ungefähr gleich dem Radius der Membran (plus Rahmen) annehmen. Zusätzlich kann die Membran in einem kurzen Rohr untergebracht sein, um die Wegedifferenz noch zu erhöhen. Dabei ist auf die Rohrresonanzen zu achten.

Bei niedrigen Frequenzen erhält man bis auf konstante Faktoren die gleichen Ergebnisse wie bei der Rechnung mit der Ableitung. Wenn bei hohen Frequenzen die Wegedifferenz jedoch in die Größenordnung des Viertels der Wellenlänge kommt, ergeben sich aber deutliche Abweichungen. Die Anhebung wegen der inneren Ableitung nimmt ab, und bei mehr als einem Viertel der Wellenlänge schwächt sich das Signal sogar ab, so dass die Konstruktion eine obere Grenzfrequenz hat, bedingt durch die Abmessungen. Dem Autor ist derzeit kein verbreitetes reines Druckgradientenmikrofon bekannt, das einen Frequenzgang über 15 KHz hinaus bietet.

Eine Herleitung des Differenzfalls findet sich bei Olson.[11] Wenn man den Druckunterschied zwischen zwei im Abstand D angebrachten kreisförmigen Membranen, also eigentlich das Verhalten eines frei in Aufnahmerichtung bewegliche Zylinders der Länge D und der Stirnfläche S mit der Frequenz f, Wellenlänge λ, Wellenzahl $k = 2\pi/\lambda$, Druckamplitude p_m, Einfallwinkel Θ betrachtet, ergibt sich für die beiden Drucke p_1, p_2 und die Differenz Δp

$$p_1 = p_m \sin\left(k\left(ct + \frac{D}{2}\cos\Theta\right)\right) \tag{4.10}$$

$$p_2 = p_m \sin\left(k\left(ct - \frac{D}{2}\cos\Theta\right)\right) \tag{4.11}$$

und daraus

$$\Delta p = p_1 - p_2 = 2p_m \cos(kct)\sin\left(\frac{kD}{2}\cos\Theta\right) = 2p_m\cos(2\pi ft)\sin\left(\frac{2\pi D}{2\lambda}\cos\Theta\right) \tag{4.12}$$

Die Kraft auf den Zylinder/die Membran f_M ergibt sich durch Multiplikation mit der Stirnfläche

$$f_M = S\Delta p = 2Sp_m\cos(2\pi ft)\sin\left(\frac{2\pi D}{2\lambda}\cos\Theta\right) = 2Sp_m\cos(2\pi ft)\sin\left(\frac{\pi f D}{c}\cos\Theta\right) \tag{4.13}$$

[11] Siehe Olson, [18], pp. 237-253

Die Geschwindigkeit v_M einer freien Masse m (oder einer Masse oberhalb der Resonanz) ergibt sich als

$$v_M = \frac{Sp_m}{m\pi f} \sin(2\pi f t) \sin\left(\frac{\pi f D}{c} \cos\Theta\right) \tag{4.14}$$

Man sieht, dass die Phase durch die Intergration wegen der Masse jetzt auch wieder der eines Druckempfängers entspricht (Sinus statt Cosinus).

Wenn man nun den Frequenzgang beim Referenzwinkel darstellen will und die ganzen Werte auf eine Anfangsamplitude von $v_M(0)$=1 normiert, ergibt sich

$$v_M/v_M(0) = \frac{\sin(\frac{\pi f D}{c})}{f} = \frac{\sin(\frac{f}{f_0})}{f} \tag{4.15}$$

mit $f_0 = \frac{c}{\pi D}$.

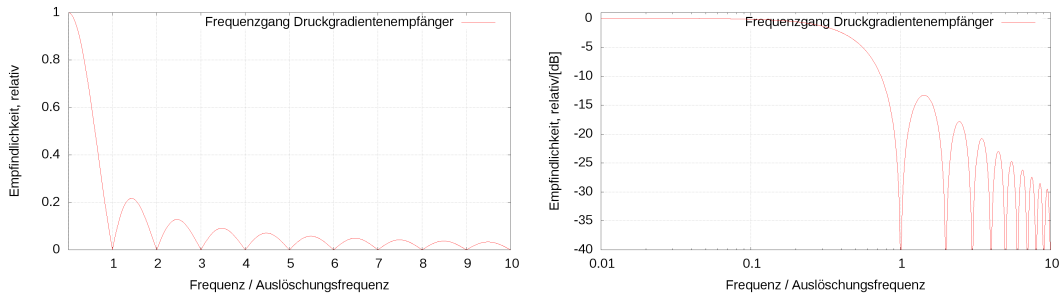


Abbildung 4.7: Frequenzgang des Gradientenempfängers, linear und logarithmisch

Die Vorgänge bei realen Druckgradientenempfängern liegen etwas anders. Statt des in Hauptrichtung ausgedehnten Zylinders gibt es eine Membran und ihre Halterung (bei Bändchenmikrofonen auch noch die Magneteinheit). Diese Konstruktion zwingt die einlaufende Welle, mit einem Umweg auf der Rückseite einzutreffen, also durchaus mit einem Wegunterschied. Die korrekte Berechnung selbst für den idealisierten Fall einer Kreisscheibe und Anregung nur in der Mitte erfordert Summen über u.a. Bessel-Funktionen.[12] Interessanterweise sind die resultierenden Kurven rein optisch praktisch nicht von denen der oben dargestellten Näherung zu unterscheiden und die Übereinstimmung mit realen Messungen ist auch brauchbar. Die erste Auslöschung erfolgt bei $R = \lambda$, also bei der dem Durchmesser entsprechenden Wellenlänge. Für 20 KHz ist das bei 17 mm, die Grenzfrequenz im Sinn von -6 dB wird ohne Druckstau, Resonanz oder einen anderen Ausgleich beim 0,6-fachen erreicht, das wären im Beispiel 12 KHz. Bei jedem Nulldurchgang dreht sich übrigens die Polarität, außerdem ändert sich die Richtwirkung bis hin zu seitlichen Doppelkeulen mit Auslöschung in der Hauptrichtung. Der Bereich ab der ersten Auslöschung ist also in der Praxis nicht sinnvoll einsetzbar.

Nahbesprechungseffekt

Bei einer nahen Schallquelle hängt die Ableitung oder Differenz des Drucks nicht nur von Phasenunterschieden ab, sondern auch von einer Abnahme des Pegels mit der Entfernung. Bei einer Quelle, die klein gegen die Wellenlänge ist und deutlich weiter entfernt als ihre Ausdehnung, so dass sich als Punktquelle gerechnet werden kann, ist der Druck im

[12] Siehe Sivian et. al.[25], zitiert nach Olson[18], p. 243

Abstand s proportional zu $1/s$.[13] Wichtig ist nun, dass dieser Anteil an der Ableitung oder Differenz nicht frequenzabhängig ist. Die Kompensation des Frequenzgangs durch zeitliche Integration ist hier nicht notwendig zur Linearisierung. Sie führt bei nahen Schallquellen zu einer Komponente, deren Frequenzgang zum Bass proportional zur Frequenz, also mit 6 dB/Oktave ansteigt. Dies ist der berüchtigte Nahbesprechungseffekt. Der Name ist eigentlich irreführend, denn der Effekt tritt nicht nur bei Besprechung auf, sondern immer im Nahfeld. Wuttke spricht auch richtiger vom Naheffekt.

Um den Effekt der Empfindlichkeitsänderung in der Nähe zu berechnen, genügt die die idealisierte Näherung durch die Ableitung statt der Differenz des Drucks. Da im betroffenen Bassbereich die Wellenlängen extrem groß gegen die Abmessungen einer typischen Mikrofonkapsel sind, gibt es keinen nennenswerten Fehler. Ein Vorteil ist auch, dass das Ergebnis universell ist, also nicht von den Abmessungen der Kapsel abhängt.

Eine Kugelwelle einer einzigen Frequenz ausgehend vom Nullpunkt hat ein Druckfeld:

$$p(r,t) = p_1 \frac{\sin(\omega(t-t_0) - kr)}{r} \tag{4.16}$$

mit Kreisfrequenz ω und Wellenvektor k, vom Betrag $\frac{2\pi}{\lambda}$ mit Wellenlänge λ und Radius r.

Der Gradientenempfänger nimmt die Ableitung auf und wir gehen davon aus, dass er in Richtung auf die Quelle ausgerichtet ist, also skalar mit r gearbeitet werden kann.

Die Ableitung nach x ergibt dann

$$p'(r,t) = p_1 \frac{-kr\cos(\omega(t-t_0) - kr) - \sin(\omega(t-t_0) - kr)}{r^2} \tag{4.17}$$

Ohne den in der Ferne verschwindenen Term ergibt sich die Empfindlichkeit, die dem Frequenzgang ohne Naheffekt entspricht, nämlich

$$p'_{\text{fern}}(r,t) = p_1 \frac{-kr\cos(\omega(t-t_0) - kr)}{r^2} \tag{4.18}$$

Das Verhältnis ist genau die Anhebung in der Nähe. Hier interessiert nur der Betrag. Da sich der sin und cos Anteil im Winkel um 90° unterscheiden, summieren sich ihre Anteile quadratisch (Satz dess Pythoagoras), also ist das Verhältnis des aufgenommenen Drucks mit und ohne Naheffekt

$$\frac{|p'|(r)}{|p'_{\text{fern}}|(r)} = \frac{\sqrt{(kr)^2+1}}{kr} = \frac{\sqrt{(\frac{2\pi r}{\lambda})^2+1}}{\frac{2\pi r}{\lambda}} \tag{4.19}$$

Damit ist der Pegelunterschied

$$\Delta L_{\text{nahAcht}} = 20\log_{10}\left(\frac{\sqrt{(kr)^2+1)}}{kr}\right) = 20\log_{10}\left(\frac{\sqrt{(\frac{2\pi r}{\lambda})^2+1}}{\frac{2\pi r}{\lambda}}\right) \tag{4.20}$$

Eine graphische Darstellung erfolgt weiter unten, Abbildung 4.8, Seite 45.

In der Praxis ist bei sehr naher Beschallung sehr schwer anzugeben, wie groß der Effekt genau ist, da bei weitem nicht alle Schallquellen der Näherung der punktförmigen Schallquelle entsprechen. Es kommt auf die Krümmung der Schallfront am Mikrofon an, was bei ausgedehnten Quellen sehr kompliziert sein kann, man bedenke zum Beispiel

[13] Die Leitung verdünnt sich auf der anteiligen Kugelfläche mit $1/s^2$, der Druck ist proportional zur Wurzel.

komplexe Schwingungsmoden ausgedehnter Membranen, z.B. bei Trommeln. Die Krümmung der Wellenfront bei einer ideal punktförmigen Quelle ist umgekehrt proportional zum Abstand. Auch der Mund ist alles andere als punktförmig, so dass bei typischen Bühnen-Gesangsmikrofonen und extremer Nahbesprechung die Größe des Effekts schlecht allgemein vorherbstimmbar ist. Die Größe der Quelle ändert sich in dem Fall auch noch je nach Stellung des Mundes. Wenn der Abstand nicht annähernd eingehalten wird, ändert sich der Frequenzgang noch dazu laufend. Dies sind alles reine Effekte des Druckgradientenempfängers, die bei Druckempfängern nicht auftreten. Bei extremer Nahbesprechung sollte daher im Einzelfall genau geprüft werden, ob man mit einem Druckempfänger nicht besser fährt (z.B. bei Nackenbügelmikrofonen in unmittelbarer Nähe des Mundwinkels).

Den Nahbesprechungseffekt bei der Mischung nicht zu kompensieren und eventuell den extrem basslastigen Klang, den das ergibt noch zu schätzen, gehört zu den häufigsten und schwersten Fehlern (hauptsächlich, aber nicht nur von Anfängern) im Bereich der Tontechnik. Wenn es mehrere Quellen gibt, führt er zu massiven Verdeckungseffekten und verhindert im Ansatz jede Chance für einen transparenten Gesamtklang.

Man sollte den Effekt beachten, aber nicht verteufeln. Er bietet eine interessante Möglichkeit zur Ausblendung von Störgeräuschen, die Basslastig sind (Maschinen, etc.). Die werden nicht nur von der Richtcharakteristik abgeschwächt, sondern bei einer Kompensation des Nahbesprechungseffekts durch Bassabsenkung vermindert, ohne dass der Bass beim Nutzsignal fehlt.

Bei extremer Nahbesprechung (diesmal im Wortsinn) und bei Wind zeigen diese Mikrofone noch einen anderen extrem störenden Effekt. Durch Luftverwirbelung und bei Verschlusslauten mit ihren Luftstößen bilden sich kurzfristige turbulente Wirbel direkt an der Membran. Diese erzeugen Druckstöße bei minimalem Abstand und nur auf einer Seite der Membran. Diese führen zu extrem hochpegeligen und tieffrequenten Störungen, die kaum noch aus dem Signal zu filtern sind. Sie können leicht Übertrager oder auch Eingangsstufen übersteuern, bevor irgend eine Klangformungsstufe etwas korrigieren kann. Daher ist der Einsatz eines Windschutzes in solchen Fällen absolut zwingend. Die typischen Bühnengesangsmikrofone haben einen solchen Schutz durch Schaumnetz oder verschachtelte Metallgitter fest eingebaut. Das kann die Höhenwiedergabe beeinträchtigen. Wichtig ist, dass der Schutz nicht zu klein (also dünn) ist, sonst sind die verbleibenden Verwirbelungen immer noch zu nahe an der Membran und werden durch den Nahbesprechungseffekt verstärkt. Ein guter Windschutz ist daher relativ groß und im Idealfall in direkter Nähe der Kapsel hohl, um einen Druckausgleich zu ermöglichen.[14] Bändchenmikrofone ohne Schutz können durch einen Druckstoß zerstört werden.

Die wenigsten Druckgradientenempfänger setzen die unterste Grenzfrequenz an das technisch machbare Limit. Mikrofone, die speziell für extrem nahe Beschallung ausgelegt sind (vor Allem Bühnengesangsmikrofone) schneiden oft schon weit über 100 Hz ab, um den Nahbesprechungseffekt im Rahmen zu halten, mechanisch robuster zu sein und um die Popp-Neigung erträglich zu machen. Druckgradientenempfänger, die bis unter 50 Hz im Freifeld einen linearen Frequenzgang haben, sind die Ausnahme.

Beachtenswert ist, dass der Frequenzgang bei Druckgradientenempfängern überhaupt abstandsabhängig ist. Eigentlich sollte man mehrere Frequenzgänge bei verschiedenen Entfernungen kennen oder zumindest die Entfernung, bei der die eine angegebene Kurve gemessen wurde. Beides ist fast nie der Fall.

Beim reinen Druckgradientenempfänger spielt die Interferenz durch seitlichen Einfall eine geringere Rolle als bei anderen Charakteristiken, da Schall aus der Richtung zu-

[14] Mikrofonaufsätze, [36]

nehmend allgemein ausgeblendet wird. In der graphischen Darstellung wird zu hohen Frequenzen aus den Kugeln vor Allem eine schmalere Funktion.

Wenn man diesen Mikrofontyp zur Ausblendung von Störquellen einsetzt, ist zu beachten, dass die Auslöschung nur einen sehr schmalen Winkelbereich betrifft. Wie man bei einer (unüblichen) linearen Abbildung der Richtcharakteristik sehen kann, liegt die Auslöschung in dem Bereich der höchsten Steigung, so dass schon bei kleinen Winkelabweichungen Signalanteile mit aufgenommen werden, die nicht vernachlässigbar sind. Man muss also sehr genau ausrichten und Mikrofon und Quelle fixieren.

Der reine Druckgradientenempfänger wird relativ selten eingesetzt, sein Verständnis ist aber Voraussetzung, um die Eigenschaften der anderen verbreiteten Richtcharakteristiken einschätzen zu können. Hauptanwendungen sind die Blumlein-Anordnung[15] und MS-Technik[16].

Die gemittelte Empfindlichkeit für ein gerichtetes Mikrofon bei Diffusschall kann mit der des frontal einfallenden ebenen Schallfeldes gleichen Pegels verglichen werden. Letzeres wird zu eins normiert. Dann wird das Quadrat der jeweiligen relativen (Spannungs-) Empfindlichkeit über alle Raumwinkel itegriert und durch den Gesamtraumwinkel 4π geteilt. Im englischen Sprachgebrauch wird die Größe REE genannt, Random Energy Efficiency.

$$REE = \frac{1}{4\pi}\int_0^{\pi} E_{\text{rel}}^2(\alpha)\sin(\alpha)\int_0^{2\pi}\,\mathrm{d}\theta\,\mathrm{d}\alpha = \frac{1}{4\pi}\int_0^{\pi} E_{\text{rel}}^2(\alpha)\sin(\alpha)2\pi\,\mathrm{d}\alpha \tag{4.21}$$

also

$$REE = \frac{1}{2}\int_0^{\pi} E_{\text{rel}}^2(\alpha)\sin(\alpha)\,\mathrm{d}\alpha \tag{4.22}$$

Im deutschen Sprachraum wird normalerweise der Kehrwert angegeben, der Richtfaktor γ.

$$\gamma = \frac{1}{REE} \tag{4.23}$$

Dessen Wurzel hat eine wichtige praktische Bedeutung. In einer Mischung aus Direkt- und Diffusschall kann das Richtmikrofon um diesen Faktor weiter weg sein als ein Kugelmikrofon bei gleichem Verhältnis von direkten zu diffusem Signal im Ausgang. Daher bezeichnet man den Wert als Distanzfaktor DSF.

$$DSF = \sqrt{\gamma} \tag{4.24}$$

Für den Druckgradientenempfänger ergibt sich

$$REE_{\text{acht}} = \frac{1}{2}\int_0^{\pi}\cos^2(\alpha)\sin(\alpha)\,\mathrm{d}\alpha \tag{4.25}$$

$$= \frac{1}{2}\int_0^{\pi}(\frac{1}{2}+\frac{1}{2}\cos(2\alpha))\sin(\alpha)\,\mathrm{d}\alpha \tag{4.26}$$

$$= \frac{1}{2}\int_0^{\pi}\frac{1}{2}\sin(\alpha)\,\mathrm{d}\alpha + \frac{1}{2}\int_0^{\pi}\cos(2\alpha))\sin(\alpha)\,\mathrm{d}\alpha \tag{4.27}$$

[15] Siehe Kapitel 5.2.2, Seite 68
[16] Siehe Kapitel 5.2.2, Seite 71

$$= \frac{1}{2} + \frac{1}{2}\int_0^{\pi}(-\frac{1}{2})\sin(\alpha) + \frac{1}{2}\sin(3\alpha)\,\mathrm{d}\alpha \tag{4.28}$$

$$= \frac{1}{2} - \frac{1}{4}\int_0^{\pi}\sin(\alpha)\,\mathrm{d}\alpha + \int_0^{\pi}\frac{1}{2}\sin(3\alpha)\,\mathrm{d}\alpha \tag{4.29}$$

$$= \frac{1}{2} - \frac{1}{2} + \frac{1}{3} \tag{4.30}$$

$$REE_{\text{acht}} = \frac{1}{3} \tag{4.31}$$

Das Bedeutet, $\gamma_{\text{acht}} = 3$ und der Distanzfaktor DSF eines Mikrofons mit reiner Druckgradientencharakteristik ist $\sqrt{3}$, etwa 1.73.

4.2.3 Kombinationen - Niere, Superniere, Hyperniere, breite Niere

Mit den verschiedenen Richtcharakteristiken lässt sich rechnen, genau genommen addieren und subtrahieren. Das kann zunächst ganz real durch Verwendung zweier Mikrofone am für die Anwendung ausreichend genau gleichen Ort geschehen. Diese Näherung erreicht man bei Schallquellen in einer Ebene, indem man zwei Kapseln in der Richtung senkrecht dazu (genau genommen in der Normalen) direkt übereinander anbringt. Damit haben beide Kapseln zu den Schallquellen die gleiche Entfernung und damit Phasenbeziehung. Nun kann man die Spannungen addieren, am einfachsten und flexibelsten bei der Mischung. Polt man eine Kapsel um, subtrahiert man die Signale. Wenn dann noch die Pegel variiert werden, erreicht man alle gewichteten Summen und Differenzen, mathematisch gesprochen alle Linearkombinationen. Mit der Technik lassen sich nachträglich die Charakteristiken an die Notwendigkeiten bei der Mischung anpassen, man nennt das Matritzierung.

Alle klassischen Richtcharakteristiken, die ohne gezielte Interferenzeffekte auskommen, lassen sich als Linearkombination der Kugel- und Achtcharakteristik herstellen. Die resultierende Richtcharakteristik ergibt sich durch den Parameter A, der zwischen 0 und 1 liegen kann zu

$$E_{\text{rel}}(\alpha) = (1 - A) + A\cos(\alpha) \tag{4.32}$$

Allen diesen Charakteristiken ist aber eines gemeinsam: Da die Acht bei 90° eine Auslöschung hat, wirkt in dem Winkel immer nur der Kugelanteil. Es gibt in dem Winkel keinen Nahbesprechungseffekt, und der relative Pegel entspricht genau dem der Kugel-Komponente, im Fall der Niere z.B. genau 0.5 oder -6 dB. Bei praktischer Anwendung ist aber zu beachten, dass der Frequenzgang in dem Winkel meist alles andere als optimal ist, vor allem in den Höhen.

Ein Mikrofon mit einer einzigen Kapsel und meist einer festen Richtcharakteristik aus dem genannten Bereich erreicht das Ergebnis, indem eine Membran auf der Einfallsseite offen gelassen wird und die andere Seite teilweise verschlossen wird. Dies geschieht durch kleine Bohrungen in einer Kammer sowie Laufzeit- und Dämpfungsglieder. Sie werden darauf optimiert, die gewünschte Charakteristik so genau wie möglich und meist auch so frequenzunabhängig wie möglich einzustellen.

Der Anteil der Acht-Charakterisitik zeigt auch in den Kombinationen den Nahbesprechungseffekt entsprechend seinem Anteil an der Gesamtcharakteristik. Das hat auch zur Folge, dass bei nahen Schallquellen die Richtcharakteristik im Bassbereich immer mehr

zur Acht-Form verschoben wird. Beispielsweise nimmt auch die ideale Niere Bassanteile aus der Nähe von hinten auf, weil die Auslöschung in der Richtung nicht mehr gegeben ist.

Hier kommt die Gleichung für den allgemeinen Fall des Nahbesprechugseffekts.

$$\Delta L_{\text{nah}}(A) = 20\log_{10}\left(1 - A + A\frac{\sqrt{(kr)^2+1}}{kr}\right) = 20\log_{10}\left(1 - A + A\frac{\sqrt{(\frac{2\pi r}{\lambda})^2+1}}{\frac{2\pi r}{\lambda}}\right) \tag{4.33}$$

In Abbildung 4.8 ist das für die Acht und den häufigsten Fall der Niere (s.u., A=0.5) aufgetragen.

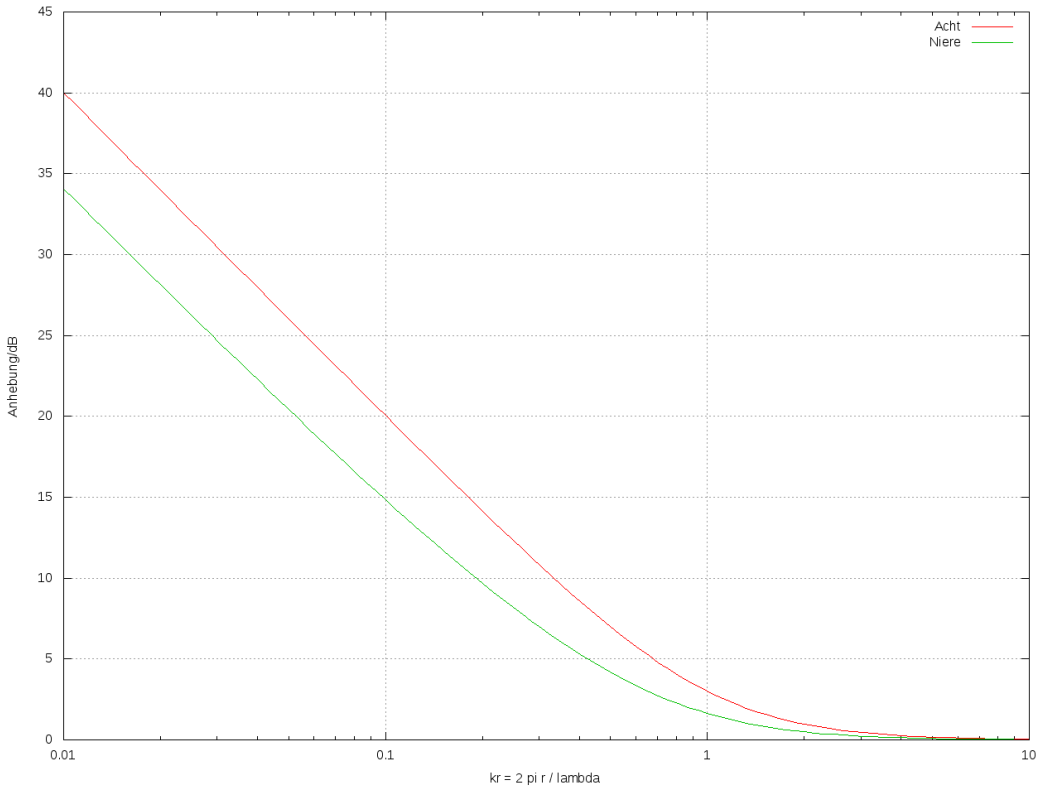


Abbildung 4.8: Nahbesprechungseffekt

Für einen Abstand von 5.4 cm sind die kr Werte mit 1000 zu multiplizieren, um die zugehörige Freqenz in Hz zu erhalten, bei 10,8 cm mit 500, bei 54 cm mit 100, etc.

Anders herum: Um von dem etwas unhandlichen Faktor kr für praxisrelevante Frequenzen auf Abstände umzurechnen, hier eine Tabelle für den Abstand r in cm.

	0,01	0,02	0,05	0,1	0,2	0,5	1	2	5	kr
20 Hz	2,706	5,411	13,53	27,06	54,11	135,3	270,6	541,1	1353	
50 Hz	1,082	2,164	5,411	10,82	21,64	54,11	108,2	216,4	541,1	
100 Hz	0,5411	1,082	2,706	5.411	10,82	27,06	54,11	108,2	270,5	
150 Hz	0,361	0,722	1,81	3,61	7,22	18,1	36,1	72,2	181	
200 Hz	0,2706	0,5411	1,353	2,706	5,411	13,53	27,06	54,11	135,3	

Mit dem Betrag von A ändert sich auch der Wert von REE, γ und entsprechend DFS.

$$REE(A) = \frac{1}{2}\int_0^{\pi}((1 - A + A\cos(\alpha))^2 \sin(\alpha)\,\mathrm{d}\alpha \tag{4.34}$$

$$= \frac{1}{2}\int_0^{\pi}((1 - A)^2 + 2(1 - A)A\cos(\alpha) + A^2\cos^2(\alpha))\sin(\alpha)\,\mathrm{d}\alpha \tag{4.35}$$

$$= \frac{1}{2}\int_0^{\pi}((1 - A)^2 + 2(1 - A)A\cos(\alpha) + A^2 - A^2\cos^2(\alpha))\sin(\alpha)\,\mathrm{d}\alpha \tag{4.36}$$

$$= \frac{1}{2}\int_0^{\pi}((1 - A)^2 + A^2 + 2(1 - A)\cos(\alpha) + A^2\cos^2(\alpha))\sin(\alpha)\,\mathrm{d}\alpha \tag{4.37}$$

$$= \frac{1}{2}\int_0^{\pi}(1 - 2A + A^2 + A^2 + 2(1 - A)\cos(\alpha) + A^2\cos^2(\alpha))\sin(\alpha)\,\mathrm{d}\alpha \tag{4.38}$$

$$= \frac{1}{2}(1 - 2A + 2A^2)\int_0^{\pi}\sin(\alpha)\,\mathrm{d}\alpha + (1 - A)\int_0^{\pi}\cos(\alpha)\sin(\alpha)\,\mathrm{d}\alpha + \frac{A^2}{2}\int_0^{\pi}\cos^2(\alpha)\sin(\alpha)\,\mathrm{d}\alpha \tag{4.39}$$

$$= \frac{1}{2}(1-2A+2A^2)\int_0^{\pi}\sin(\alpha)\,\mathrm{d}\alpha+(1-A)\int_0^{\pi}\cos(\alpha)\sin(\alpha)\,\mathrm{d}\alpha+\frac{A^2}{2}\int_0^{\pi}\sin(\alpha)\,\mathrm{d}\alpha-\frac{A^2}{2}\int_0^{\pi}\sin^3(\alpha)\,\mathrm{d}\alpha \tag{4.40}$$

$$= 1 - 2A + 2A^2 - A^2 + A^2 \cdot \frac{1}{3} \tag{4.41}$$

$$REE = \frac{4}{3}A^2 - 2A + 1 \tag{4.42}$$

$$\gamma = \frac{1}{\frac{4}{3}A^2 - 2A + 1} \tag{4.43}$$

$$DSF = \frac{1}{\sqrt{\frac{4}{3}A^2 - 2A + 1}} \tag{4.44}$$

Hier kommt der Verlauf der Werte in Abhängigkeit des Parameters A als Plot. Die nachfolgend besprochenen gängigsten Richtcharakteristiken sind markiert.[17]

Wie weiter oben diskutiert, reicht der Frequenzgang von Mikrofonen mit achtförmiger Charakteristik bei üblichen Kapseldurchmessern nur bis etwa 15 KHz. Die Kombinierten Richtcharakteristiken haben einen Vorteil, sie können die Grenzfrequenz nutzen, um einen Übergang zu Kugelcharakteristik für hohe Frequenzen zu erreichen, bei denen eine Richtwirkung durch Interferenz gegeben ist. Die Grenzfrequenz und der Betrag des Gradientenanteils können durch Wahl des Schallwegs zur Membranrückseite gewählt werden. Wenn diese Länge vergrößert wird, ist die Pfaddifferenz und damit die Druckdifferenz und

[17] Einen umfassenden Überblick zu allen die Richtcharakteristik betreffenden Daten wie Vorwärts-Rückwärtsverhältnis etc. findet sich bei
`http://www.sengpielaudio.com/TheoretischeMikrofondaten.pdf`.
Die Definitionen der genannten Daten finden sich in
`http://www.sengpielaudio.com/ErklaerungZuMikrofondaten.pdf`.
Die Gleichungen zu den Graphiken und mehr findet sich bei
`http://www.sengpielaudio.com/FormelnZumPolardiagramm.pdf`, alles auf [24]

der Pegel des Gradientenanteil höher. Gleichzeitig führt das zu einer niedrigeren Grenzfrequenz dieses Anteils. Es ist darauf zu achten, dass diese Grenzfrequenz nicht zu niedrig ist, ansonsten wird darüber der Schall von hinten nicht so stark unterdrückt, wir es der nominellen Richtcharakteristik entspricht, denn das Mikrofon hat dort im Wesentlichen eine volle Kugelcharakteristik. Das führt zu einer massiven Verfärbung ungerichteter Signale und ein solches Mikrofon ist für Beschallungszwecke völlig ungeeignet, denn dies ist ein sicheres Rezept, die maximal erreichbare Verstärkung vor dem Einsetzen von sich aufschaukelnder Rückoppelung in diesem Übergangsbereich.

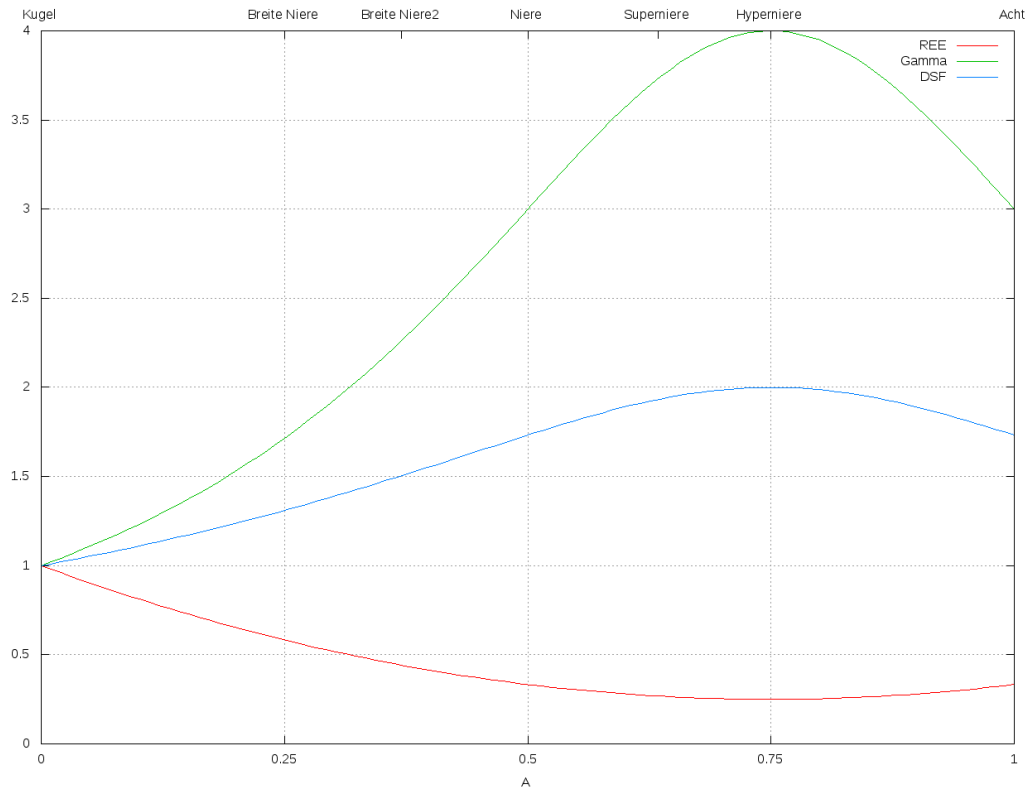


Abbildung 4.9: REF, Gamma und DSF in Abhängigkeit des Parameters A

Die Niere ergibt sich, indem die Kugel- und Achtcharakteristik gleich stark gewichtet werden. Die Gleichung für die Empfindlichkeit in Abhängigkeit vom Winkel lautet als

$$E_{\text{rel}}(\alpha) = 0.5 + 0.5\cos(\alpha) \tag{4.45}$$

Diese Richtcharakteristik löscht den Schall aus 180° aus. Da in dem Bereich das flache Minimum der beteiligten Cosinus-Funktion liegt, ist die Auslöschung verhältnismäßig breit.

Der Distanzfaktor ist wie bei der Acht $\sqrt{3}$, also ca. 1,73.

Die meisten Mikrofone für Studio und Bühne werden fest mit dieser Richtcharakteristik hergestellt.

Die Superniere optimiert das Vorne-Hintenverhältnis der Empfindlichkeit. Die Niere hat ein breites Minimum, aber nur für einen einzigen Winkel in der Rotationsrichtung um die Mikrofonachse. Wenn man den Anteil der Achtcharakteristik erhöht, erfolgt die

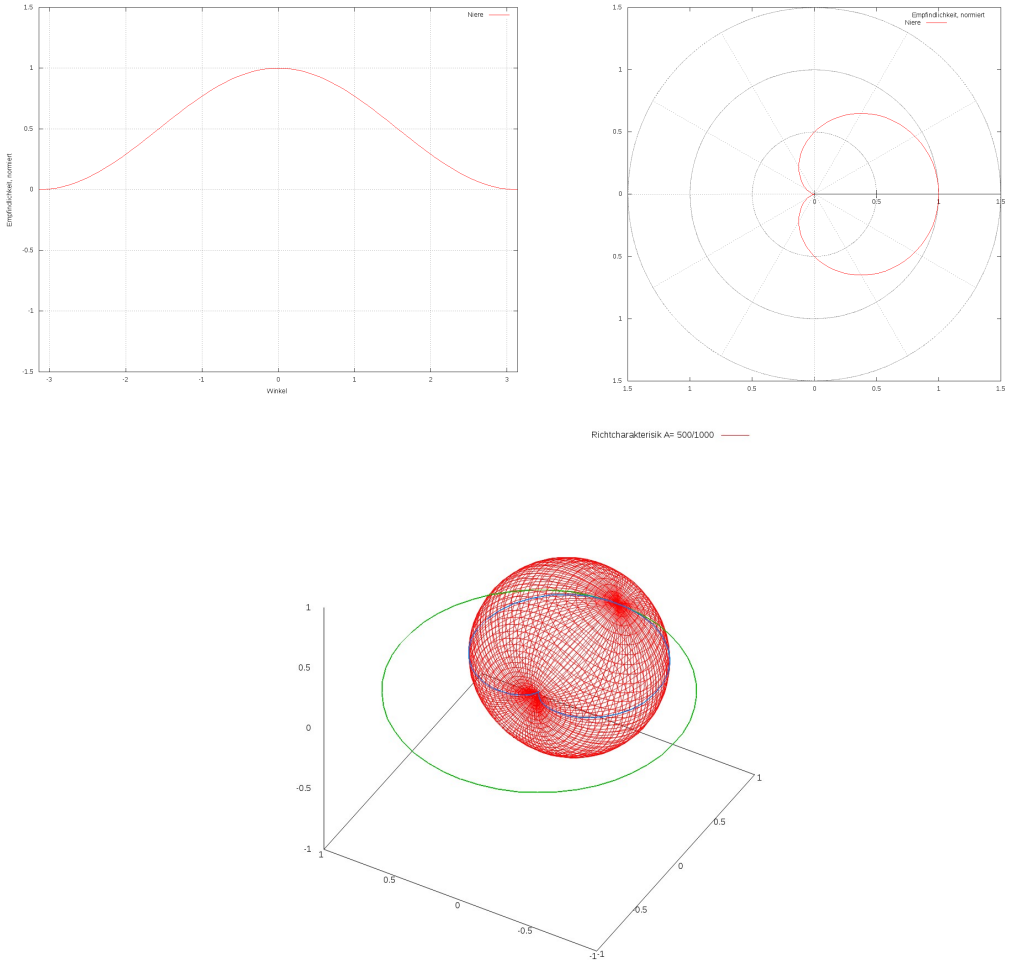


Abbildung 4.10: Niere

Auslöschung in einem Kegel hinter dem Mikrofon, dafür in einem engeren Winkelbereich des Winkels zur Hauptrichtung. Das muss man sich geometrisch in etwa so vorstellen wie in Abbildung 4.11.

Die maximale Unterdrückung von Schall von der Rückseite gegenüber der Vorderseite ergibt sich beim ziemlich krummen Wert von ca.

$$E_{\text{rel}}(\alpha) = 0.366025 + 0.633975\cos(\alpha) \tag{4.46}$$

Die Auslöschung erfolgt bei ca. 120°.

Man beachte, dass nun ein relativ schmaler Bereich um 180° ein kleineres Maximum bildet. Wie bei der Achter-Charakteristik wird der Schall aus der Richtung mit umgekehrter Polarität aufgenommen.

Der Distanzfaktor ist ca. 1,93.

Die Hyperniere optimiert die Auslöschung des ungerichtet einfallenden Schalls gegenüber dem aus der Hauptrichtung. Dazu ist der Anteil der Achter-Charakteristik noch einmal erhöht.

$$E_{\text{rel}}(\alpha) = 0.25 + 0.75\cos(\alpha) \tag{4.47}$$

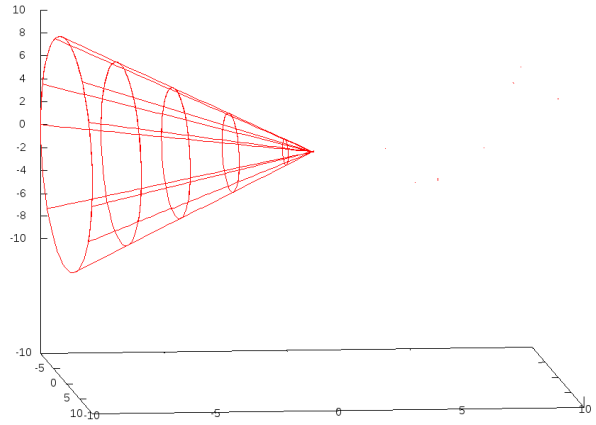


Abbildung 4.11: Winkel der Auslöschung bei der Superniere im Raum

Die Auslöschung erfolgt ziemlich genau bei $109,5°$.

Der hintere Bereich, in dem ein Nebenmaximum der Empfindlichkeit vorliegt ist hier noch einmal breiter und empfindlicher als bei der Superniere, deswegen ist das Vorwärts-Rückwärtsverhältnis auch geringer.

Der Distanzfaktor ist 2, das Maximum des Erreichbaren für alle Kombinationen aus Druck- und Druckgradientenempfängern.

Die Breite Niere liegt zwischen der Niere und der Kugel. Sie hat gegenüber den bisher vorgestellten Richtcharakteristiken die Nachteile und Probleme der Gradientenempfänger in abgeschwächter Form. Es gibt einige Modelle, bei denen es gelang, die Änderung der Charakteristik durch Interferenzeffekte in den extremen Höhen trotz eines Durchmessers von ca. 20 mm fast ganz zu vermeiden. Diese Charakteristik schwächt die rückwärtige Richtung ab, löscht aber keine Richtung komplett aus.

Genau zwischen Niere und Kugel wäre die Charakteristik mit der Gleichung

$$E_{\text{rel}}(\alpha) = 0.75 + 0.25\cos(\alpha) \tag{4.48}$$

In der Praxis geht man aber näher an die Niere mit

$$E_{\text{rel}}(\alpha) = 0.63 + 0.37\cos(\alpha) \tag{4.49}$$

Der Distanzfaktor liegt immerhin bei ca. 1,5.

Vergleich. In Abbildung 4.15 folgen zum Vergleich noch einmal alle Charakteristiken sowohl kartesisch als auch polar in jeweils einer Graphik.

Es gibt auch die passende 3D Darstellung als Video[41]. Ohne zeitliche Abfolge ist das zu unübersichtlich.

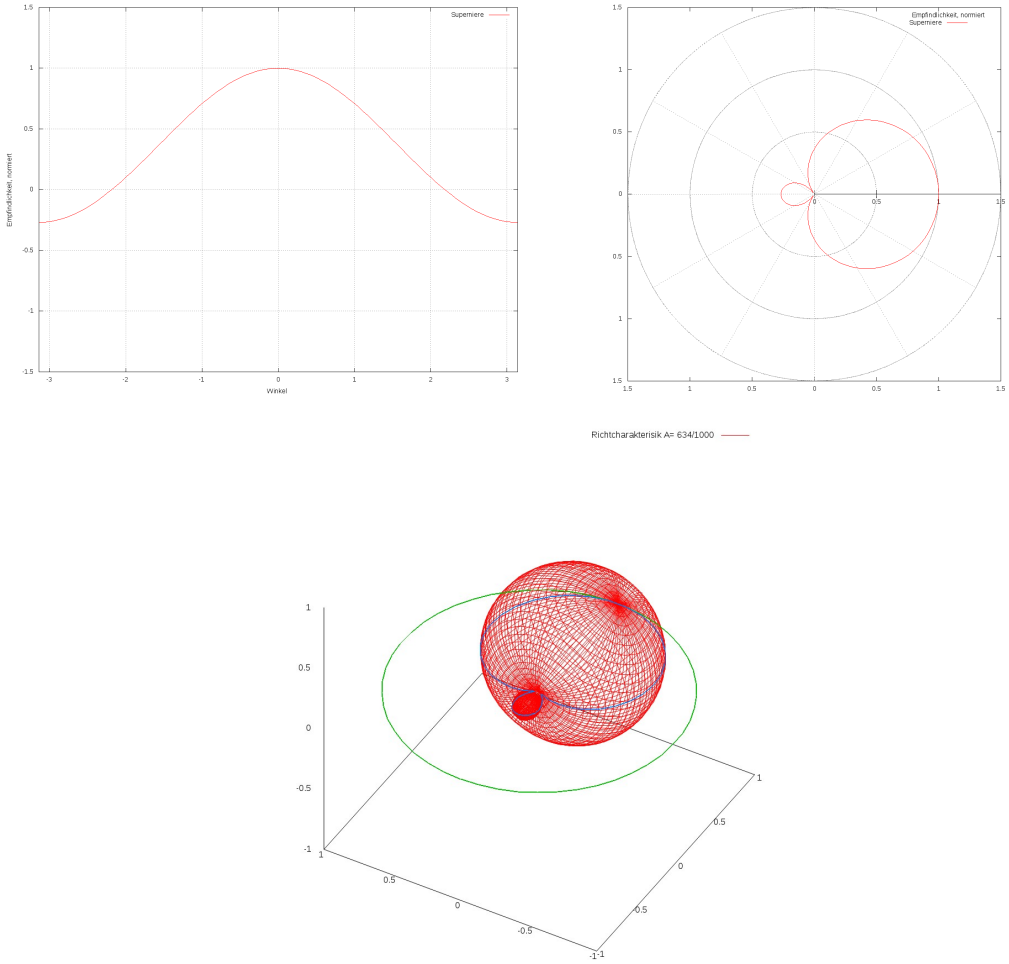


Abbildung 4.12: Superniere

Eine Variable Richtcharakteristik, mechanisch lässt sich durch Öffnen und Schließen von Ventilen erreichen. Die Anforderungen an diese Mechanik sind sehr hoch. Daher wird das Verfahren selten angewendet. Vorteilhaft ist, dass wie bei den festen Richtcharakteristiken wirklich eine Kapsel verwendet wird, was die Rotationssymmetrie erhält und die sonst unvermeidlichen Interferenz-Komplikationen vermeidet[18].

Eine Variable Richtcharakteristik, elektronisch ergibt sich durch mehrere Kapseln oder zumindest Membranen. In der Regel verwendet man zwei Nierenkapseln, die gegeneinander gerichtet sind.

Man kann den Effekt selbst erreichen, indem man zwei Nierenmikrofone übereinander montiert und die Richtcharakteristik bei der gleichpegeligen Mischung mit gedrehter Polarität der Kapsel in Richtung 180° einstellt.

Bei den meisten entsprechenden Konstruktionen wird eine Kapsel verwendet, die zwei Membranen sehr nahe parallel verbaut mit einer dämpfenden Zwischenwand. Diese gibt jeder Membran einzeln eine Nierencharakteristik. Durch die unvollkommene Trennung der beiden rückwärtigen Kammern neigen diese Konstruktionen dazu, dass die einzelne

[18] Schoeps stellt eine zwischen Kugel und Niere umschaltbare Kapsel für das Colette-System mit der MK5 her. Die Kapsel MK6 bietet bei seitlicher Einsprache auch noch eine achtförmige Charakteristik

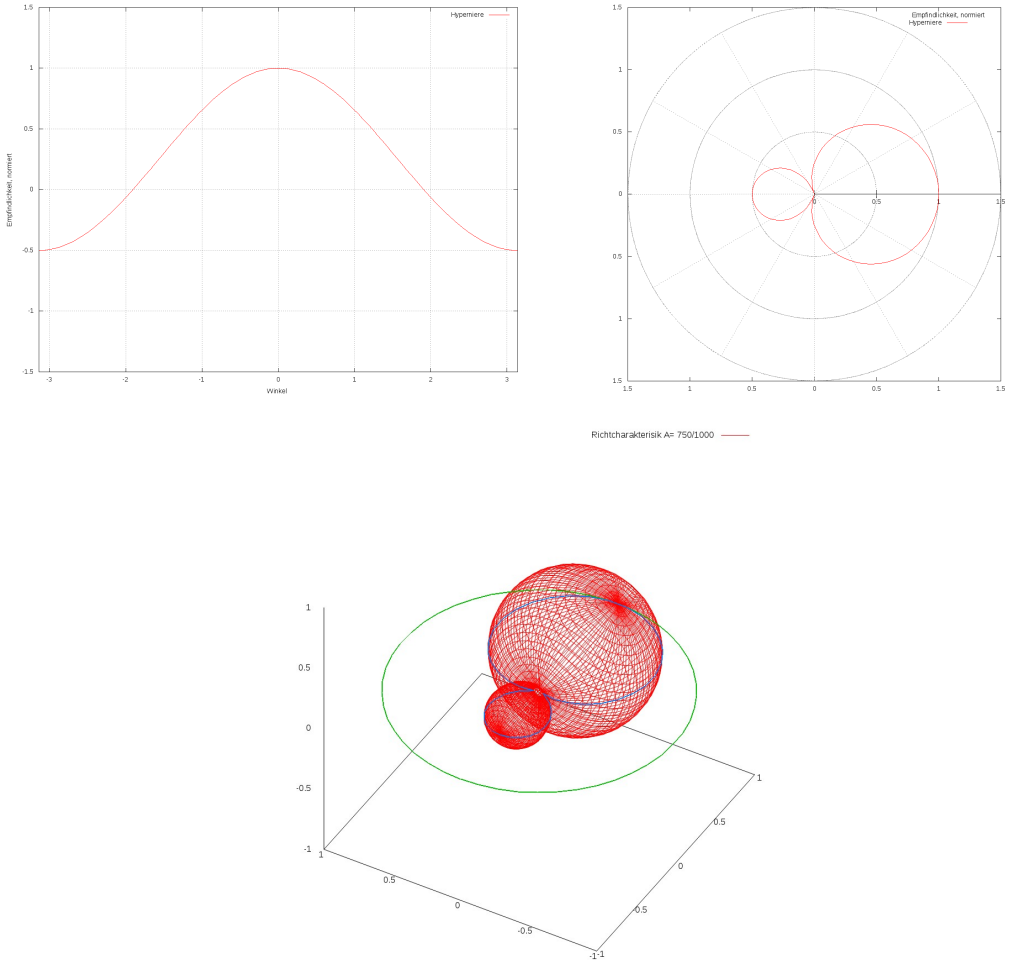


Abbildung 4.13: Hyperniere

Membran im Bassbereich mit Kugelcharakteristik arbeitet. Das wird teilweise gewünscht, da es den Nahbesprechungseffekt abmildert.

Man kann beide Kapseln getrennt an einen Impedanzwandler anschließen und sie herausführen[19]. In der Regel wird aber intern die – teilweise gewichtete – Summe oder Differenz der Signale gebildet. Das kann in der Verstärkungsschaltung passieren oder durch passende Wahl der Polarisationsspannungen der beiden Membranen. Bei festen Spannungen ergeben sich folgende Rechnungen und effektive Richtcharakteristiken:

$$signal_{\text{Niere}} = signal_{\text{Niere1}} \tag{4.50}$$

$$signal_{\text{Kugel}} = signal_{\text{Niere1}} + signal_{\text{Niere2}} \tag{4.51}$$

$$signal_{\text{Acht}} = signal_{\text{Niere1}} - signal_{\text{Niere2}} \tag{4.52}$$

Die endliche Größe der Kombinationskapsel führt im Fall der Kugel zu möglichen Auslöschungen im oberen Mittenbereich. Die frontal einfallenden Wellen werden um die Kapsel gebeugt und treffen mit einer Phasenverschiebung auf die hintere Membran. Das ist im Bass kein Problem, da die Phase in etwa gleich bleibt, bei sehr hohen Frequenzen werden die Schallwellen reflektiert und gelangen kaum auf die Rückseite. Dazwischen ist ein

[19] z.B Sennheiser MHK 800 Twin

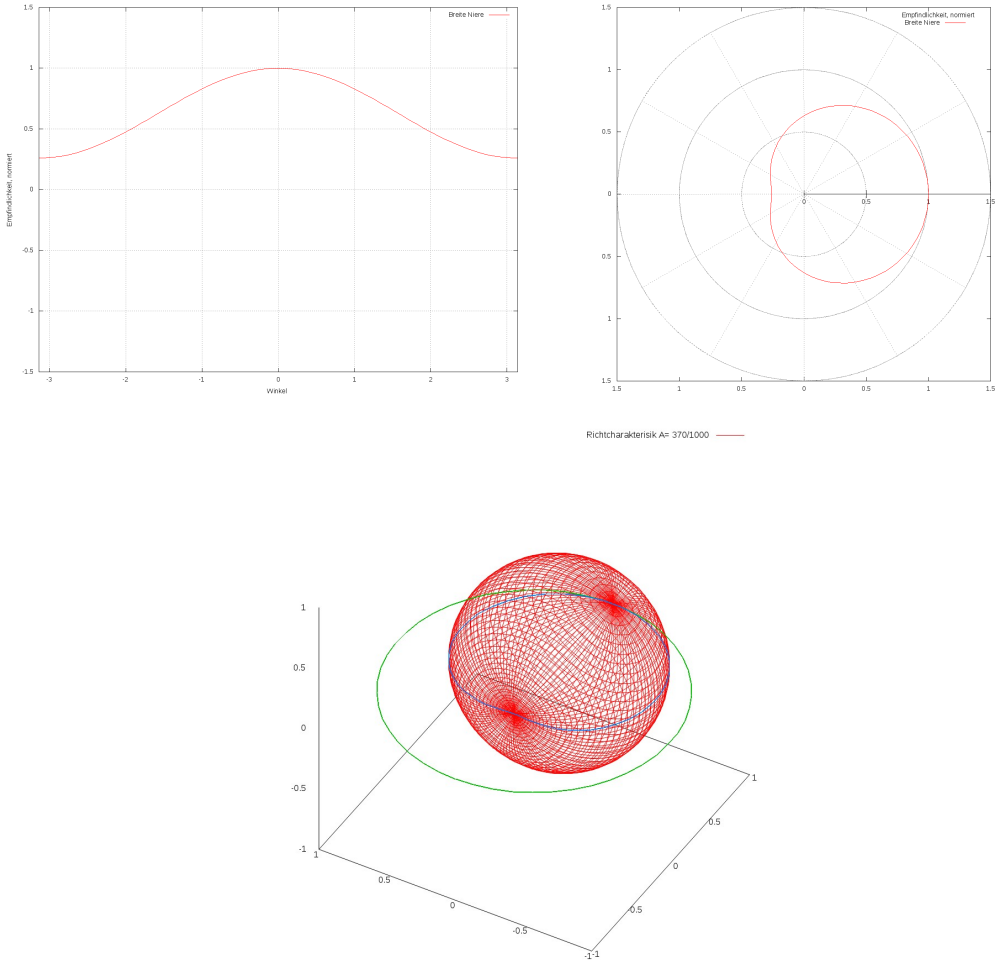


Abbildung 4.14: BreiteNiere

Bereich, in dem unter Umständen eine Phasenverschiebung von 180° eintritt, so dass eine Abschwächung des Signals auftritt. Man hat dann im Frequenzgang eine Delle in dem Bereich. Bevor man ein solches umschaltbares Mikrofon statt eines mit fester Richtcharakteristik als Kugelmikrofon einsetzt, sollte man sich vergewissern, ob bei den verwendeten Modell das Problem besteht.[20]

Wenn der Anteil einer der beiden Nieren von +1 bis −1 variiert werden kann, ergeben sich allen Richtcharakteristiken, die in diesem Kapitel erwähnt wurden, mit allen Zwischencharakteristiken.[21]

Das Polarflex Konzept der Firma Schoeps ist in dem Zusammenhang maximal flexibel. Durch zwei Mikrofonkapseln wird die Basis gelegt, alle Richtcharakteristiken erster Ordnung (die hier besprochen werden) zu erreichen. Dazu wird ein Kugel- und ein Achter-Signal entweder mit den entsprechenden Kapseln übereinander direkt aufgenommen oder aus zwei Nierenkapseln berechnet. In einer Matrizierungsstufe kann man denn frequenzselektiv den Acht-Anteil bestimmen. Damit ist es auch möglich, den oben beschriebenen Effekt des Übergangs einer Nierencharakteristik zur Kugelcharakteristik im Bass gezielt

[20] Aus einem Vortrag von Jörg Wuttke entnommen.

[21] Ein Beispiel mit 5 Charakteristiken: Sennheiser MKM 800 P48, kontinuierlich variabel mit Großmembranen: AKG C414, Røde NT2000

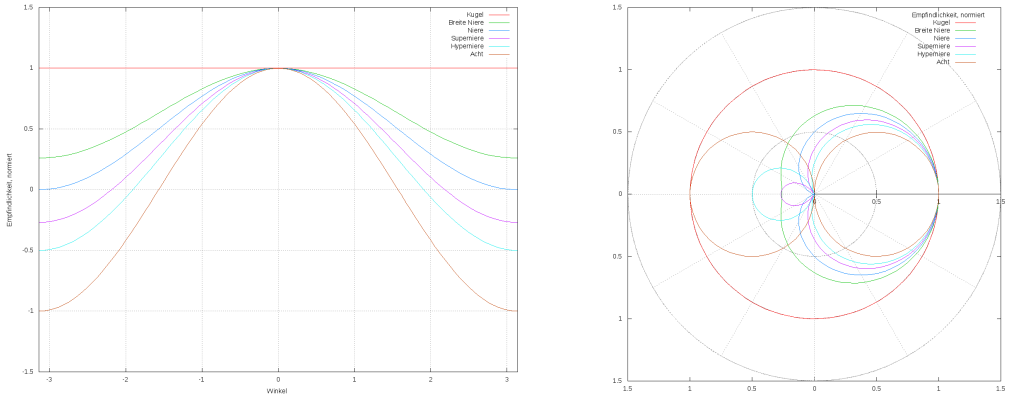


Abbildung 4.15: Alle Charakteristiken im Überblick

einzustellen.

4.2.4 Kombination mit Interferenz-Effekten: Richtrohr, Arrays

Wie bereits erwähnt, weicht wegen Interferenz-Effekten in den hohen Frequenzen außer bei extrem kleinen Kapseln die Richtcharakteristik vom Ideal ab, sie wird enger.

Besonders betroffen sind selbstverständlich Großmembrankapseln, darunter versteht man in der Regel alles mit einem Membrandurchmesser > 2.5 cm oder $> 1''$.

Man kann die Interferenz aber auch gezielt einsetzen, um die Richtcharakteristik zu ändern - in der Regel, um sie schmaler zu bekommen. Ohne besondere Vorkehrungen führt sie aber wegen ihrer Wellenlängenabhängigkeit zu einer Einschnürung, die zu hohen Frequenzen zunimmt. Als Ergebnis ist der Schall, der außerhalb des Maximum-Winkels einfällt, extrem gefärbt (dumpf). Jörg Wuttke empfiehlt deswegen, zuerst zu testen, ob eine Super- oder Hyperniere ohne diese Nachteile nicht ausreichend richtend ist.

Richtrohr

Ein quer geschlitztes Rohr beugt die Schallwellen an jedem Zwischenring in alle Richtungen. Bei Abweichungen vom frontalen Einfall führt das zu destruktiver Interferenz. Die Richtwirkung bei hohen Frequenzen wird damit schmaler, als die üblichen Richtcharakteristiken das erlauben. Die Öffnung der entstehenden Keule in graphischer Darstellung ist aus geometrischen Gründen umgekehrt proportional zur Länge des Rohrs. Typisch sind schmale Nebenkeulen außerhalb der Hautprichtwirkung. Sie sind extrem Frequenzabhängig.

Arrays

Eine weitere Variante zur Verengung der Richtcharakteristik ergibt sich durch die Verwendung mehrerer Mikrofonkapseln. Wenn man deren Signale aufaddiert, vergrößert sich die Basisbreite bei der Interferenz und man kann beliebig schmale Richtcharakteristiken erzeugen. Wie immer bei Interferenzeffekten ist aber zu beachten, dass die Richtcharakteristik sich aus der Fouriertransformierten der örtlichen Empfindlichkeitsverteilung ergibt. Das führt bei gleichmäßiger gitterförmiger Anordnung dazu, dass senkrecht dazu bei hohen Frequenzen eine ebenfalls gitterförmige Richtcharakteristik entsteht. Der Effekt wird

manchmal Lobing genannt. Durch ungleichmäßige Abstände kann der Effekt verringert werden, man sollte die außen befindlichen Mikrofone mit größeren Abständen montieren.

Wenn man über die einfache konstante Addition hinausgeht, kann man weitreichend in die Richtcharakteristik eingreifen. Die Höhen der äußeren Kapseln kann man absenken, um näherungsweise eine wellenlängenproportionale Ausdehnung des wirksamen Arrays und damit eine konstante Richtcharakteristik zu bekommen. In der Summe muss dann aber der Höhenanteil der zentralen Kapseln angehoben werden, damit der Summenfrequenzgang wieder linear wird.

Mit DSP-Technik kann man noch viel weiter gehen. Mit gezielter Verzögerung der einzelnen Kapseln lässt sich der Winkel des Empfindlichkeitsmaximums in weiten Grenzen verändern, ohne mechanisch etwas zu bewegen, ebenso lassen sich mehrere Richtungen im Ausgang getrennt ausgeben. Im Extremfall erreicht man eine akustische Abbildung der Richtungsabhängigkeit des Schalls. Durch Überlagerung mit einem Kamerabild lassen sich auf die Weise Lärmquellen mit hoher Auflösung lokalisieren.[1]

Das Array kann eindimensional sein, dann ist die Richtcharakteristik quer dazu die einer Einzelkapsel. Die Konstruktion wird an Rednerpulten[22] und an Konferenztischen[23] eingesetzt.

4.2.5 Geometrische Akustik: Reflektion, Brechung

Wie in der geometrischen Optik lassen sich auch in der Akustik für kurze Wellenlängen und große Aufbauten durch Reflektion oder Verzögerung in porösen Materialen oder Umwegkonstruktionen mit Lamellen Spiegel- und Linsensysteme aufbauen.

Praktisch eingesetzt wird vor allem der Parabolspiegel, in dessen Brennpunkt eine Kapsel eingebaut ist. Bei mittleren bis hohen Frequenzen erreicht diese Konstruktion die Wirkung einer Einzelkapsel des gleichen Durchmessers. Anwendungsgebiete sind dort, wo entfernte Quellen aus dem Hintergrund maximal herauspräpariert werden müssen. Das muss nicht nur Spionage sein (dafür ist die Konstruktion vielleicht zu auffällig groß), auch Vogelstimmen in freier Natur sind damit besonders gut herauszupicken.

Bei endlicher Entfernung müsste man eigentlich ein Rotationsellipsoid einsetzen, mit der Kapsel in einem Brennpunkt und der Quelle im anderen. Für große Entfernungen ist der Rotationsparaboloid der Grenzfall – und eigentlich ist das der typische Einsatzzweck, für den man eine so scharfe Richtwirkung braucht.

4.3 Wandlerprinzipien

Die weitaus meisten Mikrofone arbeiten passiv, das bedeutet, dass eine Membran aus einer Druckdifferenz eine mechanische Schwingung verursacht und deren Energie zum Teil in elektrische Energie transferiert wird. Prinzipiell ist der Vorgang umkehrbar, wenn auch die Parametrisierung für eine brauchbare Wiedergabe deutlich anders notwendig ist. Vor allem müssen Lautsprecher für die Erzeugung nichttrivialer Basspegel recht groß bemessen sein, um ein ausreichendes Verschiebevolumen zu erlauben. Für Mikrofone ist das absolut nicht notwendig.

Die Umkehrbarkeit wird bei der absoluten Kalibrierung der Empfindlichkeit ausgenutzt, da beim Vergleich die Empfindlichkeit herausgerechnet werden kann.

[22] Siehe KEM 970 von Microtech-Gefell, das „Bundestagsmikrofon".
[23] Revoluto System von Beyerdynamic

Da eine Membran immer auf eine Druckdifferenz reagiert, muss man die beiden Seiten so gestalten, dass die gewünschte Richtcharakteristik erreicht wird, siehe 4.2, Seite 36.

Wenn die Rückseite mit einem geschlossenen (genau genommen mit einer Dichtigkeit bis zur untersten Grenzfrequenz) Luftvolumen verbunden ist, misst man den Schalldruck auf der Vorderseite, im Grenzfall kleiner Kapsel gegen die minimale Wellenlänge den Schalldruck an der Stelle des Mikrofons, siehe Kapitel4.2.1, Seite 36.

Wenn beide Seiten der Membran offen bleiben, reagiert sie auf die Druckdifferenz, im Grenzfall kleiner Membranen gegen die minimale Wellenlänge auf den Druckgradienten senkrecht zur Normalen, siehe Kapitel 4.2.2, Seite 37.

Wenn eine Seite offen bleibt, die andere dagegen mit akustischen Widerständen verbunden ist, ergeben sich Mischformen, siehe Kapitel4.2.3, Seite 44.

Faustregel: Wenn nur die Vorderseite der Membran Kontakt zur Luft hat, kann es sich nur um ein Mikrofon mit Kugelcharakteristik handeln. Alle anderen Richtcharakteristiken benötigen Öffnungen an der Rückseite, zumindest Schlitze oder Bohrungen.

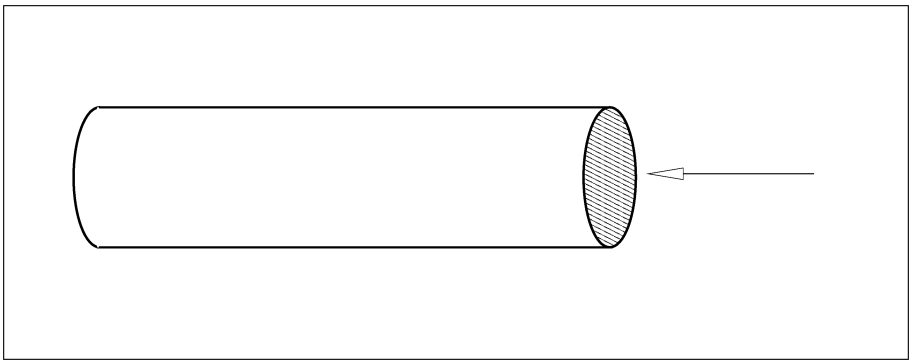


Abbildung 4.16: Mikrofon mit Kugelcharakteristik

Das in Abbildung 4.16 skizzierte Mikrofon ist sicher eines mit Kugelcharakteristik, da es nur vorne geöffnet ist.

4.3.1 Das (NF-)Kondensatormikrofon

In der Praxis kommt dieses Funktionsprinzip dem idealen Mikrofon von seinen Übertragungseigenschaften am nächsten. Das liegt mit an der konzeptionellen Einfachheit.

Die Membran, die entweder selbst leitfähig oder zumindest leitfähig beschichtet ist, bildet einen Pol eines Kondensators. Durch die Schwingung ändert sich der wirksame Abstand zum Gegenpol und mit ihm die Kapazität.

Da keine weiteren Komponenten mitbewegt werden müssen, ist die bewegte Masse sehr gering und es ist relativ einfach, eine hohe obere Grenzfrequenz und breitbandige Wandlung zu erreichten.

Wenn man vereinfachend eine kolbenförmige Bewegung der Membran annimmt (das ist in der Mitte näherungsweise der Fall), so ergibt sich die Kapazität als die eines ebenen Kondensators

$$C = \mu_0 A/D \tag{4.53}$$

mit C als Kapazität in Farad, μ_0 als Dielektrizitätskonstante des Vakuums, A als Fläche der Elektroden, D als Abstand.

Beim NF-Betrieb einer Kondensatorkapsel wird die Kapsel über einen sehr großen Widerstand auf im Vergleich zu den Zeitkonstanten des aufzunehmenden Signals konstante Ladung gebracht. Die Zeitkonstante, die auch die niedrigste zu wandelnde Frequenz bestimmt, ergibt sich aus

$$\tau = RC \tag{4.54}$$

oder umgekehrt

$$\omega_0 = 1/(RC) \tag{4.55}$$

und entsprechend

$$f_0 = \omega_0/(2\pi) = 1/(2\pi RC) \tag{4.56}$$

mit τ als Zeitkonstante, ω_0 als unterer Grenzfrequenz der NF-Wandlung, R als Vorwiderstand und C als Kapazität der Kapsel im Gleichgewicht (ohne Signal). Typisch sind Werte im ein- bis mehrstelligen Gigaohmbereich für den Vorwiderstand.

Q ist die Ladung der Kapsel. Sie ergibt sich aus der Polarisationsspannung U_0 und der Gleichgewichtskapazität der Kapsel C_0 als

$$Q = U_0 C_0 \tag{4.57}$$

Die Spannung am Kondensator ergibt sich aus

$$U_{\text{caps}} = Q/C = D\frac{Q}{\mu_0 A} \tag{4.58}$$

Man sieht, dass diese Spannung direkt proportional zum Abstand der Elektroden und damit ihr Wechselspannungsanteil direkt proportional zur Auslenkung der Elektrode ist.

Um eine hohe Empfindlichkeit zu erreichen, ist eine hohe Ladung und damit Polarisationsspannung notwendig. Diese kann extern zugeleitet werden. Dabei ist zu beachten, dass kein Überschlag ausgelöst wird und dass die elektrostatische Anziehung nicht zu groß wird, was zu Berührung und Kurzschluss führt.

Bei Elektet-Kapseln wird die Vorspannung durch ein dauerhaft polarisierbares Material bereitgestellt, das namensgebende Elektret. Dies kann Teil der Membran sein – was aber zu Kompromissen in den Materialeigenschaften führt – oder besser auf der Rückelektrode angebracht sein. Dann spricht man von Back Elektret Kapseln. Mittlerweile sind so stabile Elektret-Materialien erhältlich, dass der Ruf als der „echten Kondensatorkapsel" unterlegene Technologie nicht mehr berechtigt ist.

Der Kapsel nachgeschaltet ist ein Impedanzwandler, der eine über eine Feldeffekt-Transistorstufe eine extrem hohe Eingangsimpedanz hat, um die Kapsel wechselstrommäßig nicht so zu belasten, dass die Wandlung frequenzabhängig wird.

Im Studiobereich wird der Ausgang in der Regel (zumindest von der Impedanz her) symmetrisch ausgeführt und die Vorspannung und Impedanzwandler- und Symmetrierungsstufe[24] mittels Phantomstromversorgung[25] betrieben.

Dabei ist zu beachten, dass die empfangene Schalleistung proportional zur Fläche der Membran ist, während der Rauschpegel proportional zum Durchmesser steigt. Daher sind sehr kleine Kapseln (3-10 mm Durchmesser) in der Regel an Stellen im Einsatz, an denen kein besonders niedriger Schallpegel zu erwarten ist (Lavalier, Kopfbügel, Schlagzeug,

[24] Kapitel 6.3, Seite 84
[25] Kapitel 6.6, Seite 87

Messmikrofon). Weit verbreitet sind Kapseln im Bereich von 20 mm Durchmesser. Bei ihnen ist es mittlerweile möglich, den gesamten Übertragungsbereich ohne Einschränkung zu erfassen. Ihr Einsatzbereich ist praktisch universell. Bei ihnen ist aber bereits eine Abweichung von idealen frequenzunabhängigen Richtcharakteristiken in den Höhen unvermeidlich, da Beugungseffekte spürbar werden.

Kapseln mit einem Durchmesser über 25 mm oder 1 Zoll werden als Großmembrankapseln bezeichnet. Sie bringen mittlerweile technisch nur noch Vorteile, wenn extreme Rauscharmut gefordert wird und die Neutralität nicht so wichtig ist, da ihre Membranen zu schwer kontrollierbare Partialschwingungen neigen. Der Autor kann sich der anscheinend überwältigenden Meinung nicht anschließen, sie seien mit ihren relativ welligen und bei 15 KHz begrenzten Frequenzverläufen grundsätzlich überlegene Studiomikrofone im Vocal-Bereich, speziell beim Gesang.[26] Nebenbei ist der oft in dem Zusammenhang mit Großmembranmikrofonen erwähnte und geschätzte Übergang zur Kugelcharakteristik im Bass eine Eigenschaft von Kombinationskapseln von zwei Nieren Rücken an Rücken. Das ist die normale Bauweise von Großmembran-Kondensatormikrofonen mit variabler Richtcharakteristik, aber nicht von solchen mit fester Richtcharakteristik. Mit der Größe der Membran hat das Verhalten nichts zu tun.[23]

Mit modernen Verstärkerschaltungen kann ein NF-Kondensatormikrofon in die Nähe des theoretischen Optimums an Rauschen und Empfindlichkeit gebracht werden.

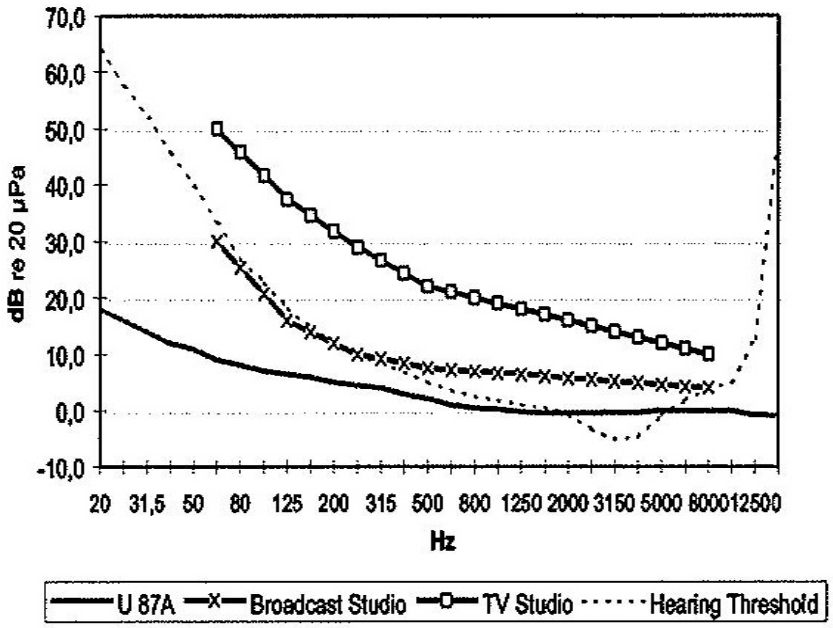


Abbildung 4.17: Frequenzgang des Rauschens eines Mikrofons im Vergleich zu typischen Umgebungsgeräuschen, aus Peus [20], Seite 7

Die Graphik 4.17 zeigt den Vergleich des Frequenzgangs des Rauschens eines Großmembran-Studiomikrofons Typ U87A (12 dBA Rauschpegel) mit den Frequenzgängen des Rauschens von typischen Studioumgebungen und der Hörschwelle. Moderne Mikrofone liegen bis 5 dB tiefer im Rauschpegel, solche mit kleiner Membran liegen ähnlich oder knapp darüber. Wie man sieht, stellt das Rauschem keine reale Einschränkung mehr dar.

[26]Siehe Wuttke: Wissenswertes[38], Abschnitt 3

Für eine gegenüber der minimalen Wellenlänge kleine Kapsel (z.B. weniger als 6 mm Durchmesser) ist es bei NF-Kondensatormikrofonen relativ einfach, eine weitgehend frequenzlineare Charakteristik zu erreichten. [27]

- Eine Seite der Membran wird als kleiner abgeschlossener Luftraum ausgebildet und die Resonanzfrequenz der Membran wird an das oberen Ende des Übertragungsbreichs mit passender Dämpfung gelegt oder sogar noch höher, wobei die Dämpfung an Einfluss verliert.

  In dem Fall wirkt die Membran wie eine Feder, deren Auslenkung im Rahmen der genannten Bedingungen proportional zum augenblicklichen Druck ist, ohne Einfluss der Frequenz.

  Diese Voraussetzungen sind bei sehr kleinmembranigen (typ. 6mm Durchmesser) Messmikrofonen sehr gut erfüllt.

- Beide Seiten der Membran bleiben offen, der Aufbau ist mechanisch symmetrisch und die Resonanzfrequenz wird an den mittleren Bereich des Übertragungsbereichs gelegt. Die Bewegung wird stark bedämpft, um die Bandbreite zu erhöhen, eventuell wird der Übertragungsbereich durch Resonanzen an den Rändern weiter verbreitert.[28] Die Membran wird von eine Druckdifferenz (im Grenzfall dem Gradienten des Drucks) angeregt. Wegen der inneren Ableitung ist der Gradient proportional zum Produkt von Schalldruck und Frequenz. Da die Bewegung durch die Dämpfung kontrolliert wird, ist die Geschwindigkeit proportional zur Druckdifferenz und für den Frequenzgang der Auslenkung, deren zeitlichen Integral, heben sich die Frequenzabhängigkeiten weg, ebenso die Phasenverschiebung von +90° (Ableitung des Drucks vom Ort) und -90° (zeitliches Integral der Geschwindigkeit). Das Resultat ist eine Kapsel mit achtförmiger Richtcharakteristik und im Idealfall linearem Frequenzgang. Das Ausgangssignal ist in Phase mit dem Druck bei einer Schallwelle von vorne und in Gegenphase bei einer Schallwelle von hinten.

- Durch Teilabschluss einer Seite können alle Zwischenformen an Richtcharakteristiken realisiert werden. Auch bei diesen Richtcharakteristiken muss die Resonanzfrequenz relativ niedrig sein.

Da zwingend eine Impedanzwandlerstufe direkt an der Kapsel sein muss, ist Elektronik an dem Ort unvermeidlich. Dadurch sind diese Mikrofone recht empfindlich gegen Feuchtigkeit jeder Art, insbesondere auch, weil die hohe Polarisationsspannung und die minimale Signalspannung sehr nahe benachbart sind.

[27] Wenn die Kapselumrandung eine nicht vernachlässigbare Wärmeleitung und Wärmekapazität besitzt, kann die Nachgiebigkeit des Luftraums zu niedrigen Frequenzen wachsen. Die Zyklen werden bei niedrigen Frequenzen länger, daher wird zunehmend Wärme aus der Kompression oder Verdünnung mit dem umgebende Material ausgetauscht. Das vermindert die durch Temperaturänderung verstärkte Steifheit bei adiabatischer Volumenänderung, da die Verhältnisse sich mehr dem isothermen Verhalten annähern. Der maximale Unterschied entspricht linear dem Adiabatenexponenten. Dieser liegt für Luft als Mischung zweiatomiger Gase bei 1,4, entsprechend ziemlich genau 3 dB, da 1,4 wiederum nahe bei $\sqrt{2}$ liegt. In der Praxis ist der Einfluss aber geringer, da zumindest ein Teil der rückstellenden Kräfte von der Membran selbst ausgeübt wird und entsprechend diesem Einfluss nicht unterliegt. Durch diesen Effekt steigt der Frequenzgang zu tiefen Frequenzen je nach Konstruktion etwas an.

[28] Das entspricht den Maßnahmen zur Erweiterung des Frequenzbereichs beim dynamischen Mikrofon als Druckempfänger. Dieser ist ohne Kompensation ebenfalls ein schmalbandiger Resonanzemfänger. Siehe Kapitel 4.3.2, Seite 60

Bei Einsatz als Gesangsmikrofon mit extremer Nahbesprechung ist das unbedingt zu berücksichtigen.

Durch den Impedanzwandler, der den Strom extrem verstärkt und die relativ hohe Ausgangsspannung des kaum belasteten Kapselausgang ist die Ausgangsspannung dieses Mikrofontyps auch ohne Spannungsverstärkung relativ hoch. Der Impedanzwandler verstärkt die Spannung der Kapsel normalerweise nicht, bei spannungssymmetrischem (und nicht nur impedanzsymmetrischem) Ausgang ist die Differenzspannung allerdings um einen Faktor 2 bzw. 6 dB angehoben.

Eine gute Übersicht über Schaltungskonzepte für Kondensatormikrofone im Laufe der Zeit bietet die Arbeit von Meitz[11].

4.3.2 Mikrofone nach dem Prinzip der elektromagnetischen Induktion

Wenn ein Leiter in einem über die betrachtete Länge L konstanten magnetischen Feld der Induktion $\vec{B}$ mit Betrag B optimalerweise in einer dazu senkrechten Richtung mit der Geschwindikkeit $\vec{v_M}$ bewegt wird, ergibt sich eine induzierte Spannung U_a nach

$$U_a = v_M B l \tag{4.59}$$

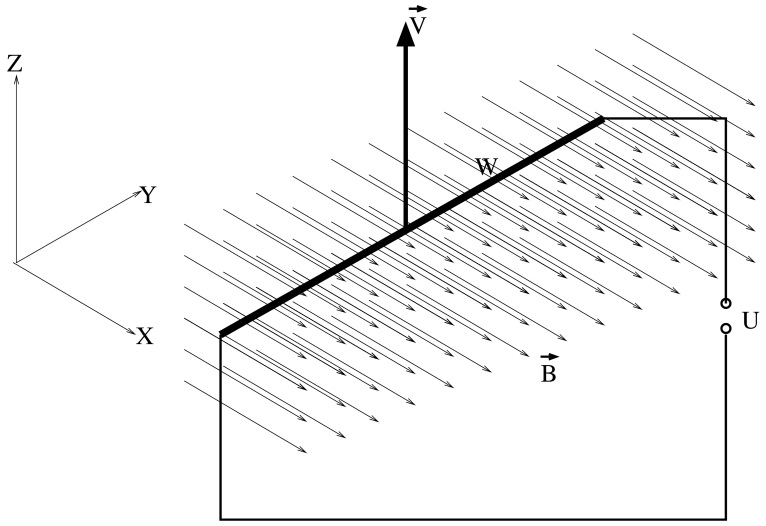


Abbildung 4.18: Induktion an einem bewegten linearen Leiter

Bei einer typischen Induktionsstärke des magnetischen Felds und einer realistischen Geschwindigkeit der Membrane pro Längeneinheit recht kleine Spannungen erreicht werden, nimmt man als Form des Leiters entweder eine

Spule, um mit mehreren Windungen in einem Topfmagneten die Länge L zu maximieren oder ein kurzes, leitfähiges

Bändchen, das direkt die Membran darstellt und transformiert die winzige aber extrem niederohmige Ausgangsspannung hoch oder verstärkt sie an Ort und Stelle.

Da die mechanische Größe, die in die Ausgangsspannung umgesetzt wird, eine Geschwindigkeit und nicht wie bei dem Kondensatormikrofon eine Position ist, wird nicht statisch,

sondern dynamisch gewandelt. Von daher sind beide Bauweisen eigentlich dynamische Mikrofone. Es hat sich jedoch eingebürgert, dass die erste Variante als dynamisches Mikrofon bezeichnet wird und die zweite als Bändchenmikrofon.

Das dynamische Mikrofon

Das dynamische Mikrofon arbeitet in der Umkehrung des dynamischen Lautsprechers.

Der schematischen Querschnitt in Abbildung 4.19, Seite 60 zeigt den prinzipiellen Aufbau. Eine Spule C ist an einer über die federnde Aufhängung Su positionierten Membran D befestigt und ragt in einen Topfmagnet mit radialem Magnetfeld (Angedeutet durch die Pole S und N). Typischerweise wird zur Verbesserung des Frequenzgangs auch mindestens ein mechanischer Fließwiderstand R eingebaut, wie feines Gewebe. Die entstehende Induktionsspannung wird in der Regel direkt auf den Ausgang gegeben. Bei einigen wenigen Modellen – zum Teil recht verbreitet – wird noch ein Übertrager dazwischen geschaltet.

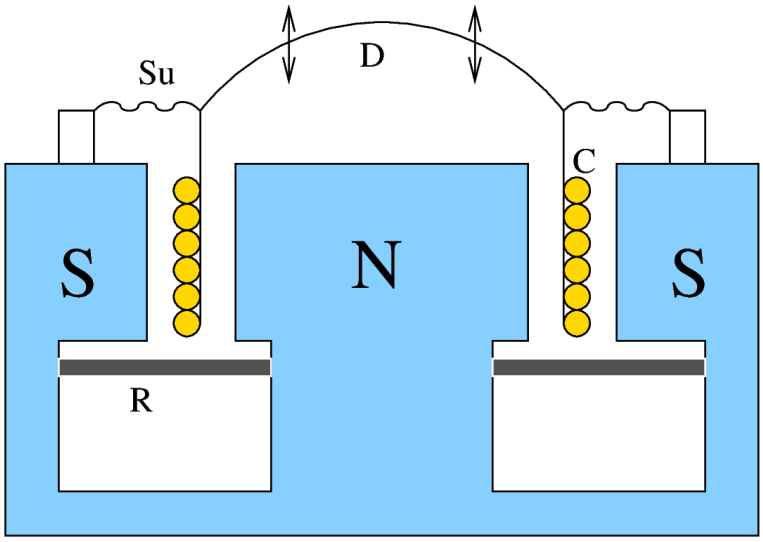


Abbildung 4.19: Schematischer Aufbau eines dynamischen Mikrofons mit Kugelcharakterisitik

Ohne Kompensationsmaßnahmen ist der Frequenzgang bei Kugelcharakteristik ziemlich resonant. Die Ausgangsspannung ist proportional zur Geschwindigkeit der Schwingspule

Unterhalb der Resonanz fällt die Charakteristik ohne starke Dämpfung mit ca. 6 dB/Oktave wegen der Federwirkung der Einspannung. Die Auslenkungsamplitude bleibt proportional zur Druckamplitude, die zeitliche Ableitung fällt daher proportional zur Frequenz. Oberhalb der Resonanz wirkt die Masse, die zu einem Abfall der Amplitude mit dem Kehrwert der Frequenz, also ca. -6 dB/Oktave führt.

Durch Dämpfung und akustische Resonatoren (z.B. kleine Bohrung oder Rohr: Helmholz-Resonator) wird der Frequenzgang optimiert.[29]

Für ein richtendes Mikrofon muss wie immer die Rückseite im Übertragungsbereich wirksam geöffnet werden, wobei durch die genaue Dimensionierung von Bohrungen B, Hohlräumen Cav, Laufzeitstrecken L und Dämpfungsglieder Rd der Anteil der Gradientencharakteristik zur Festlegung der gewünschten Richtcharakteristik und deren Frequenzabhängigkeit sowie der Frequenzgang optimiert werden, siehe Abbildung 4.21, Seite62.

[29]Eine eingehende Besprechung findet sich wieder bei Olson[18], pp. 226-229

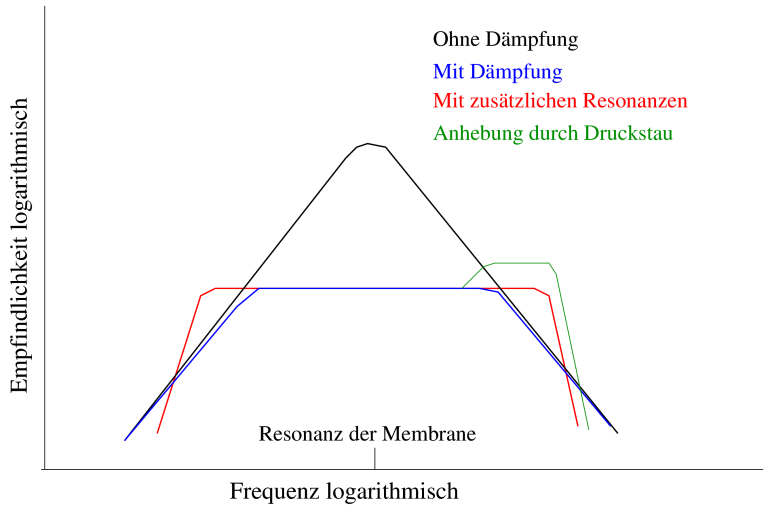


Abbildung 4.20: Prinzipielle Frequenzgänge Dynamisches Mikrofon mit Kugelcharakteristik

Durch den Platzbedarf dieser mechanischen Elemente sind gute dynamische Mikrofonkapseln in der Regel nicht allzu klein.

Wie immer ist der Frequenzgang des Druckgradientenempfängers durch die innere Ableitung grundsätzlich gegenüber dem des analogen Druckempfängers mit einem Quotienten der Wellenlänge und damit mit dem Produkt der Frequenz versehen (neben anderen Faktoren). In logarithmischer Sicht bedeutet das einen zusätlichen Anstieg mit der Frequenz von ca. 6 dB pro Oktave (gnau: 20 dB pro Dekade). Die Resonanzfrequenz der Membran (mit Schwingspule, etc.) definiert in dem Fall die untere Frequenz des Übertragungsbereichs. Der Frequenzgang des Druckgradientenempfängers ist damit oberhalb der Resonanzfrequenz prinzipiell linear, bis auf Reflektionen, Resonanzen und Kompromisse mit dem integrierten Kugelanteil bei üblichen Richtcharakteristiken. Ein Nachteil der Konstruktion mit dem Topfagneten ist, dass durch die Magnetkonstruktion auf der Rückseite so gut wie ausgeschlossen ist, eine wirklich symmetrische Achtercharakteristik zu erreichen, da zumindest die Höhen auf der Rückseite blockiert werden. Stattdessen können Bändchenmikrofone (siehe 4.3.2, Seite62) eingesetzt werden.

Nur wenige dynamische Mikrofone erreichen einen Frequenzgang bis 20 KHz. Wegen der großen Kapseln sind Anhebung der oberen Mitten durch Reflektion schon bei relativ niedrigen Frequenzen typisch. Einige wenige Mikrofontypen kompensieren das durch parallel geschaltete RLC-Glieder fest (Beyerdynamic M201) oder schaltbar (Sennheiser MD441, Shure SM7B). Die Bassanhebung durch den Nahbesprechungseffekt bei Richtmikrofonen wird teilweise durch parallel geschaltete Spulen schaltbar kompensiert (Sennheiser MD441, Shure SM7B).

Die Kapseln sind in der Regel recht groß, um ausreichend empfindlich zu sein. Dennoch ist die Empfindlichkeit in der Regel 10-20 dB geringer als bei einem Kondensatormikrofon.

Bauartbedingt wird auch durch äußere Wechselmagnetfelder eine Ausgangsspannung induziert, was das Signal stören kann. Bei einigen hochwertigen Modellen ist daher typischerweise außerhalb der Kapsel und konzentrisch zur Schwingspule eine zweite Spule gegensinnig gewickelt und zugeschaltet, die so dimensioniert ist, dass deren durch äußere Magnetfelder induzierte Spannung die der Schwingspule kompensiert.

Vorteilhaft ist die Robustheit der Konstruktion. Feuchtigkeit kann nicht zu elektrischen Problemen führen, da im Gegensatz zu Kondensatormikrofonen keine aktiven Komponen-

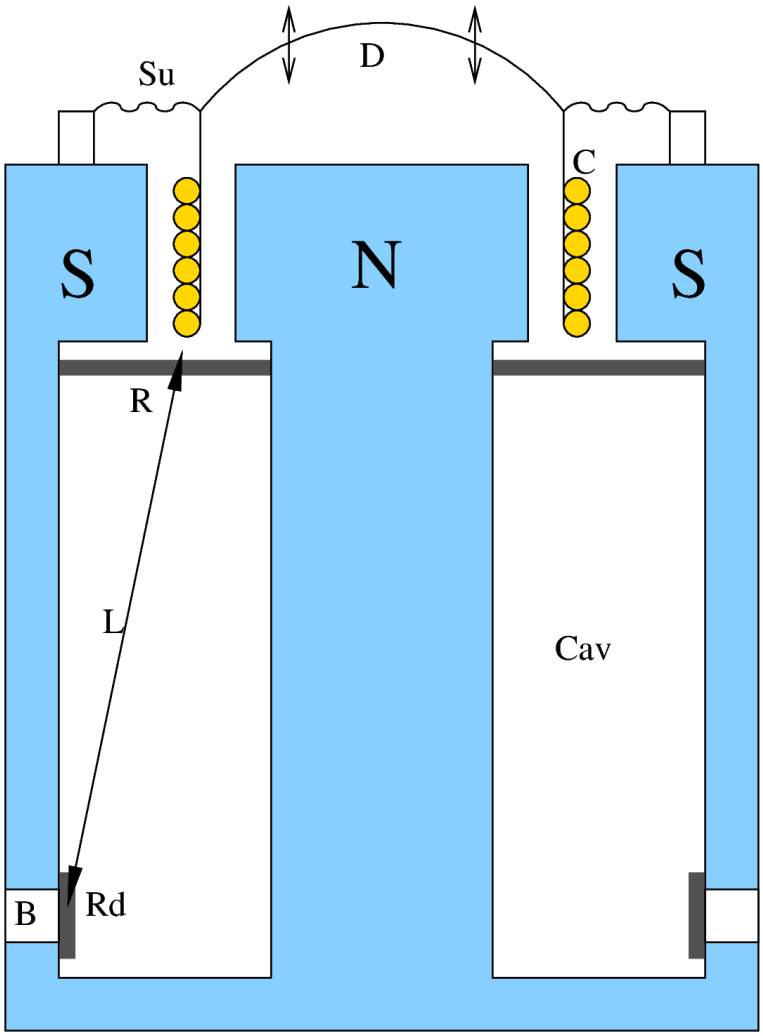


Abbildung 4.21: Schematischer Aufbau eines dynamischen Mikrofons mit Richtwirkung

ten im Mikrofon enthalten sind.

Meist werden bei Live-Veranstaltungen im Rock- und Popbereich hauptsächlich Mikrofone dieser Bauart eingesetzt. Für Gesangsanwendung im Nahbereich sind Modelle mit hoher unterer Grenzfrequenz, Richtwirkung zwischen Niere und Superniere, stabilem Schutzkorb und Popp-Unterdrückung durch integrierte Schaumnetz-Filter üblich.

Das Bändchenmikrofon

Hierbei handelt es sich um einen Spezialfall des dynamischen Mikrofons. Die leitfähige Membran R selbst bildet den Induktionsleiter im starken Magnetfeld (zwischen den Polen N und S).

Da es hier nicht mehrere Windungen zur Erzielung einer ausreichenden Ausgangsspannung gibt, ist diese sehr niedrig, ebenso die Impedanz. Im Regelfall ist daher ein Übertrager nachgeschaltet, der beides hochtransformiert. Trotzdem bleibt die Empfindlichkeit gegenüber normalen dynamischen Mikrofonen zurück. Ein rauscharmer Vorverstärker ist bei diesem Mikrofontyp besonders wichtig.

Das Bändchen ist extrem dünn und leicht, um die Empfindlichkeit zu erhöhen. Die Aufhängung ist äußerst locker, um trotzdem die Resonanz ausreichend niedrig zu halten.

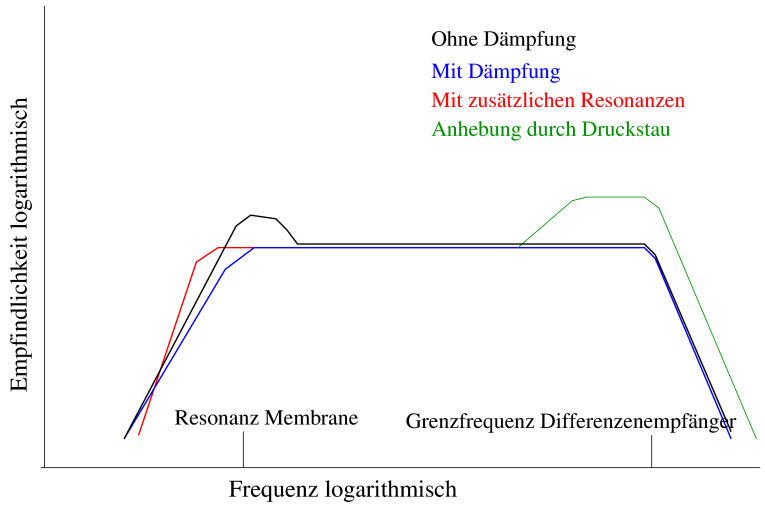


Abbildung 4.22: Prinzipielle Frequenzgänge dynamisches Mikrofon mit Gradientenanteil (gerichtet)

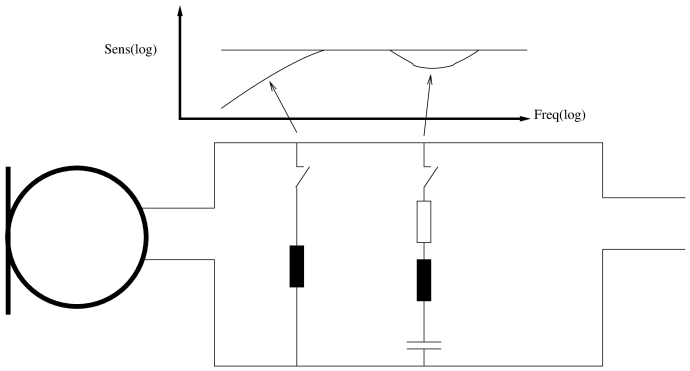


Abbildung 4.23: Absenkung von Bass oder Mitten bei einem dynamischen Mikrofon

Dadurch sund diese Mikrofone empfindlich gegen Stöße und Windstöße (z.B. Anblasen aus der Nähe) können die Membran leicht zerstören.

Durch den Übertrager werden auch kleine Ströme von außen extrem hochtransformiert, wie bei nicht gleichzeitigem Anlegen einer (hier nicht sinnvollen) Phantomspannung. Auch das kann die Membran leicht zerstören.

Die meisten dieser Mikrofone sind auf beiden Seiten offen und symmetrisch, so dass sie eine Achtförmige Richtcharakteristik besitzen. Das war auch historisch die erste Realisierung einer Richtcharakteristik außer der Kugel und wurde eingesetzt, um den störenden Schall der damaligen recht lauten Filmkameras auszublenden.

Es gibt auch Bändchenmikrofone, bei denen eine Seite teilweise verschlossen ist, um andere Richtcharakteristiken wie Niere zu erreichen.

Da das Grundprinzip das gleiche wie beim dynamischen mikrofon ist, gelten zum Frequenzgang die gleichen Betrachtungen.

Meist haben diese Mikrofone eine recht lineare Wiedergabe in den Mitten, über 15 KHz reichen sie aber nicht hinaus.[30] Ein Beipiel findet sich weiter oben in Abbildung 4.1.2, Seite 30.

Typisch ist auch, dass sie weder von der Bauform noch vom Richtverhalten her rota-

[30]Eine eingehende Besprechung findet sich wieder bei Olson[18], pp. 237-267

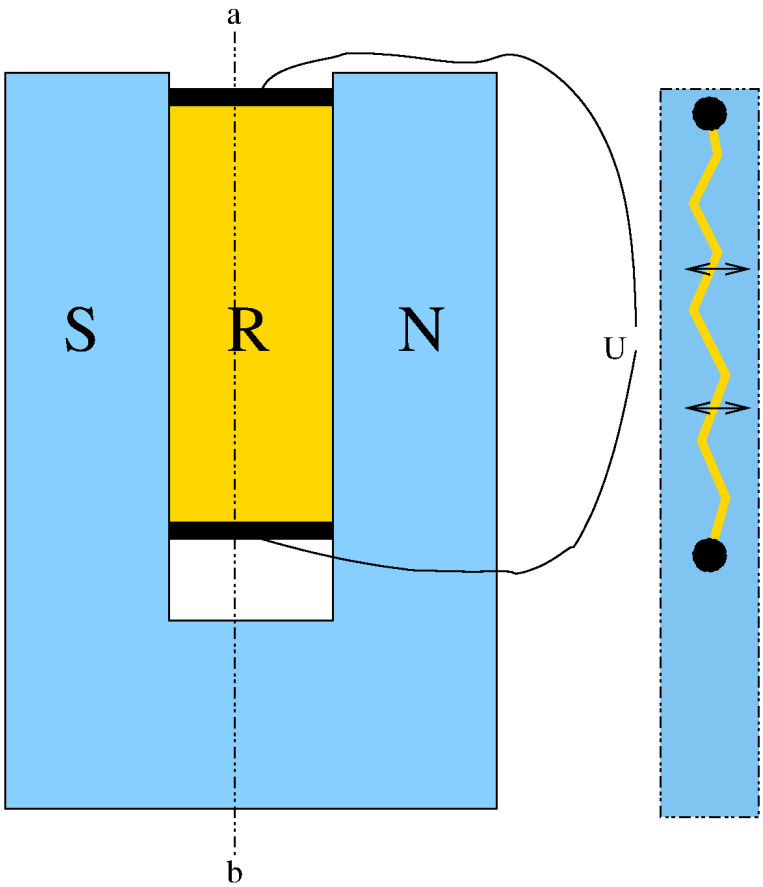


Abbildung 4.24: Prinzipieller Aufbau eines Bändchenmikrofons, rechts ein Schnitt von a nach b

tionssymmetrisch sind. Durch Interferenz ist das Mikrofon bei hohen Frequenzen in der Ebene entlang der Richtung der größten Länge des Bändchens wesentlich starker gerichtet als senkrecht dazu.

4.3.3 Spezielle Mikrofone

Das MEMS Mikrofon

Es wird auf einem Chip mit mikro-eletromechanischer Technik durch Lithographie realisiert. Damit wird eine hohe Wiederholungspräzision erreicht und die Einbindung in eine elektronische Umgebung direkt auf er Platine ermöglicht. Das ist der Mikrofontyp des typischen Smartphones. Durch die Miniaturisierung ist in der Regel kein Interferenzverhalten zu bemerken. Der Frequenzgang ist im Freifeld typischerweise glatt, die Richtcharakteristik kugelförmig. Wie sehr das im eingebauten Zustand gilt, hängt vom Einbau und der Realisierung der Schallöffnung ab.

Das Piezomikrofon

Bei diesem Prinzip nutzt man den piezoelektrischen Effekt geeigneter Substanzen aus. Sie sind oft sehr resonant. Es ist ohne weiteres möglich, Ultraschall-empfindliche Mikrofone mit dieser Technik zu realisieren.

Das Kontaktmikrofon

Eine hohe Bedeutung in der Musik hat das Piezomikrofon wegen seiner relativ hohen mechanischen Impedanz als Körperschall- oder Kontaktmikrofon, besonders fest montiert in akustischen Gitarren. Da auch die elektrische Impedanz sehr hoch ist (die Übertragunsgleichung ist analog zum Kondensatormikrofon), ist ein Impedanzwandler direkt beim Mikrofon notwendig.

Als Kontaktmikrofon werden aber auch miniaturisierte Kondensatormikrofone eingesetzt. Es wird in der Regel angeklebt.

Das Grenzflächenmikrofon

Das Grenzflächenmikrofon ist ein eigentlich ansonsten ganz normales (meist Kondensator-)Mikrofon, das zum Betrieb direkt an oder sogar bündig eingebaut in einer festen ausreichend großen ebenen Fläche in ein passendes Gehäuse eingebaut ist. Dies verhindert Interferenzeffekte durch die Reflektion an eben dieser Fläche (kein Kammfiltereffekt).

Meist wird ein Druckempfänger mit Halbkugelcharakteristik eingesetzt, andere (halbierte) Richtcharakteristiken sind auch möglich. Wegen des direkten Kontakts zur Oberfläche geht das aber mit einer sehr starken Empfindlichkeit gegen Erschütterungen einher (tiefe Resonanz). Bei Tischen oder dem Boden ist das zu problematisch.

Eine Halbsuperniere gleicht über weite Strecken durch zunehmende Empfindlichkeit in der Nähe der Achse die Abnahme der Lautstärke durch wachsende Entfernung aus, wenn die Schallquelle in der selben Höhe bleibt und das Mikrofon auf dem Boden angebracht ist. Das kann bei Theatermitschitten hilfreich sein.[36]

4.3.4 Aktive Wandler

Einige Mikrofontypen sind im Gegensatz zu den vorgenannten Varianten bei der Wandlung selbst aktiv. Sie wandeln die Schall- bzw. Schwinungsenergie nicht direkt in ein elektrischen Signal um, sondern bedienen sich einer externen Energiequelle, um ein Signal zu erzeugen. Damit wirken sie bei der Wandlung selbst als Verstärker - nicht zu verwechseln mit Mikrofonen, die passiv wandeln und dann einen eingebauten Verstärker antreiben, wie z.B. Kondensatormikrofone.

Das HF-Kondensatormikrofon

Es verwendet einen HF-Generator in Kombination mit phasenabhängiger Gleichrichtung in einer Brückenschaltung zur Messung der Kapazitätsänderung. Der HF-Oszillator liefert die Energie.

Prinzipiell kann dieser Mikrofontyp ohne untere Grenzfrequenz funktionieren, er fungiert im Grenzfall als Barometer.

Hervorragende Vertreter sind die Mikrofone der MKH Serie von Sennheiser.

Die Kondensatorkapseln müssen auf andere Weise optimiert sein als die der NF-Kondensatormikrophone.

Das Kohlemikrofon

Es war das erste technisch eingesetzte Mikrofon. Der unter veränderlichem Druck wechselnde Widerstand an der Kontaktfläche zwischen Kohelkörnern führt zu einem wechselnden Strom. Die inhärente Verstärkung erleichterte wesentlich die Funktion der ersten Te-

lefone. Die mechanischen Resonanzen der Kohlegruß-Behälter und der meist metallischen Membran mit ihren Partialschwingungen führte zu extrem resonanten Frequenzgängen. Zusätzlich ist der Wandler nicht besonders linear in der Kennlinie, was zu hoher Nichtlinearität und hohem Klirrfaktor führt. Bei der typischen reinen Sprachanwendung mit einer einzelnen Stimme (Telefon) ist das aber verschmerzbar. Mit Gegentakt-Lösungen wurden erste Studiomikrofone gebaut, die verbesserte Linearität brachten. [31]

Das Röhrenmikrofon

Es verwendete die Änderung der elektrischen Eigenschaften durch Schwingung der Elektroden. [32]

Das Optische Mikrofon

Bei dieser Konstruktion moduliert man die Lichtmenge, die typischerweise zwischen zwei offenen Lichtleitern passiert. Dieses Prinzip ist auch bei extrem starken wechselnden elektromagnetischen Feldern brauchbar, zum Beispiel im Inneren eines NMR-Geräts.

Das Wärmeflussmikrofon

Hier verwendet man zwei eng benachbarte Fäden, von denen einer beheizt wird und vom anderen die Temperatur über den Widerstand gemessen wird. Bei Luftbewegung vom Heizdraht auf den Messdraht steigt dessen Temperatur wegen der Konvektion und umgekehrt. Hier handelt es sich tatsächlich um die Messung der Schallschnelle, die zum Druckgradienten proportional ist. Es existiert ein Messmikrofon, das auf die Art mit mehreren Pärchen gleichzeitig die X-Y- und Z- Komponente der Schallschnelle sowie mit einem Druckmessmikrofon den Schalldruck misst. Zusammen ergibt das den vollständigen Satz der nullten und ersten Ordnung der Kugelfunktion des Schallfeldes an einer Stelle.

[31] Siehe Olson[18], pp. 214-220
[32] Siehe Olson[18], pp. 220-224

5 Mehrere Mikrofone/Signale, Stereophonie

5.1 Stereophonie - nicht unbedingt genau zwei Kanäle

Stereophonie bedeutet räumliche Wiedergabe. Meist wird das mit dem ersten und bis heute am meisten verbreiteten zweikanaligen System gleichgesetzt, was aber der Bedeutung nach nicht korrekt ist.

Genau genommen müssen alle Surround-Verfahren, Wellenfeld-Synthese und Ambisonic auch unter dem Begriff mitgeführt werden, da sie versuchen, ein räumliches Klangbild mit unterschiedlichen Ansätzen und gegenüber 2-Kanal-Wiedergabe erhöhtem Aufwand, aber auch erhöhter Genauigkeit erzielen wollen.

5.2 2-Kanal Stereophonie

5.2.1 Wiedergabe

Bei zweikanaliger Stereophonie gilt als Wiedergabestandard, an dem auch die Abmischungen orientiert sind, das Stereodreieck.

Dabei bilden die beiden Lautsprecher und der Hörer ein gleichseitiges Dreieck. Zur Verbindungslinie zwischen der Mitte zwischen den Lautsprechern und dem Hörer sollte der Raum symmetrisch sein, damit die beiden Signale mit den gleichen Bedingungen (Raumanteil, Zeitverhalten des Halls, Färbung, Pegel) beim Hörer ankommen.

Bei größerer Entfernung zu den Lautsprechern werden die empfundenen Winkel kleiner, das Hörbild bewegt sich in Richtung Monophonie, bei geringerer Entfernung ist der Seiteneindruck übertrieben.

Seitliche Abweichung führt zum Umklappen der gehörten Positionen zu dem nähergelegenen Lautsprecher. Dieser Effekt ist um so stärker, je näher man bei den Lautsprechern ist.

Gerade bei kurzen Hörentfernungen und bei Zeitdifferenzstereophonie kann es zu einem gefürchteten „Loch in der Mitte" kommen. Die Abbildung der Phantommitte wird instabil gegen kleinste seitliche Bewegungen und fast alle anderen Schallquellen werden sehr nahe bei einem der Lautsprecher lokalisiert.

5.2.2 Pegelstereophonie

Bei dieser Lokalisierungstechnik wird bei zeitgleicher Wiedergabe auf beiden Kanälen mit Pegelunterschieden der beiden Kanäle gearbeitet. Sind die Pegel gleich, so nimmt man eine Phantomschallquelle in der Mitte der beiden Lautsprecher wahr. Ansonsten wandert die Lokalisierung zu dem Lautsprecher, der einen höheren Pegel der Schallquelle hat. Ab ca. 18 dB Unterschied hört man die Quelle ausschließlich von dem lauteren Lautsprecher kommend.

Polymikrofonie und Pan-Pot

Wenn mit mehreren nah positionierten Mikrofonen – oder bei elektronischen Quellen direkt verbunden [1]– die einzelnen Schallquellen mit minimalem Übersprechen so weit wie möglich einzeln aufgenommen werden, kann man im Mischpult über das so genannte Pan-Pot (**Pan**orama **Pot**entiometer) die Pegelverhältnisse stufenlos einstellen. Damit hat man eine feine Kontrolle, wo auf der Stereobasis die entsprechende Quelle lokalisiert werden soll.

Bei den meisten Rock- oder Pop-Aufnahmen wird auf diese Art die Verteilung der verschiedenen Signale auf der Stereobasis künstlich durch die Mischung hergestellt.

Insgesamt ist zu beachten: Bei der Pegelstereophonie gibt es Lokalisierung nur in der Lautsprecherbasis.

XY-Technik

Durch geeignete Anordnung von zwei koinzidenten (also in der Regel bei in der Ebene vor den Mikrofonen verteilten Schallquelle mit zwei exakt übereinander angeordneten) Mikrofonkapseln mit einer Richtwirkung aus der Liste der Druckgradientenempfänger kann direkt aus den Mikrofonsignalen eine Pegelstereophonie entstehen. Man ordnet die Mikrofone je einem Stereokanal zu.

Wichtig dabei: Je weiter die Winkel der Mikrofonausrichtung sich unterscheiden, um so weiter wird das Stereobild bei der Wiedergabe. Im Gegensatz zu einer weit verbreiteten Annahme verringert sich aber damit der Winkel, unter dem eine Schallquelle während der Aufnahme aus der Mitte positioniert sein muss, um an der gleichen Stelle lokalisiert zu werden.

Anders herum: Wenn die Schallquellen weit verteilt sind (große Winkel), müssen die Mikrofone *enger* zueinander ausgerichtet sein, als wenn die Quellen eng bei einander stehen. Man darf sie also nicht optisch nach der Breite der Quelle ausrichten – im Gegenteil!

Blumlein-Anordnung Darunter versteht man, dass man zwei Mikrofone mit Acht-Charakteristik im Winkel 90° anordnet. Quellen, die bei ± 45° angeordnet sind, werden dann nur von einem Lautsprecher wiedergegeben, also ±30°. Die volle Stereobreite wird schon bei einer Pegeldifferenz von 18 dB erreicht, also bei ±38°. [2].

Alle Quellen, die in einem Winkel zwischen ±45°, und ±135°) liegen, erscheinen mit gegensätzlicher Polarität auf beiden Kanälen und werden daher diffus außerhalb der Lautsprecherbasis lokalisiert. Für einen reinen Raumanteil kann das relativ unproblematisch sein.

Zu beachten ist unbedingt, dass keine Rückwärtsdämpfung gegeben ist. Schallquellen hinter der Mikrofon werden im gleichen Pegel wiedergegeben. Deren Winkel wird seitenverkehrt abgebildet.

Angewinkelte Nieren Wenn an einem Ort (theoretisch) bzw. übereinander Nierenkapseln im Winkel zueinander angeordnet werden, kann man deren Signale ebenfalls direkt als rechtes und linkes Signal bei der Wiedergabe verwenden.

[1] Die dabei typischerweise auftretenden Probleme, wie Brummschleifen, Impedanz- und Anpassungsprobleme kann eine DI-Box vermeiden, siehe Kapitel 6.5, Seite 86.

[2] Siehe `http://www.sengpielaudio.com/BekannteStereoMikrofonsystemeUndIhreWinkel.pdf`, Zugriff 2016-05-02 auf [24]

Der Aufnahmewinkel, der auf die Außenposition der Stereowiedergabe abgebildet wird, ergibt sich durch den Abfall im Pegel des weggerichteten Mikrofone um 18 dB gegenüber dem zugerichteten Mikrofon.

Als Anhaltspunkt hier der Aufnahmewinkel in Abhängigkeit vom Winkel zwischen den Kapseln[3], beliebige Werte kann man mit einer Applikation[4] auf sengpielaudio.com berechnen.

Mikrofon-Winkel	Aufnahmewinkel
60°	242°
61°	240°
80°	210°
90°	196°
102°	180°
120°	158°
127°	150°
158°	120°

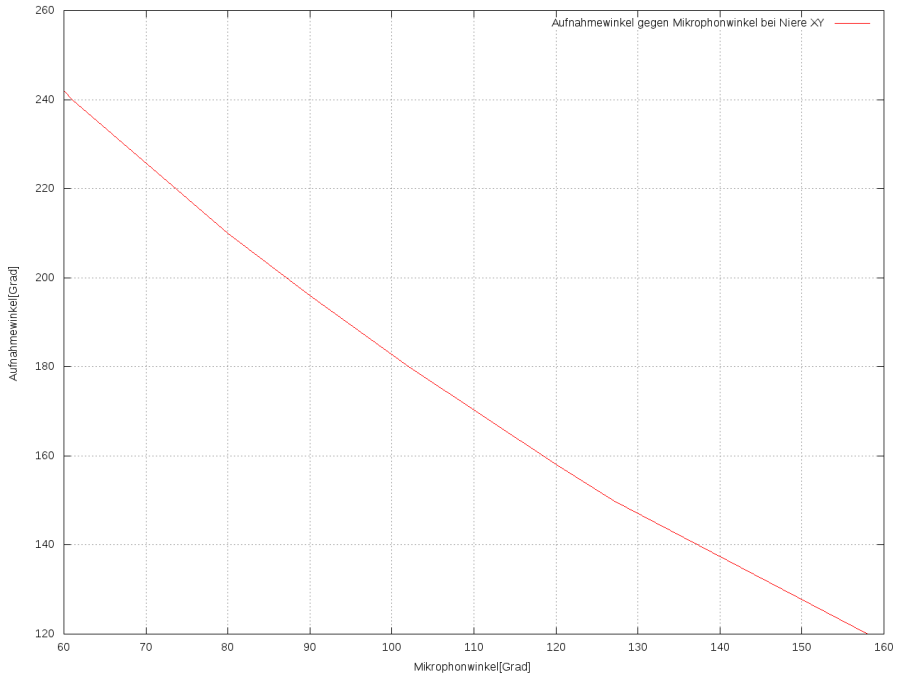


Abbildung 5.1: XY-Technik: Aufnahmewinkel in Abhängkeit vom Mikrofonwinkel

Man sieht hier sehr schön, dass der Winkel zwischen den Mikrofonen und der Aufnahmewinken *gegenläufig* sind. Erst ab einem Winkel von 102° der Mikrofone ist der Aufnahmewinkel auf 180° eingeschränkt, also den vorderen Halbkreis!

Für zwei Mikrofonwinkel ist die Geometrie hier nochmal skizziert. Man muss *nicht* die Mikrofone auf die äußeren Ränder des Aufnahmebereichs richten. Im Falle des 60° Winkels der Mikrofone befinden diese sich sogar *hinter* den Mikrofonen. Genau genommen nicht in 180° wie es aussieht, denn vom jeweils zugehörigen Mikrofon

[3] aus `http://www.sengpielaudio.com/Stereo-Mikrofonsysteme.pdf` und `http://www.sengpielaudio.com/BekannteStereoMikrofonsystemeUndIhreWinkel.pdf`, Zugriff 2016-05-02, siehe [24]

[4] `http://www.sengpielaudio.com/HejiaD.htm`, Zugriff 2016-05-02 siehe[24]

sind es 190°. In dem Fall befindet sich die Grenze des Aufnahmebereichs ziemlich genau zufällig hinter dem Mikrofon für die jeweils andere Stereoseite.

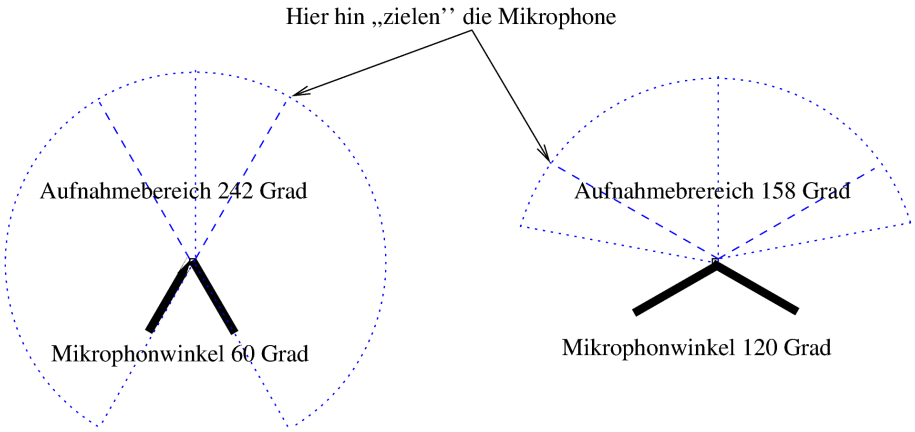


Abbildung 5.2: Beispiele: Aufnahmebereich von zwei Mikrohonen mit Nierencharakteristik

Andere Richtcharakteristiken Wenn man stärker richtende Kapseln verwendet, verringert sich der Aufnahmebereich bei gleichem Winkel zwischen den Kapseln. Hier eine Tabelle für Hypernieren-Kapseln.

Mikrofon-Winkel	Aufnahmewinkel
7°	210°
30°	180°
54°	150°
80°	120°
109°	90°
143°	60°
180°	30°

Man erkennt, dass mit der 143° Anordnung tatsächlich Abbildungswinkel = Aufnahmewinkel realisierbar ist, wie die ursprüngliche Idee der 2-Kanal Stereophonie es vorsah.

Insgesamt ist zu beachten: Es ist schwer, mit XY-Technik bei Verwendung von konventionellen Nierenkapseln außer bei sehr breiten Aufnahmewinkel die volle Basisbreite auszunutzen.

Neben den theoretischen Schwächen ist noch zu beachten, dass das in der Regel wichtigste Signal in der Mitte von beiden Mikrofonen nicht frontal aufgenommen wird. Das führt meist zu eine Verfärbung, insbesondere die Höhen und damit die Klarheit können ausgerechnet bei diesem Signal fehlen.

Ein weiteres Problem aller XY-Anordnungen ist, dass man mit Druckgradientenempfängern arbeitet, denen – zumindest auf große Entfernung – der tiefe Bassbereich meist fehlt.

XY-Mikrofonanordnungen gibt es teilweise fertig aufgebaut in einem Gehäuse.

Vorteilhaft ist, dass nachträglich in die Stereobreite eingegriffen werden kann. Man kann die Signale beliebig miteinander mischen, da sie Phasen- und Zeitgleich sind. Auf die Art kann man einzelne Instrumente stereophon aufnehmen und in der Mischung gezielt einem Teil der Stereobasis zuordnen. Statt links und rechts positioniert man sie mit Pan-Pot so, wie man es braucht.

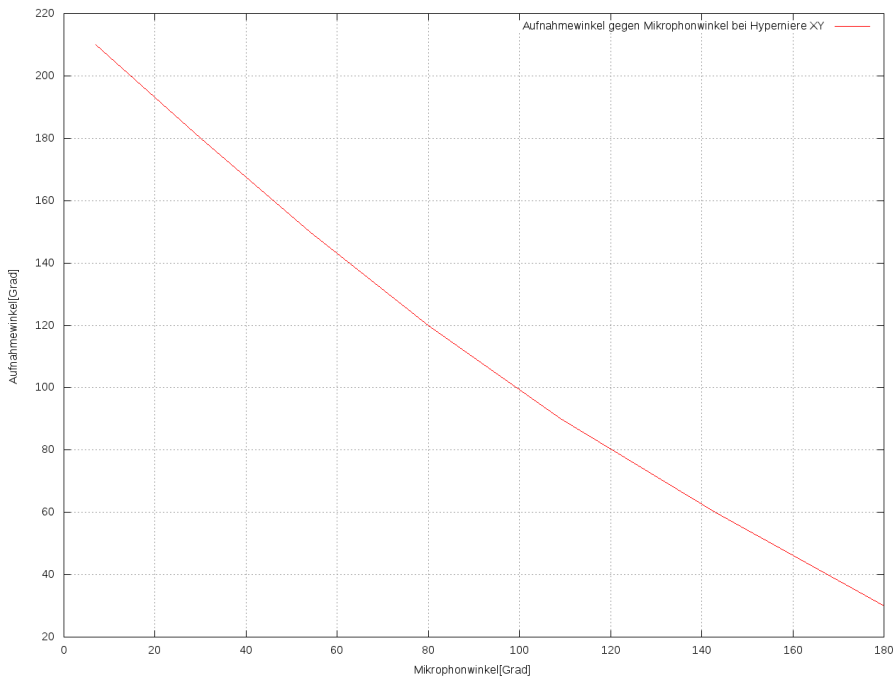


Abbildung 5.3: XY-Technik: Aufnahmewinkel in Abhängigkeit vom Mikrofonwinkel bei Hypernieren-Charakteristik

MS-Technik

MS steht hier für Mitten und Seitensignal (nicht zu verwechseln mit SM...). Man arbeitet wie bei XY-Technik mit zwei Mikrofonen, die koinzident sind. Das Seitensignal wird mit einer Kapsel mit achtförmiger Richtcharakteristik erzeugt, das Mittensignal mit einem Mikrofon, dass zur Mitte ausgerichtet ist.

Eine Seite des Stereobildes entsteht durch Summen- die andere durch Differenzbildung, eventuell im Gesamtpegel normiert.

Eine Schallquelle in der Mitte, oft eine besonders wichtige, wird im Gegensatz zur XY-Technik frontal aufgenommen, wo der Frequenzgang meist optimal ist.

Das Mittensignal kann von einem reinen Druckempfänger kommen, womit die gute und konsistente Basswiedergabe dieser Wandler auch für eine Koinzidenztechnik zur Verfügung steht.

Das Mittensignal ist identisch mit dem Gesamtsignal bei monophoner Wiedergabe, da das Seitensignal bei der Summierung ausgelöscht wird. Damit bestimme es auch alleine den Summenfrequenzgang.

Durch Änderung des Pegels des Seitensignals kann man die Stereobreite der Wiedergabe gezielt einstellen.

Um eine unterschiedliche Aufnahme von Vorder- und Rückseite der Mikrofonanordung zu erhalten, kann das Mittensignal von einem gerichteten Mikrofon kommen, von Niere bis hin zu Richtkeulen. Letzteres wird bei On-Location Ton von Filmaufnahmen manchmal eingesetzt.

Bei allen MS-Kombinationen ist für ideale Mikrofone ohne Interferenzteil eine mathematisch äquivalente XY-Kombination berechenbar. Die Kombination von Acht und Kugel ist z.B. äquivalent zu zwei gegeneinander gerichteten Nieren.

Aus Pegelstereofonen Signalen wird manchmal durch Matritzierung (wieder Summe und Differenz) nachträglich ein M- und S- Signal erzeugt, um die Stereoabbildung einfach

bearbeiten zu können, teilweise auch pegelabhängig. Bis zur Abmischung wird daraus das geänderte Stereosignal wieder hergestellt.

5.2.3 Zeitdifferenzstereophonie

Neben der Pegelunterschieden wertet unser Gehör auch die zeitliche Korrelation der Signale aus, um eine Richtung zu erkennen. Bei zeitlichen Unterschieden ab 1,5 ms, entsprechend ca. 0,5 m Wegdifferenz bei 340 m/s Schallgeschwindigkeit wird die Schallquelle ausschließlich in Richtung der früheren Schallquelle wahrgenommen. Darüber kommt es zu einer Delokalisierung und bei sehr hohen Abständen zu einem hörbaren Echo. Dabei gilt das Prinzip der ersten Wellenfront: diese bestimmt die Lokalisierung der Quelle, die späteren Signale werden dem Umfeld zugeordnet (z.B. Raumhall). In der Aufnahmetechnik spielt das keine Rolle, bei der Wiedergabe kann man damit zusätzliche Quellen einsetzen, ohne die Lokalisierung zu ändern.

Derzeit wird selten mit einer künstlichen Verzögerung gearbeitet, um bei der Mischung darüber ein Stereoabbild zu erreichen.

Die Abbildung über Zeitdifferenzen ist sehr schlecht Mono-kompatibel, da das erste und das verzögerte Signal ein Kammfilter bilden, dass den Klang je nach Aufnahmerichtung färbt. Der unkorrelierte Raumhall schwächt den Effekt ab.

Groß-AB-Technik

Bei der Groß-AB-Technik werden in einem relativ großen Abstand zu den Quellen zwei Mikrofone so aufgestellt, dass alle Quellen in etwa die gleichen Pegel auf beiden Kanälen haben, aber zeitversetzt aufgenommen werden.

Vorteilhaft ist, dass man mit Kugelcharakteristik arbeiten kann. Dadurch ist der Basspegel realistisch, ohne Abstandseffekte und Einschränkung der Bandbreite nach unten. Zusätzlich ist der mit aufgenommene Raumhall nur durch die Interferenzeffekte am endlich großen Durchmesser der Mikrofone verfärbt (Freifeld- gegen Diffusfeldentzerrung).

Wie der Winkel bei XY-Technik gibt es hier durch den Abstand einen Parameter, mit dem der Aufnahmebereich eingestellt werden kann. Bei 0.5 m werden die 180° gerade auf der Stereobasis aufgeteilt, daher ist ein kleinerer Abstand niemals ausreichend. Daher lässt sich keine kompakte transportable Lösung (Hand-Recorder) sinnvoll in AB-Technik realisieren.

Die Wiedergabe des Raumklangs ist mit dieser Technik bei größeren Abständen derart schwach korreliert, dass er zum Teil delokalisiert und damit einhüllend wahrgenommen wird. Das führt zu einer sehr überzeugenden Abbildung der Aufführung in einer Halle.

Bei der Wiedergabe gibt es zwei Einschränkungen:

1. Die Abbildung wird zu den Außenpositionen hin zunehmend nichtlinear, man sollte daher am Besten nur 85% der Breite ausnutzen.

2. Die Abbildung ist sehr empfindlich gegen Abweichungen der Hörposition aus der Mittelsenkrechten. Das Klangbild kippt zum näheren Lautsprecher. Man darf nicht vergessen, dass 0,5 m Wegunterschied ausreichen, um die Lokalisierung auf einen Lautsprecher zu bewegen.

5.2.4 Kombinationen von Pegel- und Zeitdifferenz

Bei der Kombination von Pegel- und Zeitdifferenz-Stereophonie ist darauf zu achten, dass man mit den beiden Seitenunterschieden keine widersprüchlichen Lokalisierungsreize gibt. Das wäre z.B. der Fall, wenn man Richtmikrofone im Abstand nach innen ausrichtet.

ORTF, EBS & Co

Die beiden Richtungsinformationen werden bei diesen Mikrofonanordnungen so kombiniert, dass sie gleichsinnig sind. Man verwendet gerichtete Mikrofone in einem Abstand, der kleiner als bei groß-AB ist und richtet sie mit einem passenden Winkel nach außen, um die Abbildung damit auf das gewünschte Maß zu bringen. Man erhält einen Teil der Vorteile von XY- und AB-Technik. Bei der Aufnahme sind diese Kombinationen ähnlich kompakt wie XY-Technik. Bei der Wiedergabe ist die Lokalisierung stabiler als bei AB-Technik, da Pegelunterschiede mit verwendet werden.

Zwei Nachteile der AB- und XY-Technik werden aber kombiniert:

- Man muss beide Signale getrennt lassen, um Kammfilter-Effekte zu vermeiden, so dass die Abbildungsbreite bei der Aufnahme festgelegt wird.
- Man kann keine Druckempfänger verwenden, mit allen Auswirkungen zur Aufnahme des Bassanteils.

Je nach gewünschter Abbildungsbreite hat man hier drei Freiheitsgrade: Abstand der Mikrofone, Winkel, verwendete Richtcharakteristik. Einige ausgetestete Kombinationen sind entwickelt worden und tragen Namen. Die hier angegebenen Kombinationen werden jeweils mit Nierencharakteristik realisiert.

Abk.	Erklärung	Winkel	Abstand	Aufnahmebereich	Anteil Pegel	Anteil Laufzeit
NOS	Nederlandse Omroep Stichting	90°	30 cm	81°	42%	58%
EBS	Nach Eberhard Sengpiel	90°	25 cm	90°	47%	53%
DIN	Vorschlag einer deutschen Norm	90°	20 cm	101°	53%	47%
RAI	Radio Audizioni Italiane Radiotelevisione Italia	100°	21 cm	93°	53%	47%
ORTF	Office de Radiodiffusion- Télévision Française	110°	17 cm	96°	61%	39%

[5]

Klein-AB

Wie bei Groß-AB werden Druckempfänger eingesetzt, aber gezielt so nahe an der Quelle, dass auch deutliche Pegelunterschiede entstehen. Damit lassen sich vor allem ausgedehnte Instrumente (Flügel...) auf das Stereobild verteilen. Wie bei Groß-AB liegt aber die Breite und Stereoposition bei der Aufnahme fest, da sonst Kammfiltereffekte auftreten.

[5] Aus `http://www.sengpielaudio.com/BekannteStereoMikrofonsystemeUndIhreWinkel.pdf`, Zugriff 2016-05-06, [24]

5.2.5 Alternative Mikrofonanordnungen

Decca Tree

Diese Anordnung wurde durch Probieren gefunden und kennt keine theoretische Herleitung. Benannt ist sie durch die Schallplattenfirma Decca, deren Ingenieure sie entwickelten.

Man verwendet zwei Kugelmikrofone in mindesten 2 m Abstand, also für Groß-AB viel zu weit auseinander und zusätzlich in der Mittelsenkrechten etwa 1 m nach vorne versetzt ein Mittenmikrofon, ebenfalls in Kugelcharakteristik. Um eine gleichmäßige Winkelabhängigkeit der Höhenwiedergabe und ein allmähliches Ansteigen des Freifeldfrequenzganges durch Reflektion zu erreichen, kann man auch in ca. 5 cm große Kugeln eingelassene Mikrofone verwenden, wie bei originalen Neumann M50 oder auch durch Kombination von Mikrofonen und passenden durchbohrten Kugeln.

Die beiden seitlichen Mikrofone werden auf ihre jeweilige Seite gemischt, das Mittenmikrofon in die Mitte, alle Pegel bleiben gleich.

Die genauen Abstände sind an die Gegebenheiten der Aufnahmesituation anzupassen.

Das Klangergebis entspricht in etwa dem eine AB-Kombination mit etwas stabileren Mitten. Die einzelnen Quellen werden vor allem extrem links und rechst sowie in der Mitte lokalisiert, mit Lücken dazwischen. Da die Mitte aber wegen der Laufzeit- und Pegelunterschiede der Mikrofonsignale immerhin recht deutlich und stabil abgebildet wird, fällt das weniger stark ins Gewicht als bei übergroßen AB-Kombinationen mit auffälligem Loch in der Mitte.

Der Decca Tree wird vor allem in mindestens 3 m Höhe über dem Dirigenten bei Orchestern verwendet. Dies ist in etwa halbkreisförmig um ihn angeordnet. Für linear verteilte verteilte Schallquellen ist er in der Form nicht optimal und wird trotz des Namens linear angeordnet.

Teilweise kommen extrem rechts und links vor der Schallquelle noch „Outrigger", ebenfalls Druckempfänger, die hart links und rechts im Panorama gemischt werden. Dann wird teilweise auch die Panoramaposition der Außenmikrofone des Decca Trees nicht mehr ganz außen belassen. Eine sehr erschöpfende Darstellung der Geschichte und Eigenschaften des Decca Trees findet sich bei Gernemann.[7]

Mikrofonvorhang

Hierbei werden mehrere Mikrofone äquidistant in einiger Entfernung vor der ausgebreiteten Schallquelle aufgehängt und in der Mischung per Pan-Pot gleichmäßig auf der Stereobasis verteilt. Es gibt aber im Gegensatz zur Polymikrofonie keine 1:1 Anordnung der Mikrofone zu einzelnen Schallquellen oder Gruppen.

5.2.6 Hauptmikrofone und Stützen

Aus verschiedenen Gründen wird bei komplexen ausgedehnten Schallquellen wie Orchester oder Chor oft eine Kombination einer der genannten Mikrofonanordnungen, die in dem Fall Hauptmikrofon genannt wird, mit mehreren Mikrofonen näher an den einzelnen Schallquellen oder deren Gruppen, die dann Stützmikrofone genannt werden, angewendet.

Die Hauptmikrofone haben den Zweck, den Gesamtklang in der vorhandenen Umgebung darzustellen, insbesondere mit der hoffentlich guten Akustik der Raumes (wenn vorhanden). Wegen der offenen Abbildung beim Hören werden gerne Laufzeit-Mikrophonanordnungen verwendet.

Durch die Stützmikrofone kann man zu schwache Signale anheben, natürlich auch zeitlich veränderlich je nach meist musikalischer Notwendigkeit. Das ist vor allem bei Solos oder bei einem neuen Einsatz einer Stimme von Vorteil – der optische Hinweis, dass sich jemand vorbereitet, fehlt ja bei der Aufnahme im Gegensatz zum Live-Ereignis. Die eventuelle Höhenschwäche der von den zentralen Quellen seitlich beschallten Hauptmikrofone bei X/Y-Technik lässt sich auch durch das Zumischen eines nahe aufgestellten Stützmikrofons ausgleichen. Ausgerechnet wichtige Solo-Stimmen oder -Instruments wären sonst besonders betroffen.

Die Stützmikrofone werden in der Regel nicht verzögert, so dass deren Signale vor dem entsprechenden Signal aus dem Hauptmikrofon wiedergegeben wird. Da dies nach dem Gesetz der ersten Schallfront die Lokalisierung entscheidet, wird bei Laufzeitstereophonie des Hauptmikrofons damit auch die Stabilität der Lokalisierung der hervorgehobenen Signale verbessert, da sie über Pegelstereophonie erzeugt wird.

Der Übergang zur Polymikrofonie ist fließend. Wenn sich die Mischung bei Stummschaltung der Hauptmikrofonsignale nicht merklich ändert, hat man aber in der Regel einen Fehler gemacht.

Bei extrem schlechter Akustik oder intolerablem Störschall scheidet die Verwendung der Hauptmikrofone aus. Dann lässt sich nur mit Nahmikrofonierung und Polymikrofonie arbeiten, den echten Raum ersetzt man dann besser durch einen künstlich erzeugten passend parametrisierten Nachhall.

5.2.7 Ohrbezogene Signale

Bei Arbeit mit ohrbezogenen Signalen wird neben Pegel- und Zeitdifferenz noch eine Änderung des Frequenzgangs der Kanäle untereinander als Mittel zur Lokalisierung eingesetzt. Wie beim natürlichen Hören werden vor allem die Höhen auf der abgewandten Seite am Ort des Ohres abgesenkt. Den genauen Zusammenhang, der noch dazu von der individuellen Körpergeometrie abhängt, beschreibt die Kopfbezogene Übertragungsfunktion HRTF (**H**ead **r**elated **t**ransfer **f**unction).

Da beim Hören auch der Aufnahme über Lautsprecher dieser Effekt erneut auftritt, sind diese Techniken optimal nur bei Wiedergabe über Kopfhörer einsetzbar, da jeder Kanal nur am jeweiligen Ohr wiedergegeben werden sollte. Sonst kommt es an einem Ohr zur doppelten Anwendung der HRTF und am anderen Ohr zu Anwendung beider unterschiedlicher Funktionen. Das führt zu Verfärbungen und das Übersprechen ist viel zu stark, da es bei Aufnahme und Wiedergabe auftritt.

Trennkörper

Eine grobe Variante zur Erzeugung von ohrbezogenen Signalen setzt eine Trennkörper ein, um die Abschattung der Höhen an der abgewandten Seiten zu erreichen. Zum Einsatz kommen Druckempfänger. Übliche Systeme sind

Die Kugel etwa in Kopfgröße, reflektierend oder absorbierend. Die Mikrofone sitzen an der Oberfläche oder sind darin eingelassen.

Eine absorbierende Scheibe zwischen den Mikrofonen, auch Jecklin-Scheibe[6] oder OSS-Technik genannt. Die vorgeschlagene Größe der Scheibe richtete sich zunächst mit 30 cm in etwa nach der Kopfgröße, mit 17 cm Mikrofonabstand. Nachdem sich

[6] Nach Jürg Jecklin, [9], Seite 54

herausstellte, dass die empfundene Abbildung wegen zu geringer Unterschiede der Kanäle zu schlank war, wurde die Empfehlung zu größeren Dimensionen geändert.

Kunstkopf

Mit dem Kunstkopf versucht man, den natürlichen Hörvorgang nachzubilden und am Trommelfell des Hörers möglichst genau das akustische Ereignis am Platz des Kunstkopfs während der Aufnahme nachzubilden. Dazu wird auf akustischem Weg eine HRTF nachgebildet.

Die Lokalisierung von Schallquellen außerhalb der üblichen Stereobereiche (hinten, oben, etc.) funktioniert bei Kopfhörerwiedergabe verblüffend gut, weniger die von Schallquellen, die von vorne kommen. Der Grund ist, dass bei Hören der Kopf unwillkürlich bewegt wird und bei der Lokalisierung das Wissen um die Kopfstellung und entsprechend zu erwartende Änderung der HRTF mit in den Wahrnehmungsprozess eingebunden ist. Da mit der Aufnahme die Winkelbezüge fixiert werden, passt das Gehörte nicht zu den Voraussetzungen der präzisen Lokalisierung.

Eine Schwäche ist die Tatsache, dass die reale HRTF individuell verschieden ist und der Kunstkopf nur einen (hoffentlich) mittleren Kopf darstellen kann.

Das Signal lässt sich auch kaum sinnvoll verändern, ohne seine Wirkung zu verlieren.

5.3 Verallgemeinertes Stereo: Surround

Alle Surround-Techniken erweitern die mögliche Abbildung über den linearen vorderen Bereich der 2-Kanalstereophonie hinaus. Zusätzlich wird versucht, im vorderen Bereich die Lokalisierung gegen Ortsänderungen des Hörers zu stabilisieren, den sogenannten Sweet Spot zu vergrößern.

5.3.1 5.1

Das erste massenhaft eingesetzte Surround-Verfahren mit tatsächlich unabhängigen Kanälen ist das 5.1 Verfahren. Die Zahlen bedeuten, dass 5 Vollbereichs-Lautsprecher eingesetzt werden und ein Subwoofer-Kanal für drastische Basseffekte.

Die Umsetzung des Bass-Anteils kann von der ursprünglichen Realisierung abweichen, ohne das Ergebnis zu verfälschen. Sinnvolle Varianten sind

ohne Subwoofer , bei denen der Bassanteil auf die vorderen Lautsprecher mit verteilt wird. Das ist möglich, wenn die vorderen Lautsprecher bis in den tiefsten benötigten Frequenzbereich arbeiten und vor allem genug Pegel aufbringen können. Das stellt hohe Anforderungen an deren Belastbarkeit und erfordert auch ausreichend große Lautsprecher für diese Bereiche. Optisch ist das vor allem im Heimbetrieb nicht immer erwünscht.

Basswiedergabe nur über den Subwoofer , mit fünf reinen Satelliten ohne Tiefbasswiedergabe. Eine Frequenzweiche und Summierung der Bassanteile führt zur Wiedergabe aller Bassfrequenzen unter einer gegebenen Trennfrequenz über einen Subwoofer (eventuell auch mehrere verteilte, aber alle mit dem gleichen Signal). Der THX Standard sieht als Trennung 80 Hz vor, andere Trennfrequenzen unter ca 170 Hz können aber auch eingesetzt werden, wenn die Subwoofer wie ohnehin wünschenswert mit ausreichend niedrigem Klirrfaktor eingesetzt werden können, dass

ihre Oberwellen nicht zu einer Ortbarkeit führen. Die Satelliten können in dem Fall relativ klein ausfallen.

In beiden Fällen wird das Bass-Signal anders auf Kanäle verteilt, als es in den Mediendaten enthalten ist. Das Verfahren nennt man Bass-Management.

Die vorderen rechten und linken Lautsprecher haben die gleiche Position wie im 2-Kanal Stereo-Fall.

In der Mitte ist ein weiterer Front-Lautsprecher angebracht, der sogenannte Center Speaker. Seine wichtigste Funktion in der Film-Anwendung ist es, die Lokalisierung der typisch zentral dargestellten Person im Dialog auf die Mitte des Hörbildes festzulegen, ohne die Instabilität der Phantomquelle gegenüber suboptimale asymmetrische Hörpositionen. Dies ist wichtig, um die Qualität der Raumabbildung auf den verschiedenen Sitzplätzen in einem Kino zu gewährleisten.

Es gibt mehrere Ansichten, wie in der Kombination der rechten, linken und mittleren Lautsprecher bei der Abmischung umgegangen werden soll. Man kann auch zwischen einem Seiten- und dem Center-Lautsprecher Phantomquellen analog zur 2-Kanalstereophonie erzeugen. Dabei kommt es aber in den Höhen zu stärkeren Kammfrequenzgang-Effekten als bei der üblichen 2-Kanaltechnik, da die Abschattung der Höhen zum abgewandten Ohr durch den Kopf nicht im gleichen Maß stattfindet. Teilweise wird ein 2-Kanalstereobild mit einem getrennten Centersignal kombiniert, letzteres typischerweise der Dialog. Das funktioniert aber nur sinnvoll, wenn das 2-Kanalstereophone und das Centersignal nicht miteinander verbunden sind. Sonst ist die räumliche Abbildung extrem inkonsistent, sobald das L-R-Signal bei asymmetrischer Hörposition in der Mitte verschoben ist, das Centersignal jedoch nicht.

Das Setup wird vervollständigt durch zwei Surroundkanäle, die idealerweise im Winkel von 110° angeordnet sind. Diese dienen dazu, die gesamten 360° der Ebene der Lokalisation zugänglich zu machen. Untersuchungen haben ergeben, dass die Phantomquellen außerhalb der Position der Frontallautsprecher zwar gebildet werden, aber extrem instabil lokalisiert werden. Bei geeigneten Signalen ist aber immerhin eine Einhüllung zu erreichen, vor alle durch Umgebungsgeräusche und Raumhall auf der Aufnahme. Wenn der Anteil des Raumklangs im Hörraum nicht zu hoch ist, kann das bei Filmwiedergabe den akustischen Eindruck deutlich verbessern, in der gezeigten Szene dabei zu sein. Deswegen ist es für Surround-Wiedergabe in der Regel sinnvoll, einen stärker gedämpften Raum zu verwenden, als das bei 2-Kanalstereophonie notwendig ist. Je nach Art der Wiedergabe gibt es zwei Anordnungen der Wiedergebenden Lautsprecher

Kino Die drei vorderen Lautsprecher befinden sich an den Seiten der Leinwand sowie in der Mitte, möglichst hinter der akustisch transparenten Leinwand. Die Surround-Lautsprecher sind vorteilhaft als jeweils eine Reihe gleicher Lautsprecher auf der linken und rechten Seite des Raumes angeordnet, so dass der Eindruck auf allen Sitzplätzen möglichst gleichmäßig gut räumlich ist. Das Hauptziel ist die Einhaltung einer ausreichend guten Qualität der Reproduktion auf allen Sitzplätzen, wobei Kompromisse in Kauf genommen werden.

Studio/Zuhause Alle Lautsprecher sind in der gleichen Entfernung vom der Haupthörposition angebracht. Die Reproduktion an dieser Stelle wird optimiert. Die Laufzeit und der bei gleichem Programmpegel erreichte Pegel am Hörplatz sind bei allen Kanälen gleich. Im Winkel von 110° stehen die beiden Surroundlautsprecher.

Der Kreis in der Graphik ist niche die Darstellung einer vorteilhaften Raumgeometrie, er soll nur den gleichen Abstand aller Lautsprecher vom Hörplatz andeuten.

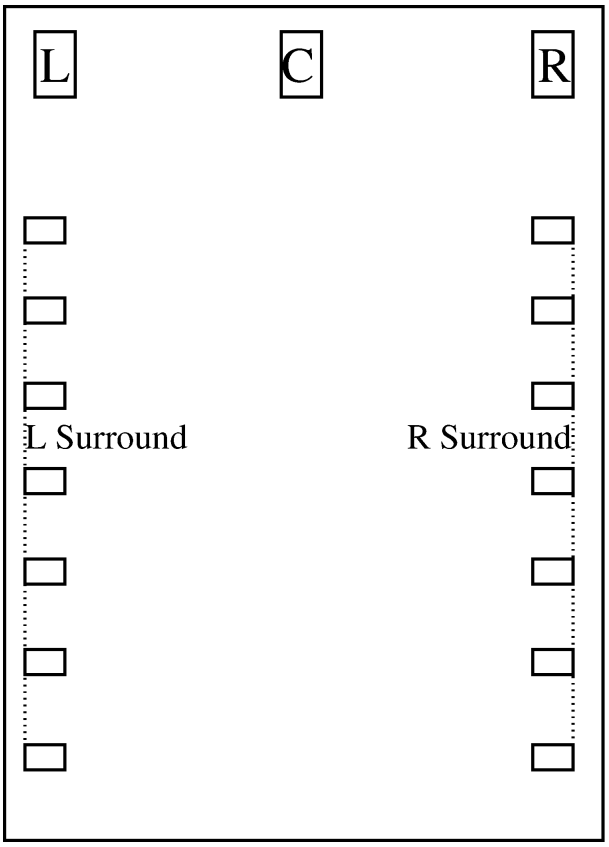


Abbildung 5.4: 5.1 Lautsprecherpositionen im Kino

Polymikrofonie

Mittels Polymikrofonie und erweiterter Panpot-Technik kann man einzelne Signale getrennt aufnehmen und gezielt im Rundum-Panorama verteilen, sinnvollerweise entweder auf einen oder zwischen zwei Lautsprechern. Dabei ist zu beachten, dass die Phantomquellen außerhalb des vorderen Bereichs instabil sind.

Mikrofonanordungen

[7] Wie bei der 2-Kanalstereophonie gibt es Anordnungen zur Pegel- oder Laufzeitlokalisierung sowie Kombinationen. Teilweise werden die 2-Kanalanordnungen analog angewendet. Die Lokalisierungsmechanismen bleiben die selben, die Größenordnungen sind teilweise abweichend, wie Gernemann zeigte.[8]

Pegellokalisation (koinzident) Die koinzidenten Anordnungen leiden alle unter dem gleichen Problem: mit den Kugelfunktionen erster Ordnung (und damit allen gängigen normalen Richtcharakteristiken ohne klanglich färbenden Interferenzverfahren) erlauben keine vollständige Trennung der 5 Kanäle, so dass ein erhebliches Übersprechen verbleibt. Das gilt ganz besonders bei den 3 vorderen Kanälen mit nur 30° Winkelabstand. Die engen Charakteristiken haben gegenüber der Niere eine verstärkte Abbildung der 180°-Richtung. Die Abbildung in der Ebene ist laut Theorie der Kugelfunktionen mit 3 linear unabhängigen Signalen möglich. Diese können aus

[7] Nach dem Kapitel „Allgemeine Betrachtungen zur Mehrkanal-Stereofonie", Mikrofonaufsätze[36] und Wittek, „Mikrofontechniken für Atmoaufnahme in 2.0 und 5.1 und deren Eigenschaften" [34]

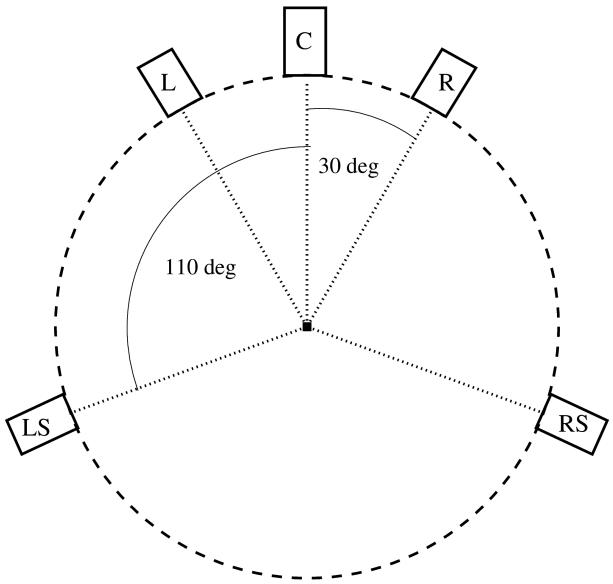


Abbildung 5.5: 5.1 Lautsprecherpositionen im Studio und Zu Hause

3 Nieren-Mikrofonen oder mathematisch idealerweise gleichwertig einem Doppel-MS-System gewonnen werden. Letzteres kombiniert die Blumlein-Anordnung und eine koinzidente Kugel. Sinnvollerweise matritziert man daraus die Kanäle L, R, L Surround und R Surround.

Versuche mit Mikrofonen, bei denen höhere Ordnungen von Kugelfunktionen eingesetzt wurden führten wegen der doppelten Ableitung mit den entsprechenden doppelten Auslöschungseffekten meist zu Pegelverlusten mit unzumutbar hohem Rauschpegel.

Eine kommerziell erhältliche Lösung ist das Eigenmike® von MH-Acoustic[8].

Bei dem derzeit erhältlichen em32 Eigenmike® sind auf einer Kugelfläche von 8.4 cm Durchmesser 32 Mikrofonkapseln (Druckempfänger) untergebracht, die mit einer passenden Applikation matritziert werden.

In der Dokumentation [9] wird die untere Grenzfrequenz der verschiedenen Ordnungen angegeben mit

Ordnung	f_0
0, 1	30 Hz
2	400 Hz
3	1000 Hz
4	1800 Hz

Laufzeitlokalisation Diese lässt sich für die vorderen Kanäle durch eine geänderte Mischung des Decca-Trees realisieren. Dabei werden die Mikrofone auf Rechts, Center und Links gelegt. Zwei weitere Mikrofone im Abstand nach hinten können das zu einer Fünfkanalkombination erweitern. Das typische Loch zwischen Links und Center oder Rechts und Center stabilisiert die Lokalisierung der Schallquellen, da sie beim Decca

[8] `http://mhacoustics.com/products#eigenmike1`, Zugriff 2017-02-15

[9] `https://mhacoustics.com/sites/default/files/Eigenbeam%20Datasheet_R01A.pdf`, Zugriff 2017-02-15

Tree ohnehin recht deutlich auf den jeweiligen Lautsprecherort abgebildet werden. Diese Lokalisierung ist damit im Wesentlichen unabhängig von der Hörerposition.[7]

Kombinationstechniken Diese werden oft verwendet, um die Offenheit der Laufzeitlokalisation mit dem verringerten Übersprechen der Pegellokalisation zu verbinden.

Mit INA3 und INA5 werden drei oder fünf Mikrofone in Nierencharakteristik in Dreieck- oder Fünfeckanordung eingesetzt.

Verallgemeinert für flexiblere Auswahl von Richtcharakteristiken und Abständen nennt sich eine ähnliche Anordnung ASM5 (**A**djustable **S**urround **M**icrophone).

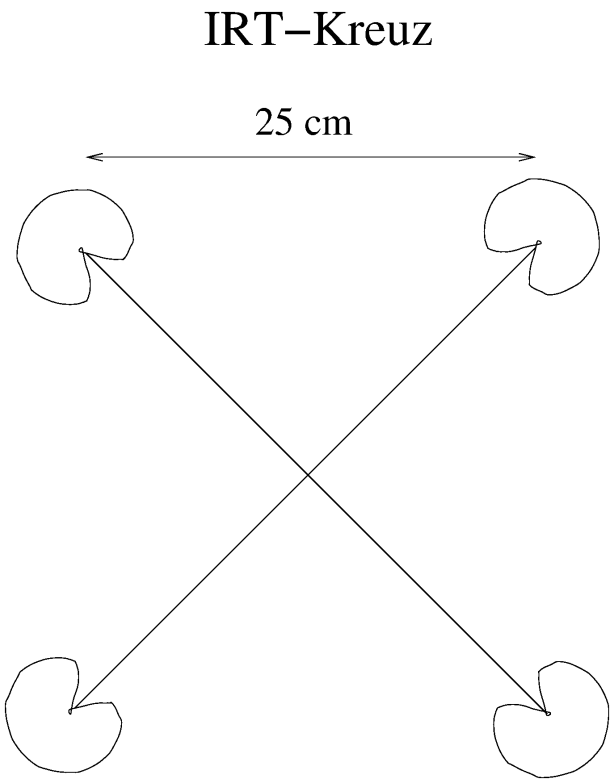


Abbildung 5.6: IRT-Kreuz

Perfekte Trennung zumindest zum 180° Winkel erlaubt das IRT-Kreuz nach M. Williams. Dabei werden 4 Nierenmikrofone jeweils im 90° Winkel mit 25-30 cm Abstand montiert. Bei passender Position der Wiedergabe ergibt sich eine gute Wiedergabe eines umhüllenden Schallfeldes. Der Umhüllungseffekt bleibt bei Verwendung von L,R, L Surround und R Surround weitgehend erhalten, die Abbildung ist aber so verzerrt, dass die vorderen Winkel gestaucht sind und umgekehrt.

Helut Wittek [35] schlägt die Verwendung von zwei variierten ORTF Kobinationen vor, eine nach vorne und eine nach hinten. Jedes Paar ist 100° angewinkelt und 10 cm getrennt, die Paare haben 20 cm Abstand. Zur besseren Trennung werden Supernieren-Mikrofone verwendet. Auch hier werden Laufzeit und Pegel zur Lokalisierung verwendet. Die Trennung der Kanäle im Pegel ist nicht vollständig wie bei IRT Kreuz, dafür ist die Anordnung derartig kompakt, dass sie als vormontiertes Gerät transportabel und auch fertig zu erwerben ist.

Dieses Setup wurde auch erweitert um die Aufnahme von Höhenkanälen, siehe Kapitel 5.3.2, Seite 82

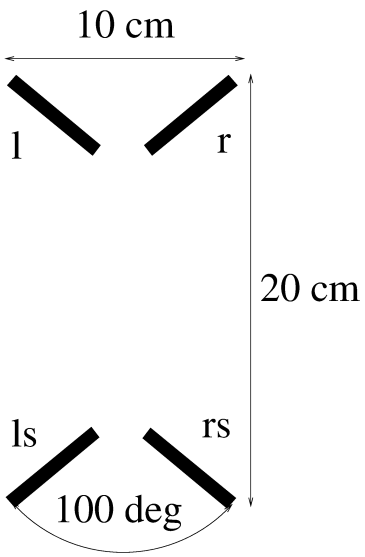


Abbildung 5.7: ORTF-Surround

Arrays Fortschritte könnten durch phasenkontrollierte Mikrofonarrays entstehen, bei denen prinzipiell genau so viele Richtungen unterscheidbar sind, wie Kapseln eingesetzt werden. Mit DSP-Technik sollten sich auch unverfärbte Abbilder verschiedener relativ hoch aufgelöster unterschiedlicher Richtungen gewinnen lassen, die dann für die passende Wiedergabekonfiguration umgerechnet werden können.

Neben dem Ansatz, bei der Mischung alles homogen in den 5 Lautsprechern abzubilden, gibt es vor allem beim Film den Ansatz, den Dialog im Center-Lautsprecher zu positionieren, die Musik in normalem 2-Kanal Stereo im Links- und Rechts-Lautsprecher, den hinteren und seitlichen Anteil des Halls im Links Surround und Rechts Surround-Lautsprecher und die Umgebung („Atmosphäre") auf Links, Rechts, Links Surround und Rechts Surround zur Einhüllung. Es ist entscheidend, das passende Maß an Korrelation (sowohl Phasen als auch Klang) zwischen den vorderen und hinteres Kanälen zu erreichen, damit sich eine meist gewünschte Einhüllung ergibt und nicht eine Trennung der Klänge vorne und hinten.

5.3.2 Mehr Kanäle

Die 5.1-Technik lässt sich durch weitere Kanäle erweitern. Ursprünglich lag der Schwerpunkt auf einer Verfeinerung der Surround-Kanäle mit bis zu 9.1-Konfigurationen.

In letzter Zeit zeigt sich aber, dass der für den angenähert natürlichen Höreindruck am stärksten fehlende Aspekt die Einbeziehung von Quellen außerhalb der Ebene ist. Da selten Quellen von unten wichtig für den Höreindruck sind und es schwierig ist, den Bereich mit Lautsprechern abzubilden, kommen zusätzliche Lautsprecher über der Hörfläche als Erweiterung in Betracht. Sie können echte Quellen von oben darstellen (Flugzeuge, Vögel...) sowie Deckenreflektionen eines virtuellen Raumes. Wegen der begrenzten Auflösung der Richtungen des Schalleinfalles im oberen Winkelbereich werden vor allem zwei Lautsprecher vor und über dem Hörer dazu genommen, eventuell noch einer im Zenit („Voice of god").

Um den Aufwand bei der Aufstellung und Verkabelung zu minimieren, verwendet man Teilweise stark richtende Lautsprecher auf dem linken und rechten Lautsprecher, die auf

die Decke des Raums ausgerichtet werden, so dass die Reflektion von schräg oben kommt.

Die in Kapitel 5.3.1, Seite 80 vorgestellte Mikrofonanordung kann um Höhenkanäle erweitert werden[35]. Dafür werden weitere vier Supernierenkapseln verwendet, die von den existierenden Kanälen nur im Pegel separiert werden, indem sie um 90° abgewinkelt werden. Die Dokumentation macht zu den absoluten Winkeln keine Angaben, die Zeichnungen deuten jedoch 30° nach unten für die ersten vier Kapseln an.

5.3.3 Virtuelle Schallquellen mit Richtungsangabe

Eine wesentliche Verallgemeinerung der festen Surround-Konfigurationen und Aufnahmeformate ergibt sich, indem statt der festen Mischung auf die genormten Lautsprecherpositionen einzelne Spuren mit Richtungsangabe geliefert werden. Diese können bei bekannter Wiedergabekonfiguration auf diese passend umgerechnet werden (Matritzierung).

5.3.4 Ambisonic

Diese Technik nimmt den gesamten Satz an Kugelfunktionen erster Ordnung auf. Dies ist eine Basis mit vier Dimensionen. Das Prinzip ist auf höhere Ordnungen erweiterbar. Zwei mathematisch gleichwertige und ineinander umrechenbaren Basen sind

B-Format mit den Komponenten 0 (Druckanteil, ungerichtet), X, Y, Z (jeweils Druckgradient in Richtung der entsprechenden Koordinatenachsen). Es lässt sich näherungsweise direkt aufnehmen mit einem Druckempfänger (Kugelcharakteristik) und direkt daneben positionierten Druckgradientenempfängern (Achtförmige Charakteristik) in X-, Y- und Z-Richtung. Es ist eine dreifach-MS-Technik.

A-Format mit vier Komponenten in Richtung jeweils einer Tetraederecke. Dies ist näherungsweise direkt aufzunehmen durch vier in die entsprechenden Richtungen ausgerichtete möglichst koinzidenten Nierenkapseln. Eine praktische Realisierung ist das Soundfield Mikrofon. [30]

Die verschiedenen Darstellungen lassen sich nicht nur ineinander umrechnen, sondern aus einem neutralen mathematischen Ansatz her kommend auch jeweils in die bestmögliche Aufteilung auf beliebige Lautsprecherkombinationen, beginnend bei Mono-Wiedergabe mit dem Kugelanteil alleine.

Interessanterweise lassen sich auch alle Signale von beliebig orientierten Mikrofone mit den klassischen Richtcharakteristiken – egal wie ausgerichtet - und damit alle weiter oben genannten Signale von koinzidenten Aufnahmeverfahren nachträglich aus einer Ambisonic-Aufnahme berechnen. Dazu wird die Projektion auf die jeweilige gewünschte Richtung durch eine passende Matrix berechnet.

5.3.5 Wellenfeld-Synthese

Wie der Name schon angibt, versucht diese Technik, das komplette Wellenfeld bei der Wiedergabe wieder herzustellen. Dazu dient ein Array von Lautsprechern, die jeweils so angesteuert werden, dass außerhalb des Nahfeldes nach Huygens die Wellenfronten so entstehen, dass sie in Richtung und Amplitude dem entsprechen, was aufgenommen wurde bzw. dargestellt werden soll. Um dem Ziel wirklich nahe zu kommen, muss allerdings ein hoher Aufwand an Kanälen bei der Wiedergabe und bei der Verarbeitung getrieben werden.

6 Elektrische Übertragung

6.1 Spannungsanpassung

In der Tontechnik wird fast vollständig mit Spannungsanpassung gearbeitet. Das bedeutet, dass jeder Ausgang möglichst niederohmig ausgelegt wird und jeder Eingang möglichst hochohmig. Das führt dazu dass auch bei kleineren Unregelmäßigkeiten der Impedanz in Abhängigkeit der Frequenz keine merklichen Abweichungen auftreten, das immer näherungsweise die volle Spannung am Eingang anliegt.

Ein weiterer wesentlicher Vorteil niedriger Ausgangsimpedanzen ist, dass die typischen Belastungen durch selbst lange Kabel, vor allem deren Kapazität, nicht zu merklichen Beeinträchtigungen des Frequenzgangs führt. Anderenfalls wäre die Verbindung in der Bandbreite begrenzt, die Höhen würden abgeschwächt.

Die niedrige Ausgangsimpedanz belastet auch eingestreute Störungen und vermindert sie.

Praktisch fordert man, dass die Eingangsimpedanz mindestens das Zehnfache der Ausgangsimpedanz sein muss.

Selten angewandt, aber durchaus möglich: Unter Abstrichen an die ansonsten erreichte Spannungsanpassung kann man mehrere Eingänge parallel an den gleichen Ausgang hängen. Die Abspaltung sollte aber am Ausgang passieren, damit beide Kabel an der Stelle niederohmig abgeschlossen sind (Y-Kabel).

6.2 Asymmetrische Übertragung

Bei kurzen Verbindungswegen kann die asymmetrische Übertragung ausreichen. Hierbei verbindet man die Massen und die signalführende Ader direkt. Diese einfache Art der Koppelung hat gravierende Nachteile.

- Ein - und Ausgang müssen das gleiche Potential haben oder mindestens eine Komponente muss vollständig Erdfrei sein.
- Die gesamte Verschaltung darf nicht an mehren Stellen geerdet sein, es sei denn, die Erdverbindung ist vollständig niederohmig vermascht, sonst kommt es bei Einstreuungen zur berüchtigten Brummschleife. Das kann dazu führen, dass ein überlagertes Brummen einen höheren Pegel als das Nutzsignal erreicht.
- Jede Störung auf der Masse eines Geräts oder dem Kabel ist nicht vom Signal trennbar.

Wenn diese Probleme auftreten, kann man durch Übertrager das Signal bei getrenntem Potential übertragen.

Die typisch verwendeten Steckverbindungen sind Klinke und Cinch[1]. Die Belegung ist

[1] Insbesondere Eberhard Sengpiel legte Wert auf die korrekte Aussprache „Kintsch", nicht „Tschintsch". Wo er Recht hat…

Klinke	Cinch	Signal
Sleeve	Screen	Gnd
Tip	Center	Hot

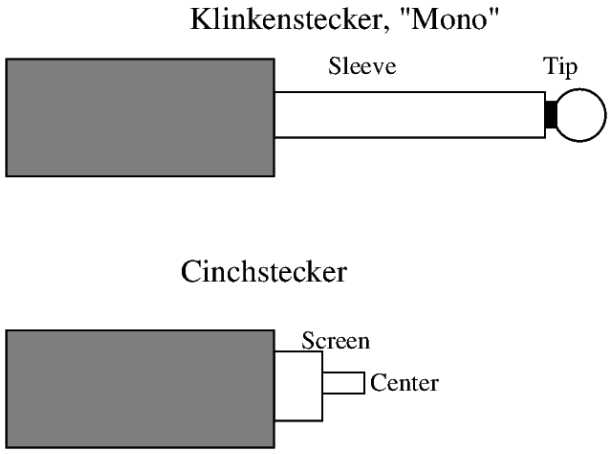


Abbildung 6.1: Klinken- und Cinchstecker

6.3 Symmetrische Übertragung

Zur weitergehenden Unterdrückungen von Störungen verwendet man eine symmetrische Übertragung. Dies wird häufig auf die Art realisiert, dass eine Leitung das normale Signal führt, das andere das invertierte. Der Eingang bildet dann die Differenz der beiden Spannungen, entweder aktiv durch Differenzverstärker oder passiv durch Übertrager.

Für die Störungsunterdrückung ist jedoch ausschließlich notwendig, dass beide Signale am Ausgang mit der gleichen Impedanz [2] ausgegeben werden.

Zusätzlich wird das Kabel wie üblich geschirmt und die Bezugsmasse wird auch mitgeführt. Damit Störeinflüsse auf beiden Leitungen möglichst gleich sind, wird das Kabel verdrillt. Auch induktive Einstreuungen werden damit vermindert, da mit jeder Drehung der Verdrillung eine Fläche entsteht, auf der die Induktion die invertierte Phase zur letzten umschlungenen Fläche hat.

Diese Vorkehrungen stellen sicher, dass verbleibende Störungen auf beiden Leitungen gleich sind. Durch die Differenzbildung am Eingang heben sie sich dann auf.

Aktive Differenzverstärker können bis zu beliebig kleinen Frequenzen und bis zu frequenzunabhängig hohen Spannungen arbeiten. Sie sind jedoch gegen Potentialunterschiede über ihren Betriebsspannungsbereich hinaus empfindlich, da mindesten einer der Eingänge des Differenzverstärkers seinen linearen Bereich verlässt oder gar bei fehlender Schutzbeschaltung zerstört werden kann.

Ein Eingangsübertrager ist weitgehend immun gegen Potentialunterschiede. Er ist aber problematisch, was hohe Pegel und niedrige Frequenzen betrifft. Da seine momentane Spannung der zeitlichen Ableitung der Induktion proportional ist, muss diese für eine Zeit proportional zur Periodendauer wachsen, und die maximale Magnetisierung ist begrenzt. Dies ist vor allem ein Problem, wenn extrem hohe Subbass-Pegel auftreten, wie bei Popp-Lauten oder durch Wind verursachte Wirbel.

[2] Im Sinn von: So weit wie irgend möglich, am Besten ist ein niedriger einstelliger Prozentbereich in der Abweichung.

Zusätzlich ist unbedingt zu verhindern, dass eine noch so kleine Gleichspannung anliegt. Sie führt zu einem hohen Strom als Resultat und kann den Kern dauerhaft magnetisieren (Remanenz), was zu eine Asymmetrie der Magnetisierung und damit zu fallender Aussteuerbarkeit und unzumutbaren asymmetrischen Verzerrungen führt.

Mittlerweile wird die symmetrische Verbindung in der Regel durch die dreipoligen XLR-Steckverbinder durchgeführt. Sie haben eine Rast-Mechanik. Es gibt männliche (drei Stecker) und weibliche (drei Buchsen) Ausführungen. Der Ausgang ist männlich.

Die Signalbelegung ist festgelegt als

1 Gnd
2 Hot (+)
3 Cold (-)

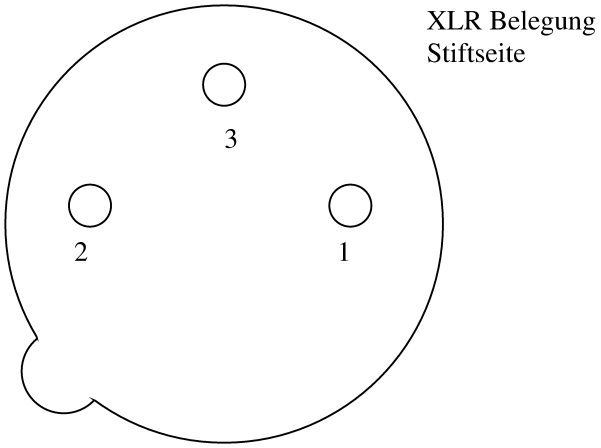


Abbildung 6.2: XLR Stecker

Ein Klinkenstecker in Stereoausführung kann auch zur symmetrischen Übertragung eingesetzt werden, die Belegung ist dann

Sleeve	Gnd
Ring	Cold (-)
Tip	Hot (+)

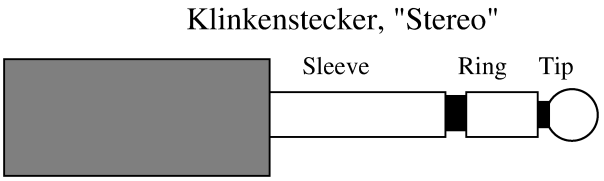


Abbildung 6.3: Stereo-Klinkenstecker

Nachteilig ist bei Klinkensteckern, dass sie beim Einstecken prinzipiell die signalführenden Kontakte zumindest kurzzeitig kurzschließen. Aus dem Grund dürfen sie nicht für Anschlüsse mit Phantomspeisung[3] eingesetzt werden.

6.4 Kabel, Steckverbindungen

Die hauptsächlichen Anforderungen an Kabel in der Tontechnik sind

[3]Siehe Kapitel 6.6, Seite 87

mechanische Stabilität, es darf nicht brechen, reißen oder bei Biegung seine Eigenschaften temporär oder gar auf Dauer ändern

ausreichend geringer Innenwiderstand , damit auch bei langen Strecken die Spannungsanpassung nicht durch das Kabel verschlechtert wird,

niedrige Kapazität, damit auch bei langen Strecken kein Höhenabfall durch kapazitive Belastung der Ausgangsimpedanz oder des Kabelwiderstands auftritt

gute, HF-dichte Abschirmung, damit Störungen im nieder- und hochfrequenten Bereich nicht auf die Signalleitungen durchschlagen. Die Schirmung sollte mit verwobenem Geflecht, eventuell kombiniert mit einer Folienlage realisiert sein.

Die mechanischen Anforderungen gelten auch für Steckverbindungen, ebenso wie die Abschirmung. Dazu kommen noch eine Oberfläche sowie Mechanik, die verlässliche niederohmige Verbindungen der Kontakte auch nach vielen Steckzyklen garantieren.

Der Wellenwiderstand des Kabels ist nur bei HF oder digitalen Signalen von Belang, da die Wellenlängen der elektrischen Leitung weit über den üblichen Leitungslängen liegen. Dadurch spielen Wellenphänomene auf dem NF-Kabel keine Rolle.

Unseriöse Angebote mit extrem hochpreisigen Kabeln, die weitere unnötige oder gar nur behauptete bis esoterische Eigenschaften bringen, gehören zum Tontechnik-Voodoo und haben keine Daseinsberechtigung.

6.5 Die DI-Box

Mit einer DI-Box lassen sich unsymmetrische Signale, auch hochpegelige aus Lautsprecherausgängen, so wandeln, dass sie an symmetrische Eingänge direkt angeschlossen (**D**irect **I**njection) werden können.

Typisch ist ein schaltbarer Spannungsteiler im Eingang sowie eine zum Eingang parallele Buchse, um das unsymmetrische Signal typischerweise an einen Verstärker weitergeben zu können.

Danach folgt eine Stufe, die das Signal symmetriert und eventuell nochmal im Pegel absenkt und dann niederohmig ausgibt.

6.5.1 Passive DI-Box

Bei einer passiven Ausführung passt ein Übertrager das Signal an. Es wird in der Regel heruntertransformiert, um eine niederohmige Impedanz zu erreichen (der Spannungspegel wird mit dem Wicklungsverhältnis transformiert, die Impedanz mit dem Quadrat).[4]

Die Schaltung ist rein passiv, braucht also keine Spannungsversorgung irgend einer Art und kann große Potentialunterschiede überbrücken. Sie ist bei extrem hochohmigen Ausgängen wie die von passiven E-Gitarren nicht sinnvoll einsetzbar, da der Ausgang zu stark belastet wird, was den Klang massiv verändert wird.

[4] Ein mögliches Schaltbild mit Besprechung findet sich bei Sengpiel[24] unter der URL `http://www.sengpielaudio.com/PassiveDI-Box.pdf`, Zugriff 2015-05-18

6.5.2 Aktive DI-Box

Die aktive Ausführung enthält einen Pufferverstärker mit hochohmigem Eingang, eine Phasenumkehrstufe sowie zwei Ausgangspuffer. Damit wird elektronisch symmetriert. Die Schaltung kann durch Batterie oder auch Phantomspeisung versorgt werden. Neben dem hochohmigen Eingang kann diese Variante über den ganzen Übertragungsbereich sehr linear von der Amplitude und vom der Kennlinie her arbeiten. Die fehlende Übertragertrennung limitiert auf der anderen Seite den überbrückbaren Potentialunterschied zwischen Ein- und Ausgang.

6.6 Phantomspeisung

Die Phantomspeisung bildet eine Möglichkeit, ein (meist) Mikrofon über seine Anschlussleitung mit einer Betriebsspannung zu versorgen, ohne dass die Versorgungsspannung im (Differenz-)Ausgangssignal erscheint. Daher die Bezeichnung „Phantom".

Wichtig ist, die Symmetrie so genau wie möglich einzuhalten. Die Widerstände zur Versorgung der Signalleitungen sollten sich um maximal 0,4%(!) unterscheiden. Andernfalls fließt insbesondere bei Verwendung eines Übertragers im Eingang der Folgestufe ein hoher Strom, der zur dauerhafter Magnetisierung führen kann. Auch sonst ist zumindest die Impedanzsymmetrie geschwächt.

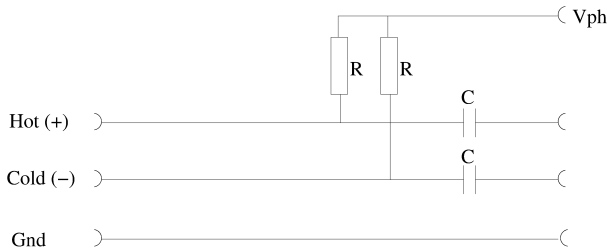


Abbildung 6.4: Prinzipschaltung zur Phantomstromversorgung

Die Parameter der genormten Phantomstromversorgungen sind

Name	Spannung	R	Maximaler Strom
P48	48 V	6.8 KΩ	10 mA
P24	24 V	1.2 KΩ	12 mA (vermutet)
P12	12 V	680 Ω	15 mA

Leider wird insbesondere der maximale Strom (der auch bei Versorgung aller Eingänge simultan garantiert werden muss) oft nicht eingehalten. Die Paarung der Widerstände wird ebenfalls häufig vernachlässigt. P48 ist am Weitesten verbreitet.

6.7 Analog/Digital-Wandlung und zurück

Bei der Wandlung in digitale Formate wird das ursprüngliche Signal diskretisiert, und das in zwei Bereichen.

Die Amplitude wird durch einen Ganzzahlenwert ausgedrückt. Das ersetzt den kontinuierlichen analogen Wertebereich durch eine Zahl, die ein kleines Intervall der möglichen Eingabewerte zusammenfasst.

Ohne Weitere Vorkehrungen führt das zu einer Verzerrung der Wellenform, die Kennlinie wird Treppenförmig. Dieser prinzipielle Verlust an Informationen fällt nicht ins Gewicht, wenn die Auflösung unter die Rauschgrenze fällt. Dann ist die reale Genauigkeit der analogen Darstellung erreicht oder übertroffen, die Information bleibt erhalten.

Sofern die digitale Auflösung niedriger ist als die Genauigkeit des analogen Signals, treten tatsächlich die Artefakte der Diskretisierung auf. Sie äußern sich in Verzerrungen oder (leisen) klickenden Geräuschen bei sehr tieffrequenten niedrdigpegeligenen Eingangssignalen. Da diese Störungen auf sehr unangenehme Weise mit dem Eingangssignal korreliert sind, müssen sie vermieden werden. Das lässt sich erreichen, indem künstlich ein Rauschen mit mindestens der Amplitude eines Wertesprungs zugefügt wird. Das Rauschen kann bewusst so gefärbt werden, dass es außerhalb des Bereichs der maximalen Empfindlichkeit des Ohrs seine maximale Amplitude hat. Im Ergebnis hat das gewandelte Signal dann ein Grundrauschen. Schmalbandige Signale im Eingang, die weit unter der Auflösungsgrenze der digitalen Darstellung liegen, bleiben mit dieser Technik erhalten. Das ist leider viel zu wenig bekannt.

Der Zeitverlauf wird an äquidistanten Stützpunkten abgetastet. Das erscheint als drastischer Verlust an Information. Laut Shannon ist es notwendig, dass das Eingangssignal eine begrenzten Bandbreite besitzt. Dann genügen zwei Stützstellen pro kürzester Periode, um die vollständige Information des Eingangssignals zu erhalten.

Frequenzen im Eingangssignal, die über der nutzbaren Bandbreite liegen, erscheinen an der maximalen Frequenz gespiegelt im Ausgangssignal, man bezeichnet dies als Aliasing. Das ist unbedingt zu vermeiden, da diese Frequenzen inharmonisch zu den Eingangssignalen sind und extrem stören.

In der Anfangszeit wurde die Tiefpassfilterung durch extrem steile analoge Filter realisiert. Diese hatten einige Probleme. Sie waren extrem aufwändig, mussten mit engen Bauteiletoleranzen aufgebaut werden und erzeugten in der Nähe der Grenzfrequenz starke Phasendrehungen.

Mittlerweile werden fast ausschließlich sogenannte 1-Bit Wandler eingesetzt. Die folgende Darstellung vereinfacht extrem, versucht aber, die wesentlichen Aspekte zu erfassen.

Diese Wandler erzeugen ein Differenzsignal aus ihrer augenblicklichen Näherung und dem Eingangssignal, und das mit einem Vielfachen der eigentlichen Abtastfrequenz. Das analoge Vorfilter braucht nur zu verhindern, dass keine Frequenz das entsprechend Vielfache der NF-Grenzfrequenz übersteigt. Das in Hardware realisierte Approximationsverfahren läuft darauf hinaus, digital auf dem Bitstrom ein digitales Filter zu realisieren, das phasenlinear die zu hohen Frequenzen des Eingangssignal extrem scharf herausrechnet. Das Ergebnis dieses Tiefpasses wird mit der benötigten Auflösung errechnet und dient als Vergleichswert der Wandlung. Der hohe Fehler des 1-Bit Signals wird durch Mittelung und Filterung bis auf die Auflösungsgrenze der Ausgangsdarstellung des Signals vermindert. Im Prinzip wird hier auch mit extremem Dithering gearbeitet, wobei das interne Noise-Shaping dieses Fehlerrauschen über den Frequenzbereich der Wandlung hinaus verschiebt und bei der Tiefpassfilterung herausrechnet.

Da das eigentlich wirksame Tiefpassfilter bei diesem Verfahren digital berechnet wird, gibt es keine komplexen analogen Schaltungen mit den Problemen der ursprünglichen Technik mehr.[5]

[5] Siehe Swen Müller, [12], Seite 27 und folgende

Kritisch bei diesem Verfahren sind (nur noch) die Konstanz der Frequenz und der Referenzspannung.

Die Digital-Analog-(DA-)Wandlung verläuft nach dem gleichem Prinzip: Der intern generiert Ein-Bit Datenstrom wird gefiltert. Auch hier ergibt sich ein nahezu ideales verhalten unabhängig von Bauteiletoleranzen.

Zu Missverständnissen zum Wesen von DA- und AD-Wandlung empfehle ich dringend das Video und dazugehörige Wiki von xiph.org „Digital Show and Tell"[40].

24 Bit sind ausreichend, um typische analoge Signale ohne Verluste digital darzustellen.

6.8 Digitale Übertragung

Wichtig ist, dass die digitalen Signale eine wesentlich höhere Bandbreite als die analogen besitzen. Bei ihrer Übertragung spielen im Gegensatz zum analogen Fall HF-typische Aspekte wie Wellenwiderstand und Abschluss eine Rolle. Deswegen sind außer bei extrem kurzen Strecken andere Kabel unbedingt notwendig.

6.8.1 S/PDIF

S/PDIF liefert ein serielles Signal, in dem mehrere Kanäle enthalten sein können. Die reine Signalübertragung ist analog zu AES/EBU ausgeführt. Die Metadaten werden aber nicht als ASCII Text, sondern binär codiert.

Mit entsprechenden Umsetzern können AES/EBU und S/PDIF Geräte verbunden werden.

Die Audiodaten werden mit 2, 2,8 oder 3,1 MHz übertragen. Mit dem Format können unkomprimiert maximal 24 Bit lange Daten, aber auch einen Datenstrom im Format MP2, AC3 oder DTS übertragen werden.

Die Übertragung kann elektrisch asymmetrisch (75 Ohm koaxial, max. 10 m, auf ganz kurzen Strecken TTL-Signal) oder optisch (TOSLINK, Kunststofffaser) erfolgen. Die optische Übertragung hat den Vorteil der Potentialtrennung. Das Protokoll ist für Endverbraucher ausgelegt und wird bei Audio-Video Aufbauten zur Audio-Verbindung eingesetzt.

6.8.2 AES/EBU

AES/EBU ist ein Format, das seriell einen Datenstrom für Audio-Daten überträgt. Bei 24 Bit langen Daten ist die Bedeutung der letzten vier Bits nicht spezifiziert. Metadaten werden als ASCII Strings eingebettet. Es gibt zwei elektrische Varianten

AES3

Die elektrische Spezifikation entspricht RS422. Auf 110 Ω shielded Twisted Pair.

AES3i

Die Übertragung erfolgt unsymmetrisch über ein Koaxialkabel.

6.8.3 AES42

Diese Norm beschreibt den digitalen Anschluss von professionellen Mikrofonen an passende Eingänge über eine symmetrische Leitung. Es wird über 10 V DPP (Digital Phantom Power) versorgt, wobei ein Rückkanal mit Steuerpulsen von 2 Amplitude bereitgestellt wird, mit dem Einstellungen am Mikrofon verändert werden können.

Der Wandlertakt mehrerer Mikrofone kann zentral synchronisiert werden. Das Audiosignal wird im AES3 Format kodiert.

Bei Verwendung von zwei parallel arbeitenden Wandlern, die mit unterschiedlichem Pegel versorgt werden und entsprechender Kombination mit laufendem Abgleich kann ein derartig hoher Pegelbereich abgebildet werden, dass keinerlei Einstellung der Empfindlichkeit notwendig ist.[10]

6.8.4 Integration in Video-Signale, HDMI, DisplayPort

Bei digitaler Videoverkabelung wird das Tonsignal mittlerweile nicht mehr getrennt geführt. Die Normen HDMI und DisplayPort integrieren das Signal in die Übertragung.

6.8.5 USB

Einige Geräte liefern die Signale direkt als über die USB Schnittstelle als USB Audio. Dazu gehören auch Mikrofone, die eine AD-Wandler mit USB Ausgang und Teilweise auch eine phasengekoppelte DA-Wandlung an eine mit verbauten Ausgang für Kopfhörer direkt eingebaut haben. Für andere Mikrofone gibt es passende kompakte Geräte zum direkten Einstecken in ein Mikrofon.

6.9 Funkübertragung

Eine drahtlose Übertragung kann auf mehreren Wegen realisiert werden. Die Reichweite hängt neben der Ausstrahlungsstärke und Empfägnerempfindlichkeit sehr von der verwendeten Wellenlänge ab. Kurze Wellenlängen (und entsprechend hohe Frequenzen) der Funkwellen schränken die Reichweite ein. Einige Materialien, die leitfähige Elemente enthalten (Stahlbeton) verringern sie extrem.

Durch stehende Wellen kommt es zu Auslöschungseffekte an Knotenflächen. Um das zu vermeiden, müssen unbedingt doppelte Empfänger mit zwei Antennen eingesetzt werden (Diversity). Sie werden viel seltener beide gleichzeitig durch Auslöschung beeinträchtigt als einfache Empfänger.

Moderne Systeme verwenden zusätzliche Kommunikationswege wie IR-Übertragung, um ganz einfach die Übertragunsparameter zwischen Sender und Empfänger anzupassen.

6.9.1 Analog, FM

Die klassische Funktechnik bedient sich der Frequenzmodulation. Zur Vergrößerung des Störabstandes wird dabei im Sender typischerweise die Dynamik komprimiert und im Empfänger gegensinnig expandiert. Das kann zu Artefakten führen, diese stören speziell bei extrem hohen qualitativen Anforderungen.

Die meisten Frequenzen setzen eine Anmeldung und Betriebsgenehmigung voraus. Die entsprechenden Richtlinien sind jeweils nur national gültig und haben sich darüberhinaus in der Vergangenheit oft geändert.

Es ist unbedingt auf Störungen und Überschneidungen bei den verwendeten Frequenzen zu achten.

6.9.2 Digital

Neuere Übertragunswege setzen auf digitalen Funk. Die erreichbare Qualität ist in der Praxis nicht durch die Übertragung begrenzt.

Bluetooth ist in seiner Standardvariante unbrauchbar, weil die verbreiteten Codecs stark digital komprimieren, um Bandbreite zu sparen. Zum andere sind sie mit deutlichen Verzögerungen verbunden, die jede Form von Gleichzeitigkeit für beispielsweise Mehrkanalaufnahmen oder Live-Wiedergabe zunichte machen.

6.10 Digitale Speicherung - Formate

Digitale Audioformate werden mit einem Header versehen, der die innere Struktur beschreibt, danach kommen die binären Daten.

Typische Formate sind .wav (Microsoft), .aiff, .au. Es sind verschiedene Anzahl von Kanälen, Bittiefen, Bitformate und Raten möglich.

Üblich sind

Kanäle	1 (mono) bis 6
Bittiefe	16, 20, 24, jeweils linear; 32 Bit float
Raten	44.1 KHz, 48 KHz, 96 KHz, 192 KHz

Für die Auslieferung der fertigen Mischung ist 16 Bit als Wortlänge immer noch ausreichend, da 96 dB an Dynamik abgebildet werden können.

Bei der Aufnahme ist es sinnvoll, mit Reserven zu arbeiten, um bei Vermeidung von Übersteuerung und entsprechendem Headroom noch eine ausreichende Dynamik bis zum Rauschteppich zu behalten.

32 Bit Floating Point gibt praktisch unlimitierte Dynamik. Dieses Format ist vor Allem für die Berechnung von Zwischenschritten sinnvoll, da das Aufschaukeln von Rundungsfehlern bei langen Algorithmen minimiert wird (vor allem, wenn Summen mit den betragsmäßig kleinsten Signalen anfangen). Gerade Filterberechnungen bei extremen Einstellungen (Notchfilter,. . .) profitieren davon.

Für das reine Hören sind 44.1 KHz, der CD Standard, völlig ausreichend. Mit den höheren Raten kann man immerhin beim Dithern mit einem Noise-Shaping das Rauschen vollständig aus dem Hörbereich hinausdrängen. Der Aufwand an Speicherplatz und Rechenleistung bei Berechnungen steht allerdings in keinem Verhältnis zur Verbesserung. Einige Bit mehr bei der Wortlänge erreichen da mehr mit weniger Aufwand.

6.11 Digitale Kompression - ohne Verluste

Bei digitalen Audiodaten lässt sich einiges an Platz einsparen.

Verlustlose Kompression lässt sich jederzeit umkehren. Die bekanntesten Formate sind flac, shorten. Für alles, was nicht aktuell bearbeitet wird, gibt es keinen Grund, die nativen unkompimierten Formate vorzuziehen. Die entsprechenden Applikationen und zum Teil auch Geräte können mit flac-Dateien direkt umgehen, zumal das Format vollständig offen ist und es freie Software und Libraries für den Umgang damit gibt. In der Regel wird der Platzbedarf halbiert.

6.12 Digitale Kompression - mit Verlusten

Wenn man die Verdeckungseffekte beim Hören mit einbezieht und entsprechend maskierte Signalanteile in der Auflösung einschränkt oder ganz weg lässt, kann man noch erheblich mehr an Platz einsparen.

Da man Information weg lässt, ist der Vorgang nicht umkehrbar.

Bekannte Formate sind mp3, ogg, aac. Ab 256 KBit/s Datenrate ist im Blindversuch bei hochwertiger Wiedergabe und normalem Hören kein Unterschied zum unkomprimierten Signal mehr feststellbar, wie u.A. eine Untersuchung des Heise-Verlags für die Zeitschrift c't ergeben hat. Wenn jedoch die Voraussetzung der Maskierung nicht mehr gegeben ist, hört man Artefakte. Weil es um Lücken im Frequenzgang geht, hört es sich etwa wie ein Flanging/Phasing Effekt an. Das kann passieren, wenn der Frequenzgang nicht ideal ist. Beispiele sind Nachbearbeitung mit EQ oder Hörschäden, die die maskierenden Frequenzbereiche aus der Wahrnehmung nehmen.

Diese Formate sind bei vernünftigen Datenraten für den Transport auf mobilen Datenträger und zum Versenden eines fertigen Produkts in der Regel mehr als brauchbar. Sie sind aber völlig ungeeignet, wenn nachträglich an den Daten irgend etwas geändert werden soll, z.B. bei einzelnen Spuren vor der Mischung.

7 Elektrische und digitale Verarbeitung der Signale

7.1 Verstärker, Pegel

Verstärker haben die Aufgabe, das Eingangssignal im Spannungspegel oder in Bezug auf den verfügbaren Strom anzuheben. Sie sollten ansonsten das Signal nicht verfälschen, also neutral sein und möglichst wenig Störungen hinzufügen (vor Allem Rauschen).

7.1.1 Mikrofonvorverstärker

Mikrofonvorverstärker bringen den meist außerordentlich niedrigen Pegel der Mikrofonsignale auf einen Bereich, der für die weitere Verarbeitung vorteilhaft ist. Die typischen Pegel in der Studiotechnik sind -10 dBu für Consumergeräte und +4 dBu im professionellen Bereich. Manche Geräte lassen sich zwischen den beiden Pegeln umschalten.

Ganz besonders wichtig wegen der potentiell anliegenden niedrigen Pegel ist die Rauscharmut. Diese muss auch bei Abschwächung der Empfindlichkeit für hohe Pegel gegeben sein, was von der Schaltungstechnik her nicht trivial ist, da dafür oft im internen Rückkoppelungskreis hohe Widerstandswerte eingesetzt werden.

Schlechte Mikrofonverstärker zeigen sich auch durch zu hohe minimale Empfindlichkeit. Das stört spätestens, wenn selbst ein dynamisches Mikrofon an der Bassdrum in der geringsten Empfindlichkeit den Eingang übersteuert. Dem kann man durch ein T-förmiges Widerstandsnetzwerk abhelfen. Das muss unbedingt am Ende der Übertragung direkt vor dem Eingang des Vorverstärkers angebracht sein. Sonst steigt die Empfindlichkeit gegen Störungen auf dem Übertragunsweg.

Das niedrigste mögliche Rauschen lässt sich mit einem auf die Schaltung nach Maß gewickelten Mikrofon-Übertrager erreichen. Er führt auch zu einer hohen Unempfindlichkeit gegen Potentialdifferenzen der Quelle. Nachteilig sind die Sättigungseffekte bei niedrigen Frequenzen und hohen Pegeln.

Eine gute Störungsunterdrückung beim symmetrischen Eingang und gegen HF-Einstreuung (Handies!) ist auch wichtig.

Meist gibt es die Möglichkeit, eine Phantomspeisung dazu zu schalten. In manchen Fällen lässt sich ein Hochpass an früher Stelle im Signalweg einschalten, gegen hohe Subbass-Störungen, die sonst leicht zu Übersteuerungen führen.

7.1.2 Endstufen

Die Endstufen haben die Aufgabe, das Eingangssignal im Pegel anzuheben und extrem niederohmig zur Ansteuerung von Lautsprechern mit Nennimpedanzen von typischerweise 8 oder 4 Ω weiterzugeben.

Die Endstufen mit dem größten Leistungsvermögen werden im PA-Bereich eingesetzt.

Sie müssen außerordentlich Robust sein (elektrisch - z.B. kurzschlussfest, gegen Temperatureinflüsse und mechanisch) und präzise arbeiten.

Im Studiobereich werden Endstufen entweder mit digitaler Signalaufbereitung im DSP oder analogen Frequenzweichen und Anpassungsschaltungen in die Lautsprecher integriert (aktive Lautsprecher) oder sie müssen ohne Lüfter geräuschlos betreibbar sein. Das schränkt die Leistungsdichte massiv ein.

Jeder moderne halbwegs brauchbare Verstärker ist neutral im Klang. Bei exakt gleichem Pegel (und ohne Übersteuerung) kann man sie im Blindversuch nicht unterscheiden.[1]

7.2 Automatische Pegelkontrolle Limiter, Expander, Gate

Häufig ist die Variation im Pegel von realen Signalen für die Anwendung in der Tontechnik aus technischen, künstlerischen oder der Realität bei der Wiedergabe geschuldeten Gründen zu groß. Neben den Eingriffsmöglichkeiten von Hand gibt es auch Schaltungen (oder deren Realisierung als Algorithmus in Plugins), die die Pegel nach Vorgaben ändern.

7.2.1 Kompressor

Vorweg: der Kompressor hat nichts, aber auch gar nichts mit der digitalen Kompression bei Audioformaten zu tun!

Der Kompressor ist ein automatischer Lautstärkeregler, der abhängig vom augenblicklichen Pegel die Verstärkung abschwächt.

Dazu wurden viele verschiedene Schaltungskonzepte eingesetzt.

Optoelektronischer Kompressor. Eine möglichst schnell reagierende Lampe (elektrolumeniszens, LED) beleuchtet einen lichtempfindlichen Widerstand (LDR) im unteren Teil eines Spannungsteilers. Das Verhalten des LDR legt die minimale Reaktions- und Release-Zeit fest.

FET als spannungsgesteuerter Widerstand. Die Kontrollspannung liegt am Gate eines Feldeffekttransistors, der wieder den unteren Teil eines Spannungsteilers darstellt. Die Zeitkonstanten werden im Wesentlichen von der Ansteuerschaltung kontrolliert. Problematisch sind die Exemplarstreuung des FET und die begrenzte Aussteuerbarkeit des FET, da er den Bereich des weitgehend linearen veränderlichen Widerstands verlassen kann.

VCA. Ein Verstärker mit spannungsgesteuerter Verstärkung erlaubt die neutralste und am freisten parametrisierbare Kontrolle des Pegels. Als Bausteine kommen Transkonduktanz-Verstärker zum Einsatz.

Alle diese Schaltungen müssen zunächst einen Pegel besitzen, ab dem nach oben die Regelung eingreift, meist Threshold genannt. Sonst müssten tiefe Pegel extrem angehoben werden, was zum Anstieg des Grundrauschens führen würde.

Ein weiterer Parameter ist die verbleibende Steigung des Ausgangspegels im Verhältnis zum Eingangspegel über der Schwelle, meist Ratio genannt.

[1] Siehe `http://sound.whsites.net/amp-sound.htm` und für einen Testaufbau `http://sound.whsites.net/absw.htm` auf [4]

Neben diesen statischen Parameter gibt es noch zwei zeitliche, die Anpsrechzeit (Attac) und die Zeit bis zur Neutralisierung der Regelung nach Pegelabfall (Release).

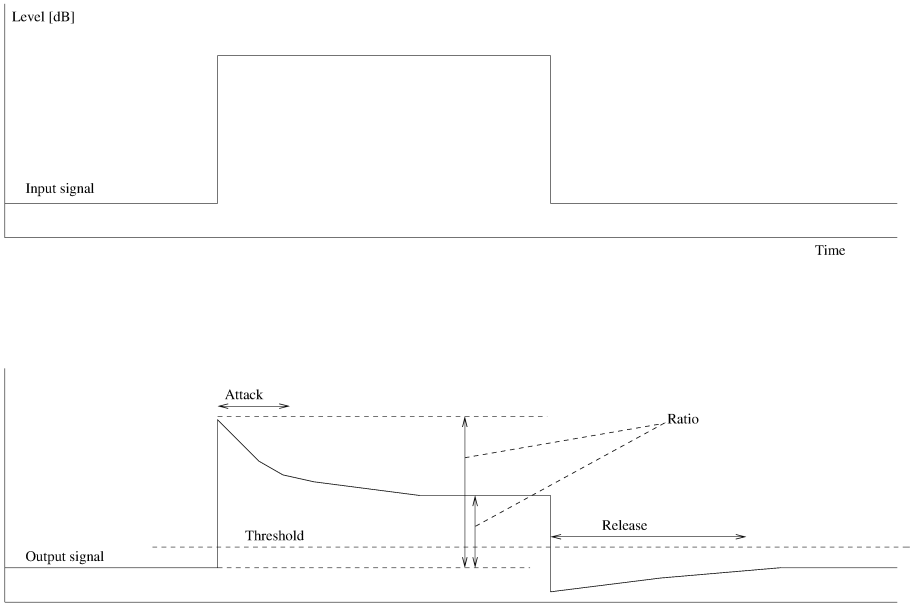


Abbildung 7.1: Parameter eines Kompressors

Eine lange Ansprechzeit lässt kurze Pulse weitgehend bestehen, eine kurze kann Übersteuerungen durch Pulse abschwächen, aber nicht ganz verhindern.

Eine kurze Abklingzeit führt dazu, dass die normale Verstärkung schnell wiederhergestellt wird. Das kann rhythmische Pegelvariationen unterdrücken, was nicht immer gewünscht wird. Das starke und schnelle Schwanken von Hintergrundsignalen kann störend auffallen („Atmen").

Die Zeitkonstanten sollten passend zum typischen zeitlichen Verhalten des Signals eingestellt werden.

Der Einsatz des Kompressors senkt Pegelunterschiede ab. Leisere Momente eines Signals werden u.U. in der Mischung besser hörbar. Man spricht davon, dass die Mischung verdichtet wird.

Die sinnvolle Einstellung für alle genannten Parameter zu finden, kann sehr schwierig sein. Ethan Winer gab einmal zu bedenken, dass man in der dazu notwendigen Zeit das Ergebnis oft besser mit automatisierbaren Fader-Fahrten erreichen kann.

Bei kurzen Regelzeitkonstanten greift die Regelung bei niedrigen Frequenzen schon während der Periodendauer ein und verändert die Wellenform. Damit entstehen Obertöne, da die Kompression in ein Sättigungsverhalten übergeht. Tatsächlich ist ein Verzerrer, der die hohen Amplituden graduell vermindert, eigentlich ein Kompressor mit Zeitkonstanten 0.

Ein nur in hohen Frequenzen wirkender Kompressor wird als De-Esser bezeichnet. Er kann übertriebene Zischlaute aus einem Sprachsignal bändigen.

Multiband-Kompressoren kombinieren Frequenzweichen, um mehrere Bänder unabhängig zu komprimieren. Das verhindert, dass sich Signale mit verschiedenen Frequenzbereichen gegeneinander modulieren.

Das Regelsignal kann bei manchen Geräten entweder extern bearbeitet werden (EQ,..., man spricht von Sidechaining) oder von einem fremden Signal kommen. Das kann verwendet werden, um dem steuernden Signal eine Vorrang einzuräumen. Den Effekt nennt

man Ducking.

Änderung der Abklingzeit bei perkussiven Signalen

Bei perkussiven Signalen mit abklingender Hüllkurve lässt sich deren Zeitkonstante mit dem Kompressor ändern – in beiden Richtungen.

Verlängern lässt sich die Zeitkonstante auf eigentlich triviale Weise. Wenn ein Kompressor die Dynamik um einen Faktor abschwächt und die Zeitkonstanten kurz sind gegenüber denen des originalen Abklingen des Signals, wird die Steigung (in logarithmischer Darstellung des Pegels über der Zeit) um den Faktor zumindest in der Anfangsphase verkleinert. Damit ist das Nachklingen länger. Siehe Abbildung 7.2.

Die Nebenwirkung davon ist, dass auch die Dynamik global um den Faktor vermindert wird. Das kann, muss aber nicht erwünscht sein.

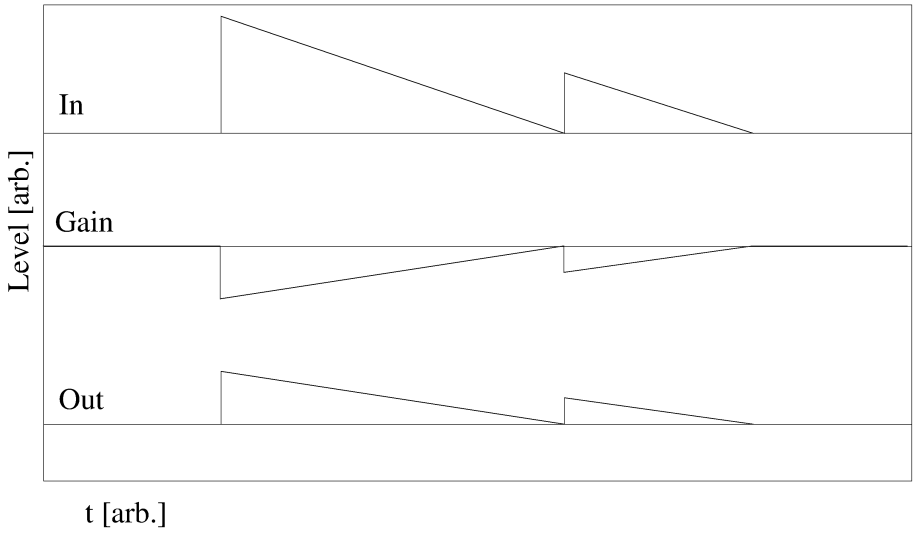


Abbildung 7.2: Anwendung eines Kompressors: Verlängerung des Ausklangs

Verkürzen lässt sich die Zeitkonstante, indem nach kurzer Release-Zeit (so dass der Beginn des Signals auf eine ungeregelte Verstärkung fällt) eine Attack-Zeit zum Einsatz kommt, die mit ihrer Zeitkonstante die Verstärkung abregelt. Die Steigung in logarithmischer Darstellung über die Zeit addiert sich zu der des originalen Signals. Siehe Abbildung 7.3.

Die Anfangsphase des Signals wird dadurch im Idealfall nicht geändert, so dass die Dynamik der Anschlagsphase unverändert bleibt.

7.2.2 Limiter

Der Grenzfall unendlicher Absenkung von Pegelunterschieden führt zu einem Festlegen eines oberen Grenzpegels. Dessen Überschreiten kann vollständig verhindert werden, wenn das geregelte Signal verzögert wird, der Limiter also „ in die Zukunft schaut". Man spricht von Brick Wall Limiter.

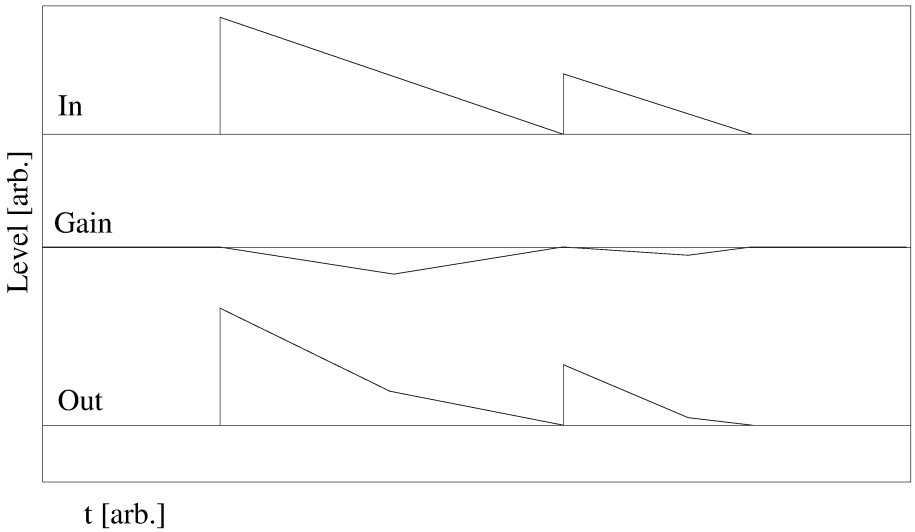


Abbildung 7.3: Anwendung eines Kompressors: Verkürzung des Ausklangs

7.2.3 Expander

Wenn die Richtung der Regelung umgekehrt wird, erhöht sich die Dynamik, statt zu sinken.

Ein Einsatzszenario ist es, einen Kompressor vor einer Übertragung oder Speicherung zu verwenden, die mit Störungen verseucht ist und mit einem analog eingestellten Expander die Änderung nachher wieder aufzuheben. Das war bei Bandaufnahmen üblich (Dolby A/B/C, HighCom) und wird heute bei analoger Funkmikrofontechnik eingesetzt.

Ein Expandieren der Höhen unter einem Schwellwert kann als einseitige Rauschunterdrückung eingesetzt werden, z.B. beim Restaurieren alter Aufnahmen.

7.2.4 Gate

Der extreme Fall eines Expanders schaltet das Signal unter einem Schwellwert komplett stumm. Auf die Art können Störungen mit niedrigem Signal in Pausen komplett ausgeblendet werden. Wenn dieses Abschneiden stark hörbar ist, kann es stärker stören als das ursprüngliche Signal.

7.3 Mischung

Die sinnvollste analoge Variante der Mischung erzeugt nach Lautstärkeanpassung der einzelnen Kanäle mittels eines Potentiometers durch einen Ausgangswiderstand eine Stromquelle. Diese werden an einer Stelle zusammengefasst und münden in der virtuellen Masse eines mit Operationsverstärkern aufgebauten Strom- zu Spannungsverstäkers.

Bei digitaler Verarbeitung ist lediglich eine gewichtete Summe der Signale zu bilden. Das kann bei Integer-Verarbeitung zu Überläufen oder bei entsprechender Vorkehrung zu zu niedrigen digitalen Pegeln mit schlechter Auflösung führen.

Bei Fließkomma-Rechnung gibt es keine echten Probleme, eventuell sollte man gegen Auslöschungseffekte vorgehen, indem man vor der Summation nach dem Betrag sortiert und mit den kleinsten Beträgen anfängt. Mir ist jedoch nicht bekannt, ob das irgendwo eingesetzt wird.

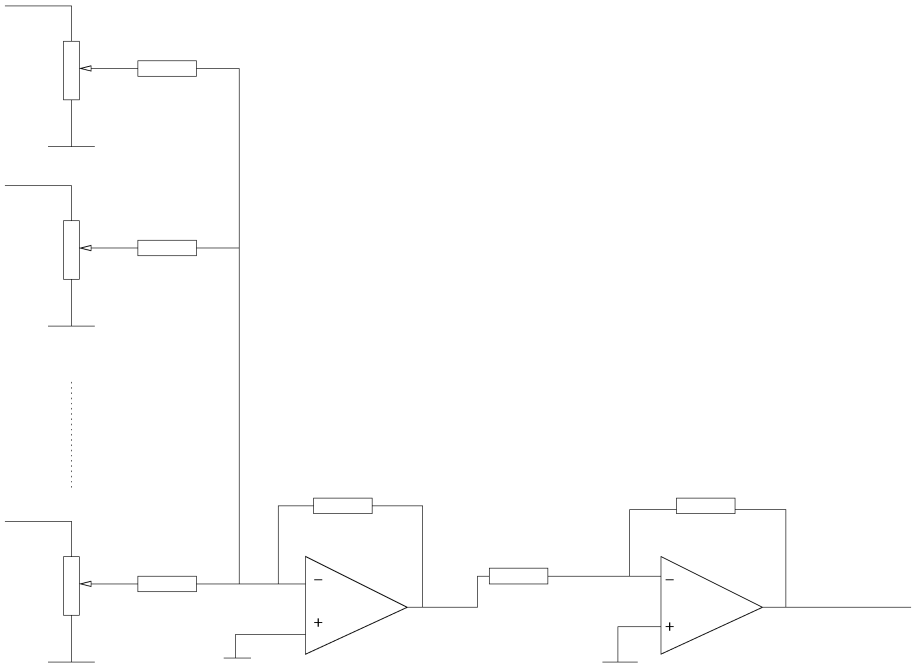


Abbildung 7.4: Prinzipschaltbild einer analogen Mischstufe

7.4 Filter

Filter haben die Aufgabe, den Frequenzbereich einzugrenzen. Bei akustischen Aufnahmen von Signalen, deren Frequenzbereich bekanntermaßen begrenzt ist, kann man alle Teile entfernen, die nicht zur Quelle passen können. Das sind vor Allem Bass-Anteile, die nicht zu einem Instrument gehören können (Tiefbass bei einer Piccolo-Flöte oder einem Triangel und vieles mehr), aber im Signal enthalten sind (Geräusche von außen durch unvollkommene Dämmung, Erschütterung des Mikrofons, Windgeräusche).

Es ist ausgesprochen sinnvoll, bei allen Kanälen einen Hochpass einzusetzen, die keinen sinnvollen Tiefbass enthalten können. Das vermeidet auch einen Großteil von vermeidbaren Verdeckungseffekten oder auch ungewolltes Triggern von Kompressoren und einiges mehr.

7.5 Equalizer

Equalizer verändern gezielt den Frequenzgang des Signals, indem sie bestimmte Bereiche entweder anheben oder absenken. Damit sollten ursprünglich Abweichungen ausgeglichen, gleich gemacht werden. Davon rührt der Name.[2]

7.5.1 „Kuhschwanz"

Die einfachste sinnvolle Schaltung zur Beeinflussung des Frequenzgangs erlaubt, die Tiefen und Höhen getrennt anzuheben oder abzusenken. Da in der graphischen Darstellung die Kurve an einem Ende dabei nach oben oder unten abknickt, während der Mittenbereich

[2] Einen Musikerwitz muss ich hier noch unterbringen. Ein Rockmusiker braucht keinen Equalizer, er braucht eine Equalauter!

in etwa an Ort und Stelle verbleibt, erhielten diese Schaltungen auch den Spitzname „Kuhschwanz-Regler".

Das lässt sich mit wenigen Bauteilen analog realisieren. Bei Verwendung von logarithmischen Potentiometern gibt es auch rein passive Varianten, die aber den Gesamtpegel deutlich absenken. Mit Rückkoppelung ist es möglich, ohne Pegelverlust in der Neutralstellung zu arbeiten. Lineare Potentiometer mit ihren wesentlich besseren Eigenschaften können verwendet werden und die Frequenzgänge der Abschwächung und Absenkung sind symmetrisch. Man nennt das die Baxandall-Schaltung[3].

Davon abgeleitet sind ähnliche Schaltungen, bei denen noch ein oder zwei Mittenkanäle dazu kommen, deren Frequenz und Bandbreite festliegen.

7.5.2 Graphischer Equalizer

Wenn man das Prinzip der einfachen Klangregelung auf mehrere Kanäle erweitert, kommt man zu dem Ansatz, mit mehreren Schiebereglern graphisch den gewünschten Frequenzgang einzustellen.

Es gibt sehr viele Variationen der analogen Realisierung davon. Die besten behalten im Gegensatz zu den einfachen Realisierungen den Q-Faktor und damit die Bandbreite unabhängig von der Reglerstellung des Frequenzkanals konstant. Man bezeichnet das als Constant-Q.

Auch dann weicht der resultierende Frequenzgang von der Reglerstellung ab, da benachbarte Kanäle den Pegel mit beeinflussen. Als Extrembeispiel ist das Maximum des Frequenzgangs höher, wenn alle Regler auf Maximum stehen, als wenn sie abwechselnd auf Maximum und Minimum stehen.

Eine genaue Einstellung des Frequenzgangs nach der Reglerstellung ist aber mit digitaler Technik durchaus möglich, da die gegenseitige Beeinflussung korrigiert werden kann.

Der graphische Equalizer erlaubt relativ schnell und trivial, eine Einstellung zu finden, die zu einer bekannten Abweichung passt (also vom Pegel her gespiegelt ist).

Gängige Ausführungen reichen von sieben bin 31 Frequenzen. Für 10, 15 und 32 Kanäle sind die Frequenzen der Bänder genormt, um mit entsprechenden Analyzern eine direkte Entsprechung von Messung und Korrekturwerkzeug zu erreichen.

Eine präzise Änderung ist durch die Quantisierung der verfügbaren Frequenzen nicht zu erreichen, selbst wenn z.B. eine einzelne Resonanzfrequenz beseitigt werden soll.

7.5.3 Parametrischer Equalizer

Das Konzept des parametrischen Equalizers geht auf George Massenburg zurück. Mit relativ wenigen Bändern, deren Parameter vollständig kontrolliert werden können, kann man gezielt und genau den Frequenzgang beeinflussen.

Pro Band gibt es

Bell/Shelf: nur bei dem obersten und untersten Band: entweder ein Resonanzverhalten (Bell: Glockenförmige Charakteristik) oder Flanke (Shelf) wie beim Kuhschwanzregler: Maximale Wirkung bei der extremsten Frequenz.

Frequenz: die Mittenfrequenz (bei Shelf Eckfrequenz) der Beeinflussung.

[3] Siehe `http://sound.whsites.net/articles/eq.htm` auf [4], Stichwort „Basic Tone Controls"

Pegel: die Verstärkung oder Abschwächung bei der Mittenfrequenz (Bell) oder Extremfrequenz (Shelf).

Q: der Q-Faktor, manchmal auch statt dessen proportional zu dessen Kehrwert die relative Bandbreite.

Damit lassen sich Störfrequenzen gezielt und präzise ausblenden oder beliebige Bereiche schmal- oder breitbandig anheben.

Die Bedienung und die Beurteilung des Effekts ist alles andere als trivial auf die Parameter abzubilden und umgekehrt, was ohne große Erfahrung oft überfordert. Wie viele besonders wirksame Werkzeuge ist dieses gefährlich.

7.6 Zeit-Effekte

Bei den Zeit-Effekten wird das Signal in verzögerter Form (mit) verarbeitet.

7.6.1 Delay, Echo

Bei analoger Technik wird mit Eimerkettenschaltungen oder Bandschleifen gearbeitet, um das Signal zu verzögern (Delay). Wenn man das ursprüngliche Signal bestehen lässt, ergibt sich ein einmaliges Echo (Slap back, im Rock'n'Roll sehr beliebt). Man kann das Signal auch in den Eingang der Verzögerung zurückführen, dann erhält man eine Folge von Echos (Flatterecho), die sich entweder exponentiell abschwächen oder bei hoher Rückkoppelung bis zur Sättigung Aufschaukeln (UFO-Effekt).

Mit digitaler Technik ist eine Verzögerung in Vielfachen des Takts trivial zu machen, man lässt das Signal im Speicher und liest es versetzt aus. Zwischenwerte sind natürlich auch möglich, dann muss aber möglichst geschickt interpoliert werden und es müssen eine Reihe von Speicherstellen gelesen und die passende Zwischenstelle berechnet werden.

Die verzögerten Signale werden oft in den Höhen abgeschwächt oder gar beschnitten. Beim Aufschaukeln ist dafür zu sorgen, dass durch Begrenzung oder Verzerrung eine maximale Amplitude eingehalten wird.

7.6.2 Hall, Raum, Early Reflection, Verzögerung, Platte, Spirale

Wenn sehr viele verzögerte Kopien eines Signals mit zeitlich exponentiell abnehmender Amplitude und zunehmender Verdichtung der Reflektionen – am Besten auch räumlich verteilt – kombiniert werden, entsteht eine Hallfahne, der zeitlich letzte Anteil eines realen Halls.

Die ersten Echos eines echten Hallsignals haben einzeln einen Einfluss auf den Eindruck des Raums und der Position der Quelle im Raum. Daher werden sie bei vielen Hallprogrammen getrennt parametrisiert (Early Reflections).

Je näher eine Quelle beim Hörer ist, um so länger brauchen die ersten Echos. Der Umweg zu den ersten reflektierenden Flächen wird länger. Bei Decke, Boden und Seitenwänden geschieht das nichtlinear nach Pythagoras, bei der Rückwand sogar zweifach linear (hin und rück). Diesen Effekt kann man bei der Simulation von Hall ausnutzen, um eine Abstandswahrnehmung zu steuern. Die Quelle hört sich bei gleichem Hallpegel weniger weite entfernt an, wenn der Hall als Ganzes verzögert ist (Pre-delay). Der relative Hallpegel sollte passend abgesenkt werden.

Ursprünglich wurde die Technik bei Hallräumen verwendet. Im stark hallenden aber bewusst streuenden Raum war ein Lautsprecher und mehrere Mikrofone im Abstand. Das Signal wurde mit Bandschleifen so verzögert, dass es zum gewünschten Klangbild passte.

Unbedingt zu beachten ist: die ganz frühen Reflektionen führen zu Klangänderung durch Interferenzen (Kammfilter!). Danach kommt ein Zeitbereich, der sehr stark auf den Sprechrhythmus passt und bei Sprache die Verständlichkeit senkt, da ein Laut in den nächsten hineinhallt. Auch bei Musik stört ein hoher Pegel in diesem Zeitfenster die Klarheit der Wiedergabe, da unser Ohr auf dieses Intervall sehr genau hört. Danach führt die Hallfahne vor allem zur Wahrnehmung von Größe und Umhüllung.

Eine Hallfahne sollte mit zunehmender Zeit die Höhen absenken, das in der Realität die Luft auf lange Strecken die Höhen (abhängig von der Feuchte) absorbiert und viele poröse Stoffe und dünne Absorber die Höhen bevorzuge absorbieren.

Wenn man die Höhen nicht absenkt, hat man das Verhalten eines der ersten studiotauglichen Mittel, bei vertretbarem Raumverbrauch statt eines echten Hallraums eine Metallplatte zu verwenden, die eine Biegewelle an ihren Rändern reflektierte. Die entsprechenden Programme haben Namen wie Plate.

Auch für Halleffekte wurde die Verzögerung durch Torsionswellen auf Spiralfedern verwendet (Hallspirale). Einzelne Spiralen bildeten unvorteilhafte Flatterechos, so dass für hochwertige Effekte mehrere Spiralen parallel geschaltet und die Übertragung durch Unstetigkeiten auf der Spirale mit zusätzlichen Reflektionsstellen versehen wurden. Ein deutlicher Effekt, der den anderen Hallvarianten fehlt, ist die auffällige Dispersion. Die hohen Frequenzen biegen den Draht und haben eine höhere Rückstellkraft und damit Laufgeschwindigkeit als tiefere. Bei jedem Echo hört man daher diese zeitliche Verschiebung (es kling etwas nach „Tschiuuuuu”). Bei relativ statischen Signalen wie Orgelmusik fällt das kaum auf, was bei breitbandigen kurzen Signalen wie Schlagzeug aber ganz anders ist.

7.7 Modulation

Sehr auffällig sind alle Effekte, die eine Zeitliche Veränderung des Signals erreichen, da solche zeitliche Modulationen bei Sprache in hohem Maß Gefühle transportieren.

7.7.1 Tremolo

Tremolo nennt man eine zeitliche Modulation des Pegels. Wenn man ein Signal auf beide Seiten mischt mit gegenphasiger Modulation, erhält man eine Panorama-Modulation.

Wenn die Modulationsfrequenz in den hörbaren Bereich geht, wird der Klang durch entstehenden Summen und Differenzen der Frequenzen zunächst rau. Bei noch höheren Frequenzen entstehen die Spiegelfrequenzen als nicht harmonische Wellen, die bei ganz verteilten Stellen entweder stehen oder sich bei Frequenzänderungen in mehrere Richtungen (zumindest Summen und Differenzen) verschieben. Wenn die Modulation auch mit einer Polaritätsänderung verbunden ist, nennt man den Effekt Ringmodulation.

7.7.2 Vibrato

Vibrato nennt man die zyklische sinusförmige Modulation der Tonhöhe. Nachträglich lässt sich das erreichen, indem man das Signal verzögert und die Verzögerung moduliert.

7.7.3 Phasing

Phasing entsteht, wenn man durch Allpass-Filter und Mischung mehrere Nullstellen im Frequenzgang erzeugt und deren Position moduliert. Bei breitbandigen und spektral dichten Signalen mit Rauschanteilen fällt der Effekt besonders auf, da nirgends Lücken im Frequenzband sind, bei denen eine zusätzliche Auslöschung naturgemäß nicht auffällt.

7.7.4 Flanging

Phasing wurde ursprünglich durch Abspielen des Signals auf zwei unabhängigen Tonbändern erreicht, deren Laufgeschwindigkeit durch händisches Abbremsen and der Spulenhalterung (Flange) geändert wurden. Dadurch ergibt sich ein dem Flanging verwandter modulierter Kammfilter-Effekt. Heute wird der Effekt dadurch erreicht, dass das originale Signal mit einer sehr kurz und modulierten Verzögerung kombiniert wird, so dass das variable Kammfilter entsteht, in der Regel mit noch mehr Nullstellen im Frequenzgang als beim Phasing. Teilweise wird das verzögerte Signal auch rückgekoppelt, wobei hörbare Verstimmungen nach vielen Wiederholungen entstehen können.

7.7.5 Chorus

Chorus kombiniert das Originalsignal mit einer oder mehreren modulierten verzögerten Kopien, die aber so weit verzögert sind, dass kein wahrnehmbarer Kammfiltereffekt mehr auftaucht. Der Effekt ist, dass man jedes der Signale als einzelne unkorrelierte Quelle hört, zum Beispiel einen Chor statt eine Stimme. Daher kommt der Name.

7.7.6 Rotary

Rotary ist ein besonders komplexer Modulationseffekt. Das Original wurde akustisch und mechanisch erreicht. Die erste Anbieter und heute noch die bekannteste Marke war Leslie, oft wird der Effekt danach benannt. Hauptanwendungsfall ist die elektromechanische Hammond-Orgel. Es gibt mehrere Varianten, eine davon teilt mit einer Frequenzweiche das Signal auf. Die Höhe wurden von eine Treiber auf ein gekrümmtes und rotierendes Horn gegeben. Der Doppler-Effekt führt zu einem Vibrato. Je nach Variation des Hornausgangs (im Original mit Diffusor) und Abstand zur Konstruktion entsteht auch ein Tremolo wegen Entfernungs- und Richtungsabhängigkeit. Wenn dahinter eine Wand steht, kommt deren Echo nicht einfach nur verzögert, sondern auch in der Frequenzmodulation um 180° gedreht: der Weg des Schalls zur Wand verlängert sich, wenn der zum Hörer sich verkürzt und umgekehrt. Im Ganzen entsteht ein Chorus-Effekt.

Der Bassanteil wurde von einem Basslautsprecher vertikal abgestrahlt in eine ebenfalls rotierende Rutsche. Diese führte dazu, dass die Abstrahlrichtung der Mitten rotiert, also beim Hörer ein Tremolo im Mittenbereich entsteht.

Die Konstruktion bietet zwei Geschwindigkeiten. In der langsamen Einstellung hört man vor allem einen komplexen Chorus Effekt - durch die Drehung und variable Abstrahlung in den Raum auch im Stereobild sehr stark moduliert. Bei schneller Einstellung hört man vor allem ein schnelles und starkes Vibrato.

Der auffälligste Effekt ist aber der Wechsel zwischen den beiden Geschwindigkeiten. Der Basskanal hat ein erheblich höheres Trägheitsmoment als der Hochtonkanal und braucht zum Wechsel deutlich länger. Der Wechsel wird von versierten Musikern gezielt als Ausdrucksmittel eingesetzt.

7.8 Frequenzbeeinflussung

7.8.1 Harmonizer

Harmonizer erzeugen wie der Chorus-Effekt (siehe Kapitel 7.7.5) eine virtuelle zweite (oder mehr) Stimme aus einem Signal. Hier wird jedoch die Tonhöhe um einen Faktor geändert. Das geschieht, indem ein Delay mit einer um den Faktor gegenüber dem Abtasten des Eingangssignals geänderten Geschwindigkeit ausgegeben wird. Letztendlich ist das als Basis eine Verzögerung, die mit einem Sägezahn-Verlauf moduliert ist. Bei ansteigender Verzögerung wird das Signal verlangsamt, die Tonhöhe also vermindert und umgekehrt. Für einen überzeugenden Effekt sind aber mehrere zusätzliche Vorkehrungen zu treffen, um ziemlich auffällige Artefakte zu verhindert.

- Der Übergang zum Beginn des Modulationszylus muss ohne Pegelsprung erfolgen, also z.B. jeweils im Nulldurchgang oder durch Überblendung zu einem Signal mit einer anderen Phasenlage der Verzögerung - hier braucht man zwei Verzögerungseitungen
- Ein auffälliges zeitliches Echo ist zu vermeiden, daher darf die Zeitkonstante nicht zu lange werden. Andererseits muss die niedrigste zu transformierende Frequenz mit einer vollen Schwingung erfasst werden, damit es nicht zu Phasensprüngen mit Verzerrungen und ohne Transformation der niedrigeren Frequenzen kommt. Um einen Kompromiss zu erreichen, kann eine Frequenzweiche eingesetzt werden, um die verschiedenen Frequenzen mit unterschiedlichen Verzögerungsgliedern zu bearbeiten, jeweils zur tiefsten verarbeiteten Frequenz passend.

Mit Faktoren nahe 1 erreicht man einen überzeugenden Chor-Effekt, mit weniger auffälliger zyklischer Modulation als beim weiter oben beschriebenen klassischen Chorus(siehe Kapitel 7.7.5, Seite 102). Man kann den Effekt aber auch einsetzen, um Stimmen in einem bestimmten musikalischen Intervall zu erzeugen, z.B. eine Oktave höher oder tiefer mit Faktoren von 2 oder 0,5. Die linear mit transformierten Formanten ändern den Klangeindruck der neu erzeugten Stimmen gegenüber dem Original, was auch erwünscht sein kann (insbesondere ohne das Original-Signal). Man spricht manchmal beschreibend vom Micky-Maus oder Monster-Effekt.

7.8.2 Autotune

Wenn die Tonhöhe des Signals kontrolliert wird und der Harmonizer automatisch den Grundton auf Tonhöhen aus einer vorgegebenen Tonleiter konvertiert, wird das Signal nachträglich auf diese Frequenzen normalisiert. Wenn bei Tonhöhenänderungen des Signals diese Zielfrequenz wechselt, fällt der resultierende Sprung in den Formanten extrem auf („Cher-Effekt"). Dieser Effekt wird oft inflationär neben der Zeit-Quantisierung zum automatischen Korrigieren von Schwächen im Eingangssignal eingesetzt.

7.8.3 Double Tracking

Wenn die Tonhöhe kontrolliert und eine zweite Stimme so generiert wird, dass sie eine musikalisch sinnvolle zweite Stimme in der vorgegebenen oder von Software erkannten Tonleiter erzeugt, kann man eine Begleitstimme generieren. Besonders überzeugend ist das, wenn die Formanten analysiert und durch Filterungen so geändert werden, dass sie natürlich klingen.

7.9 Nichtlineare Kennlinie: Sättigung, Verzerrung

Es ist möglich, Signale an einer nichtlinearen Kennlinie zu bearbeiten, d.h., sie nichtlinear zu verzerren. Das kann reale Komponenten nachahmen, bei denen das der Fall ist. Dies ist als Effekt anzusehen, keineswegs als allgemeiner Königsweg der Verbesserung.

Durch Übersteuerung eines AD-Wandlers, von typischen Transistorstufen oder sonstigen hart gegengekoppelten Verstärkerschaltungen entsteht das harte Clipping. Alles über einer bestimmten Schwelle wird auf das Maximum begrenzt. Der Effekt ist drastisch und erzeugt auch bei leichter Übersteuerung sofort sehr viele Oberwellen auch hoher Ordnung. Dieser Effekt ist in der Regel zu vermeiden. Musikalisch sinnvoll wird er eher selten angewandt.

Durch Übersteuerung schwach oder gar nicht gegengekoppelter Röhrenschaltungen, FET-Schaltungen, gegenparallelen über Vorwiderstand angeschlossener Dioden (vor allem aus Germanium) oder Magnetbändern entsteht eine kontrollierbare Übersteuerung. Da die Kennlinie nicht abknickt, sondern ein gerundeter Übergangsbereich vorhanden ist, lässt sich die Stärke des Effekts durch den Eingangspegel fein dosieren. Man spricht von Overdrive oder Saturation. Bei einzelnen Tönen fällt der Effekt sehr wenig auf, da die Oberwellen zum Signal passen. Bei Kombination vieler Töne entstehen auch Summen- und Differenzfrequenzen, die anharmonisch und damit auffällig sind. Bei extrem komplexen und breitbandigen Signalen können diese Anteile wieder teilweise verdeckt werden.

Übertrager übersteuern nicht bei einem festen Pegel, sondern, wenn das zeitliche Integral einen Pegel überschreitet. Sie können auch auf Dauer magnetisiert bleiben.

Die Charakteristik lässt sich bei Bedarf simulieren, insbesondere muss man zuerst integrieren (-6 dB Abfall/Oktave), Clippen und dann Differenzieren (+6 dB Anstieg/Oktave). Das Remanenzverhalten wird wohl kaum jemand als Effekt einsetzen wollen, da es schlecht reproduzierbar ist. Das magnetisierte Material erinnert sich gewissermaßen an die letzte starke Aussteuerung.

Für viele gehört das Übertragerclippen unbedingt zur den wesentlichen Eigenschaften irgendwelcher alter Studiogeräte (Kompressoren...), die unbedingt in Plugins originalgetreu nachgeahmt werden müssen. Persönlich ziehe ich es vor, Effekte einzeln bei Bedarf einzusetzen, also Kompression durch einen möglichst neutralen Kompressor, dann Übertragersättigung, falls wirklich erforderlich u.s.w.

7.10 Analoge Bearbeitung

Ursprünglich wurden alle genannten Effekte ausschließlich analog realisiert. Frequenzbeeinflussung erfolgt dabei mit den frequenzabhängigen Impedanzen von Kondensatoren oder – seltener – Spulen. Bei vielen Schaltungen wurden Spulen nach Verbreitung der Operationsverstärker durch Gyrator-Schaltungen ersetzt.

Verzögerungen werden durch Bandschleifen oder bei kurzen Zeitkonstanten (Flanger, teilweise auch Echo) durch Eimerkettenschaltungen erzeugt. Komplexe Hallfunktionen werden mittels echter Räume oder mechanischen Analogien in Form von Platten oder Spiralen bereitgestellt.

7.11 Digitale Bearbeitung

Die digitale Bearbeitung von Signalen hat den Vorteil, dass sie exakt reproduzierbar ist und kein sonst unvermeidliches Rauschen mit sich bringt.

Die lineare Bearbeitung von Signalen erfolgt durch Modellierung der zugehörigen Impulsantwort (IR). Das Signal wird damit gefaltet.

Die Bearbeitung erfordert in der Regel heutzutage nur die notwendigen Programme (Plugins) und können direkt im Rechner erfolgen. Das erspart Platz, Verkabelungsaufwand, Stör- und Fehlerquellen.

7.11.1 FIR

Die finite Impulsantwort ist eine vorberechnete endlich lange Impulsantwort, die typischerweise mittels Fouriertransformation und geschicktem Ausblenden statt simplem Abschneiden erzeugt wird. Sie kann im Rahmen der Begrenzung exakt jeden beliebigen Frequenzgang generieren.

Die beiden Nachteile sind

- Durch die endliche Länge ist die absolute Frequenzauflösung limitiert (Unschärferelation), was vor allem im Bass eine Einschränkung darstellt.

- Man kann nicht einfach in einer Variablen eine Parameteränderung unterbringen für Echtzeiteingriffe. Vielmehr muss die Antwortfunktion bei jeder kleinen Änderung neu berechnet und in den Algorithmus geladen werden.

Bei langen Impulsantworten kann der hintere Teil sinnvollerweise im Rechenaufwand reduziert werden, indem das Signal fouriertransformiert und mit der Fouriertransformierten der Antwortfunktion (vollständig, mit Phase) multipliziert und danach das Ergebnis per Rück-Fouriertransformation erhalten wird.

Durch solche Faltungen kann auch ein vorbereitetes Hallsignal eines realen oder virtuellen Raums naturgetreu auf das Signal angewandt werden.

7.11.2 IIR

Die IIR-Algorithmen arbeiten mit Rückkoppelung. Eine Gefahr ist dabei, dass bei ungünstigen Einstellungen eine Rückkoppelung stattfinden kann. Ansonsten werden die Differentialgleichungen, die das gewünschte Verhalten beschreiben, in gleichlautende Differenzengleichungen überführt. Da die Weite der Differenz durch den Takt festliegt, wird das theoretische Verhalten bei unendlicher Frequenz jetzt auf die Grenzfrequenz des Signals transformiert. Das gesamte Verhalten in der Nähe der oberen Grenzfrequenz ist die komprimierte Fassung des sonstigen Grenzwertes.

Komplexe Frequenzgänge auch bis in tiefste Frequenzen sind mit relativ trivialen Algorithmen ohne großen Rechenaufwand und mit sofortiger Parametrisierung zu realisieren.

Bei hohen Frequenzen sollte man im Plugin aber die Mittenfrequenz und die ebenfalls komprimierte Bandbreite (oder umgekehrt den Q-Faktor) so korrigieren, dass man näher an das gewünschte Ergebnis kommt. Die hochfrequente Flanke bleibt dabei immer noch verformt, aber das nimmt man meist in Kauf.

Müller[12][4] gibt die Transformationen folgenderweise an, wobei f_s die Nyquistfreqenz des Signals ist, f_{alg} die Frequenz im IIR Algorithmus, f_{res} die resultierende Frequenz im bearbeiteten Signal

$$f_{\text{res}} = \frac{f_s}{\pi} \arctan\left(\pi \frac{f_{\text{alg}}}{f_s}\right) \tag{7.1}$$

Die gewünschte Frequenz muss im Algorithmus um den Faktor

$$C = \frac{\tan\left(\pi \frac{f_{\text{res}}}{f_s}\right)}{\pi \frac{f_{\text{res}}}{f_s}} \tag{7.2}$$

angehoben werden.

Um zumindest die untere Flanke eines parametrischen Equalizerbandes zu korrigieren, wird der effektive Faktor Q_{eff} für den Algorithmus transformiert zu

$$Q_{alg} = Q_{\text{eff}} \cos\left(\pi \frac{f_{\text{res}}}{f_s}\right) \tag{7.3}$$

7.12 Programme zur Audio-Bearbeitung

Mittlerweile ist unbedingt zu fordern, dass die Programme intern mit mindestens 32 Bit Fließkommazahlen arbeiten, da während der Bearbeitung die Zahlenwerte von Zwischenergenissen in weiten Bereichen schwanken und nur so Auflösungbegrenzungen vermieden werden.

7.12.1 Wave-Editoren

Die einfachsten Programme zur Bearbeitung von Audiodaten sind die Wave-Editoren. Sie erlauben in der Regel die Aufnahme und Wiedergabe und die Bearbeitung mit Plugins. Die Bearbeitungsschritte verändern das Datenmaterial direkt, ohne das Original zu erhalten. Es ist nicht vorgesehen, weitere Spuren mit simultanem Monitoring der alten aufzunehmen oder komplexes Routing zu erlauben oder die Bearbeitungschritte reproduzierbar neben dem ursprünglichen Datenmaterial darzustellen.

Zum Schneiden, teilweise auch für Auswertungen bis hin zu Messtechnik und für eine endgültige Nachbearbeitung sind diese Programme ausreichend. Sie sind recht übersichtlich zu bedienen.

Ein freies Programm mit diesen Fähigkeiten ist zum Beispiel Audacity.

7.12.2 Digital Audio Workstation, DAW

Die Digitale Audio Workstation ist das schweizer Offiziersmesser der Audiotechnik. Zu den Fähigkeiten gehören mindestens

Aufnahme neuer Spuren mit Monitoring der bisherigen. Das ist notwendig, um Overdubs zu erzeugen, neue Spuren, die synchron zu bereits aufgenommenen abgespielt werden sollen.

[4] [12], Seite 57

Import fertiger Tonspuren. Man kann neben der Möglichkeit der Aufnahme auch Audiodateien als Spur importieren und einbinden.

Abmischung aller Spuren. Aus allem Spuren kann eine Abmischung mit Panorama-Einstellungen erstellt werden.

Klangliche Bearbeitung und Analysen durch Plugins. Alle Spuren einzeln können mit Plugins oder intern im Programm klanglich analysiert und bearbeitet werden können.

Routing, Zwischenmischung, Subgruppen. Man kann Signalflüsse frei festlegen. Dadurch ist es möglich, externe Hardware-Effekte durch Ein- und Ausgänge einzubinden oder auch, Spuren für eine gemeinsame Bearbeitung zusammenzufassen. Eine durch Mischung (statt Datei) gebildete virutelle Spur wird auch als Bus bezeichnet.

Speicherung aller Bearbeitungsschritte im Zeitverlauf (Total Recall). Das Programm speichert (außer bei gewollten Schnitten) die ursprünglichen Daten und die Bearbeitungsschritte und nicht deren Zwischenergebnisse. Die Parameter können im Zeitverlauf gespeichert und auch bearbeitet werden. Damit ist jeder Bearbeitungsschritt nicht nur reproduzierbar sondern auch editierbar.

Teilweise bieten sie noch

Integration und Bearbeitung von Midi-Spuren. Das erlaubt das direkten Bearbeiten der Spuren in Midi-Dateien, so dass man bei deren Verwendung nicht auf getrennte spezialisierte Programme und das Importieren des Ergebnisses angewiesen ist.

Integration von Videospuren. Dies ist notwendig, wenn das Ergebnis in ein Video integriert werden soll und der zeitliche Zusammenhang bei der Arbeit beachtet werden muss.

Ein freies Programm mit den genannten Fähigkeiten ist Ardour (GPL Lizenz).

8 Wiedergabe

8.1 Lautsprecher

8.1.1 Qualität der Wiedergabe

Der Lautsprecher hat die Aufgabe, einen bestimmten Bereich optimal zu beschallen. Die Wiedergabequalität wird durch einige wichtige Parameter charakterisiert.

Frequenzgang. Dies ist der mit Abstand wichtigste Aspekt. Wünschenswert ist ein weiter Wiedergabebereich, in dem die Abweichung von der idealen Gerade minimal sein soll. In der Regel wird nur der Frequenzgang in Hauptabstrahlungsrichtung angegeben.

Wegen der Art der Signalverarbeitung beim Hören sind Resonanzüberhöhungen deutlich störender als schmalbandige Absenkungen. Ein Grund kann sein, dass Resonanzen häufig als Charakteristikum der jeweiligen originalen Schallquelle dienen, während Absenkungen durch Kammfilter-Effekte in allen reflektierenden Umgebungen auftreten und zur Erkennung eine Quelle weitgehend ausgeblendet werden. Bei niedrigen Hörpegeln ist eine Wiedergabe tiefer Frequenzen (unter 100 Hz) nicht wahrnehmbar und daher auch nicht notwendig.

Die meiste Musik verwendet nur Frequenzen bis herab zu 40 Hz, ausgenommen z.B. Orgelmusik. Selbst gängige Schlagzeugklänge reichen oft nur bis ca. 60 Hz. Nach oben gibt es mittlerweile keinen guten Grund, die Wiedergabe nicht bis zu 20 KHz zu gewährleisten.

Richtcharakteristik. Früher wurde dieser Aspekt oft unterschätzt. Untersuchungen u.a. von Anselm Görtz stellten die Bedeutung aber heraus. Wichtig ist, dass zumindest von den Mitten bis zu den Höhen die Charakteristik gleichmäßig ist und dass im genutzten Winkelbereich der Frequenzgang möglichst unverändert ist.

Während Görtz eine farbcodierte Darstellung von Pegel (relativ zur 0° Wiedergabe) in Abhängigkeit von Frequenz und Winkel (getrennt horizontal und vertikal) favorisiert, stellen Sean Olive und seine Gruppe den gemittelten Frequenzgang in den Gesamtraum für verschiedenen Bereiche als zusätzliche Frequenzkurven dar.

Der Winkelaspekt hat zwei wichtige Auswirkungen. Eines ist, dass man nicht nur entlang einer Linie einen vollwertigen Klang haben will, sondern der/die Hörer sich auch bewegen dürfen ohne allzu große Einschränkungen.

Aber selbst ein unbeweglicher Hörer am Sweet Spot hat wesentliche Vorteile, nämlich das, was Olive in den Vordergrund stellt: Der Summenfrequenzgang, der den ganzen Raum anregt, passt zu dem, was direkt gehört wird. Wie Linkwitz herausstellt, ist unser Ohr darauf optimiert, einen erkennbar passenden Raumklang in der Wahrnehmung vom direkten Signal zu trennen und dieses auch mit dessen Hilfe genau zu erkennen. Bei starken Unterschieden im Frequenzgang gelingt das schlechter und der Raumeinfluss stört die Wahrnehmung viel stärker.

Alle Monopolkonstruktionen gehen im Bass in eine 4π-Abstrahlung über. Das führt zu einer Überbetonung des Basses im Raum, wenn der Freifeldfrequenzgang linear ist. Je nach Aufstellungsort kann das noch verstärkt werden, vor allem in der Raumecke. Aktive Lautsprecher besitzen oft Schalter, mit denen der Frequenzgang an den Aufstellungsort angepasst werden kann.

Ein Ansatz, die Richtwirkung konstant bis in den Bass zu halten, ist die Verwendung von Rundstrahlern (zumindest für die Ebene), was Linkwitz favorisiert.

Der komplementäre Ansatz ist die Verwendung von gerichteter Bassabstrahlung, indem Dipole oder Kombinationen wie Nierencharakteristik eingesetzt werden. Bei Nieren ist der Einfluss der rückwärtigen Wand ausgeblendet, was die Aufstellung weniger kritisch macht. Alle Dipole kämpfen aber im Tiefbass mit Einbußen im Wirkungsgrad und maximal erreichbaren Schalldruck gegenüber Monopol-Lösungen.

Maximal erreichbarer Schallpegel mit vertretbarer Verzerrung. Vorweg: zumindest im Bassbereich erreichen Lautsprecher Klirrfaktoren, die im Verstärkerbereich längst unterboten werden.

Görtz gibt Kurven des maximalen Schallpegels in 1 m Abstand bei Grenzklirrfaktoren an. Diese sind 3%, im Bass zusätzlich 10%. Sie definieren den oberen Rand des maximal sinnvoll erreichbaren Dynamikbereichs. Alleine die gewählten Zahlen vermitteln einen Eindruck, welche Kompromisse bei Lautsprechern mit heutiger Technik immer noch eingegangen werden müssen.

8.1.2 Wandlertypen

Dynamischer Lautsprecher

Eine Schwingspule taucht in einen Topfmagneten ein und erzeugt durch ihren Stromfluss die Antriebskraft auf die mit ihr verbundenen Membran.

Das Verhalten eines Chassis am unteren Ende des Übertragungsbereichs wird durch Parameter bestimmt, die zuerst von Thiele[29] und Small[26] [27] [28] definiert wurden und die seither meist von den Herstellern angegeben werden.

Die Thiele-Small Parameter sind

$R_{\mathbf{e}}$ der elektrische Gleichstromwiderstand der Schwingspule.

$F_{\mathbf{s}}$ die Freiluftresonanzfrequenz des Chassis.

$Q_{\mathbf{ms}}$ der mechanische Q-Faktor der Resonanz bei offenen Klemmen.

$Q_{\mathbf{es}}$ der elektrische Einfluss der kurzgeschlossenen Spule auf den Q-Faktor.

$Q_{\mathbf{ts}}$ der kombinierte Q-Faktor des kurzgeschlossenen oder an aktiven Verstärker angeschlossenen Chassis. Er berechnet sich aus den beiden anderen Q-Faktoren mit

$$\frac{1}{Q_{\mathrm{ts}}} = \frac{1}{Q_{\mathrm{ms}}} + \frac{1}{Q_{\mathrm{es}}} \tag{8.1}$$

$V_{\mathbf{as}}$ das theoretische Volumen einer geschlossenen Box, die die gleiche rückstellende Federkonstante besitzt wie die Membranaufhängung.

$X_{\mathbf{max}}$ die maximale Auslenkung der Membran mit maximal 10% Klirrfaktor.

Von Richard Pierce gibt es ein Spreadsheet[21] und zugehöriges Paper [22], das aus den Daten eines Treibers die passenden geschlossenen und Bassreflex-Boxen sowie nach Vorwahl eines Wunschvolumens der Box die Eigenschaften des Kompromisses berechnet, einschließlich Frequenzgang und maximaler Leistungsaufnahme unter Berücksichtigung der maximalen Auslenkung $X_{\max}$.

Kolben ist die am meisten verwendete Membranform. Um ein Durchbiegen so weit wie möglich zu minimieren, sitzt die Schwingspule am ende einer konusförmigen oder etwas nach außen gewölbten (nicht abwickelbaren, NAWI-) Membran. Die NAWI Membran hat den Vorteil, dass sie nicht in eine Schwingung mit halber Frequenz (einmal nach innen, dann nach außen) aufbrechen kann, die zu Pseudobässen mit halber Frequenz führt. In der Mitte befindet sich eine Kalotte oder ein Phase Plug. In der Regel ist ein solches Chassis nach hinten offen und wird durch den Einbau in einer Box an die Verwendung angepasst.

Nach oben wird die Übertragung begrenzt durch die Induktivität der Schwingspule, Phasenauslöschungen durch Wegunterschiede von der Membran aus (durch ein Phase Plug minimiert) und (unregelmäßig) durch ein Aufbrechen in Partialschwingungen.

Kalotte ist die Bezeichnung einer Membran, die einem Ausschnitt aus einer nach außen gewölbten Kugelfläche entsprechend geformt ist. Sie erzeugt näherungsweise ein kugelförmiges Wellenfeld, das eine weite Dispersion besitzt. Es wird entweder direkt in die Luft oder ein Wave Guide eingekoppelt.

Kalottenmebranen werden mittlerweile fast ausschließlich im Hochtonbereich verwendet, selten im Mittenbereich. Das Chassis ist in sich geschlossen.

Kompressionstreiber sind nicht zur direkten Luftanpassung ausgelegt, sondern zum Antreiben eines Horns oder Wave Guide. Eine umgekehrte Kalotte erzeugt Schallwellen, die auf den Ausgang fokussieren. Um Auslöschung durch unterschiedlich lange Laufwege zu vermeiden, ist eine Wegformung durch gleich lange Bohrungen vorgeschaltet, der Phase Plug. Er erlaubt, den Wandler bis zu den gewünscht hohen Frequenzen zu betreiben. Ohne die starke akustische Belastung eines angeschlossenen Horns steigt die Auslenkung leicht über zuträgliche Werte an, der Wandler ist auf die Art schnell zerstört[42]

Doppelkonus ist eine Bauart, die zwei durch federnde Übergänge miteinander verbundenen Membranen für eine Breitbandwiedergabe verwendet. Die hintere ist eine bis auf den federnden inneren Bereich normale Kolbenmembran zur Basswiedergabe. Davor sitzt eine fest mit der Schwingspule verbundene konische Membran zur Höhenwiedergabe. Ihre Gestaltung und der Abstand zur hinteren Membran sind extrem kritisch für das Übergangsverhalten. Meist überlappen die Übertragungsbereiche, was den Übergang relativ uneben gestaltet. Eigentlich liegt eine simple mechanische Frequenzweiche vor. Mit dieser Technik werden die günstigsten Breitbandlautsprecher gebaut.

Koaxiallautsprecher sind eigentlich zwei ineinander verbaute Lautsprecher. Der Basslautsprecher enthält in der Mitte eine konusförmige Öffnung, durch die ein dahinter angebrachter getrennter Hochtöner abstrahlt. Er benutzt die Kolbenmembran dabei als Horn.

Beide Chassis werden durch eine Frequenzweiche getrennt angesteuert. Mit entsprechendem Aufwand kann eine recht gute Breitbandwiedergabe erzielt werden, allerdings selten bis in die extremen Höhen. Ein Vorteil des Verfahrens ist, dass Bässe und Höhen ein gemeinsames akustisches Zentrum haben, was z.B. die Winkelabhängigkeit des Übertragungsverhaltens im Übergabebereich vermindert und axial symmetrisch gestaltet.

Magnetostat

Beim Magnetstaten ist die einzelne Schwingspule durch ein flächig aufgebrachtes Feld von stromdurchflossenen Leitungen im Magnetfeld ersetzt. Das führt zu einem flächig verteilen Antrieb der gesamten strahlenden Fläche. Das Prinzip wird im Mitten- und Höhenbereich eingesetzt.

Air Motion Transducer

Der zieharmonikaförmig gefaltete Bereich einer Folie wird an jeder Flanke in abwechselnder Richtung von Strom in integrierten Leitern durchflossen. Das Ganze befindet sich so in einem Magnetfeld, dass die Lamellen auf einer Seite sich wechselnd öffnen und schließen und dadurch die enthaltene Luft hinaus drücken oder wieder einströmen lassen. Das führt zu einer flächig homogenen Abstrahlung mit relativ hoher Schnelle wegen der Einschnürung. Das Prinzip findet Anwendung in den Höhen.

Biegewellenwandler

vermeiden keine Partialschwingungen, sie machen sie zum Prinzip der Abstrahlung. An einem Ende wird die Schwingung aufgeprägt und sie läuft als mechanische Welle bis zum gedämpften Ende der Membran. Lautsprecher dieser Bauart sind in der Lage, breitbandige Wiedergabe mit hoher Phasentreue zu realisieren. Sie können beispielsweise rechteckförmige akustische Wellen realistisch wiedergeben und sie werden auch als Messstrahler für Mikrofonmessungen verwendet. Entwickelt von Manger.

Piezo

ist ein Effekt, der die elektrische Feldstärke an einem geeigneten Kristall direkt in eine Dickeänderung umsetzt. Wenn zwei gegensinnig angeregte Kristalle miteinander verbunden sind, kann (wie beim Bimetall) eine Biegung erzeugt werden, die auf eine Membran und von dort eventuell in ein Horn übertragen werden können.

Die Piezo Wandler haben eine sehr hohe (vor allem kapazitive) Impedanz und einen hohen Wirkungsgrad. Sie sind nicht in der Eingangsleistung sondern wegen der Gefahr des Durchschlags in der maximalen Spannung begrenzt. Mit jedem Durchschlag sinkt der Wirkungsgrad, bis zum Ausfall.

Nachteilig ist dir typisch Resonanzüberhöhung an der unteren Grenzfrequenz. Man kann sie ohne Hochpassfilter verwenden oder mit parallel geschaltetem Widerstand so mit einem Hochpass beschalten, dass die Resonanz unterdrückt wird.

Sie gehen teilweise im Übertragungsbereich bis in den Ultraschallbereich. Piezos sind im Höhenbereich verwendbar, je nach Modell ab 1,8 Khz.

Plasma

ist die wohl direkteste Art, Luft zu Schall anzuregen. Eine feine Spitze wird massiv positiv aufgeladen und verursacht eine stille Korona-Entladung, bei der die positiven Ionen von der Spitze weggetrieben werden. Die Spannung wird moduliert und damit die Geschwindigkeit, mit der die Ionen und das mitgerissene Gas wegströmen. Eine hohe Linearität ist im Prinzip möglich.

Nachteilig ist, dass dabei Ozon entsteht, das immerhin etwa zehn mal giftiger als Chlor ist. Im Freien reicht der erreichbare Schallpegel nicht wirklich aus. Der Effekt ist nur für Hochtöner sinnvoll.

Elektrostat

Wie beim Magnetostat wird die gesamte Membran angeregt, in diesem Fall per elektrostatischer Anziehung. Eine Membran wird mit hochtansformierter Wechselspannung überlagert mit einer Gleichspannung versorgt. Wie bei jedem flächigen Strahler ist die Richtcharakteristik frequenzabhängig und bei großen Abmessungen, sofern keine Biegung in zwei Richtungen vorliegt, ist der Frequenzgang Abstandsabhängig. Im Bass sollte ein Kolbenstrahler im passenden Gehäuse übernehmen.

Modulierter Ventilator

Die neueste Variante für extremen Bass (Pegel und untere Grenzfrequenz) ist ein planarer Ventilator, dessen Anstellwinkel durch das Signal moduliert wird. Im Gegensatz um Kolbenlautsprecher ist nicht die maximale Auslenkung limitierend, sondern die maximale Schnelle. Bei gleicher Schnelle wird der gleiche Schalldruck generiert bis zu prinzipiell beliebig tiefen Frequenzen. Das Wandlerprinzip ist aktiv, die Energie steuert der Motor zur Rotation des Ventilators bei.

Ein Kolbenlautsprecher kann das über den Druckkammer-Effekt (keine Welle) nur in einem kleinen dichten Raum erreichen.

8.1.3 Gehäuse

Die Dynamischen Lautsprecher haben ohne Einbau eine im Verhältnis zur tiefsten übertragenen Frequenz viel zu kleinen Durchmesser und erleiden bei recht hohen Frequenzen bereits einen akustischen Kurzschluss. Die Rückwärtig abgestrahlten Wellen werden herumgebeugt und löschen sich wegen eines abnehmenden Laufzeiteffekts zur 180° Phasenverschiebung zunehmend aus, was zu einer Pegelabnahme zum Bass mit 6 dB/Oktave führt. Zu hohen Frequenzen wird das durch die zunehmende Bündlung verhindert, dazwischen liegt ein Bereich mit einer Verstärkung. Hier wird der Schall der Rückseite auf die vordere Seite gebeugt (und umgekehrt), die Laufzeit führt im Übergangsbereich zu eine Verstärkung des Schalldrucks.

Schallwand

Mit dem Einbau in eine Schallwand kann die untere Grenzfrequenz der Auslöschung durch einen verlängerten Umweg abgesenkt werden. Der Übergang erfolgt gleichmäßiger, wenn der Lautsprecher nicht in die Mitte gesetzt werden. Jede Kante hat eine andere Übergangsfrequenz und bei geschickter Platzierung mitteln sich die Unregelmäßigkeiten der Übergänge heraus.

Offene Box

Der Umweg wird durch eine quaderförmige Box mit offener Rückwand noch verlängert. Problematisch ist aber, dass nun durch die Laufzeiteffekte und Fehlanpassung an der geöffneten Rückseite der Schall bei tiefen Frequenzen reflektiert wird (halb offenes Rohr). Das führt zu Resonanzen, wenn der ungeradzahlige Vielfache des vierfachen Abstands zur Rückwand zur Wellenlänge passen.

Transmission Line

Man kann die (gefaltete) offene Rückwand so auslegen, dass die unterste Resonanz den Bassbereich unter die Resonanzfrequenz des Treibers fällt und bei geeigneter Wahl den Bassbereich zu tieferen Frequenzen erweitert. Das Konzept bezeichnet man als Transmission Line. Es ist darauf zu achten, die höheren Resonanzen zu unterdrücken. z.B. durch Bedämpfung in der Transmission Line, die höhere Wellen bedämpft.

Dipol

Die Schallwand arbeitet als Dipol, im Bass gibt sich mit gedrehter Polarität das gleiche Signal wie nach vorne. Man kann durch weitere Treiber mit gedrehter Polarität nach hinten dafür sorgen, dass dieses Verhalten über den gesamten Hörbereich erhalten bleibt. Dann ist die Box insgesamt ein Dipol. Die Richtcharakteristik kann auf diese Weise über den gesamten Hörbereich weitgehend konsistent gehalten werden.

Da ein idealer Dipol im 90° Winkel keinen Schall abstrahlt, kann man einen entsprechend ausgerichteten Dipol verwenden, um im Raum ein Signal ausschließlich indirekt, durch den Raumhall, zum Hörer zu übertragen. Es wirkt dann sehr entfernt.

Geschlossene Box

Die geschlossene Box schirmt den rückwärtigen Teil der Membran von der Außenwelt ab. Der Lautsprecher arbeitet als Monopol.

Die rückwärtige Kammer wirkt durch die endliche Kompressibilität als zusätzliche rückstellende Federkonstante. Um eine leichtere Vergleichbarkeit zur Rückstellfederkonstante des Chassis zu erreichen, wird dieses mit der wirksamen Fläche in ein gleich stark zurückstellendes Luftvolumen eingestellt, das äquivalente Volumen V_{as}. Eine Füllung mit fein verteilten Fasern mindert stehende Wellen und innere Resonanzen. Zusätzlich steigert sie den Wärmeinhalt, so dass die Kompression nicht mehr wie üblich adiabatisch erfolgt, sondern durch die vom Füllmaterial mit aufgenommene Kompressionswärme genähert isotherm. Das kann im Extremfall zu einem akustisch wirksamen Volumen führen, das bis zum Adiabatenexponenten von Luft, 1,4-fach größer ist als das geometrische Volumen. Nennen wir es V_{ak}

Das Wirksame Volumen V_{eff} ergibt sich aus V_{as} und V_{ak} nach

$$V_{\mathrm{eff}} = \frac{V_{\mathrm{as}} V_{\mathrm{ak}}}{V_{\mathrm{as}} + V_{\mathrm{ak}}} \tag{8.2}$$

Da die Resonanzfrequenz sich umgekehrt zur Wurzel aus der Kehrwert des effektiven Volumens verhält, erhöht sich die Resonanzfrequenz durch die geschlossene Box.

$$f_{\mathrm{box}} = f_0 \cdot \sqrt{\frac{V_{\mathrm{as}}}{V_{\mathrm{eff}}}} \tag{8.3}$$

Der Q-Faktor ändert sich durch den Einbau genau so wie die Resonanzfrequenz.

$$Q_{box} = Q_{\mathrm{ts}} \frac{f_{\mathrm{box}}}{f_0} \tag{8.4}$$

Bei einem resultierenden Q-Faktor von $\frac{1}{\sqrt{2}}$ (ungefähr 0,7) liegt der maximal flache Übergang bis zur Grenzfrequenz vor.

Man kann auch einen anderen Q-Faktor einstellen und über die Linkwitz-Transformation die vorhanden Charakteristik durch eine beliebige andere Kombination von Grenzfrequenz und Q-Faktor ersetzen. Das erfordert aber eine große Pegelanhebung, wenn die wirksame Frequenz vermindert wird. Wenn die mechanischen Parameter des Lautsprechers, vor allem die maximale lineare Auslenkung X_{max} sowie die Belastbarkeit und die Verstärkerleistung das zulassen, kann man sehr kompakte Konstruktionen vor Allem für Wohnräume realisieren. Das sollte wegen der expliziten Anpassung an das vorhandene Gehäuse und den vorhandenen Treiber am besten in eine aktive Realisierung integriert sein.

Unterhalb der Grenzfrequenz fällt die Übertragungskurve mit 12 dB/Oktave.

Bassreflex Box

Eine prinzipiell einfache Methode (wie immer liegt der Teufel im Detail) zur Erweiterung des Frequenzbereichs im Bass liegt darin, in der Box eine passend dimensionierte Öffnung vorzusehen. Sie ist jetzt nicht nur ein abgeschlossener Bereich, dessen Kompression eine Federwirkung auf die Membran ausübt, sondern eine zusätzliche Resonanz. Die Luft in der Box, die weiterhin als kompressibler Raum, der auf einen gegebenen Querschnitt als Feder wirkt und die Masse der Luft (manchmal auch ein passives schwingungsfähiges zusätzliches Teil) in der Öffnung zusammen mit einem Bereich davor und dahinter bildet die Masse eines zusätzlichen harmonischen Oszillators, ein Helmholz-Resonator.

Vereinfacht gesagt soll die Resonanzüberhöhung durch diesen Resonator etwas unter der Grenzfrequenz der geschlossenen Box eine Anhebung verursachen, die den Übertragungsbereich möglichst ohne Überhöhung erweitert.

Unterhalb der Resonanz des Helmholz-Resonators ist die Öffnung aber nur noch eine massengedämpfte Undichtigkeit. Ein akustischer Kurzschluss entsteht, der in der Summe aller Einflüsse die Flankensteilheit von den 12 dB/Oktave der geschlossenen Box auf 24 dB/Oktave erhöht. Eine weitere Erweiterung durch aktive Filter verbietet sich von daher. Da der Lautsprecher darunter keine rückstellende Kraft durch die Federwirkung einer geschlossenen Box erhält, steigt die Auslenkung für sehr tiefe Frequenzen auf die des nicht eingebauten Lautsprechers. Bei Hochleistungsanwendungen ist daher ein elektronischer steiler Hochpass knapp unterhalb der Grenzfrequenz sehr ratsam. Durch die beiden Resonanzen ist auch der Phasenfrequenzgang steiler als bei der geschlossenen Box.

In der Regel lässt sich bei gleicher Grenzfrequenz der Box im optimalen Fall die Größe halbieren. Aus dem Grund wird dieses Prinzip sehr häufig angewendet.

Lange Zeit wurden Bassreflexkonstruktionen durch Versuch und (vor Allem) Irrtum konstruiert und es gab viele Varianten mit übertriebenem resonanten Bass, was für einen Zweifelhaften Ruf des Prinzips führte. Einige Daumenregeln (Anpassung der Öffnung so, dass im Plot der elektrischen Impedanz die beiden sichtbaren Resonanzen die gleiche Höhe haben) brachten etwas mehr Planung.

Der Durchbruch waren die Arbeiten von Thiele und Small. Sie standardisierten die Parameter, mit denen die Eigenschaften der Treiber gemessen wurden und berechneten zum ersten Mal das Verhalten der Bassreflex-Konstruktion. Das Gesamtsystem bildet einen Hochpass vierter Ordnung.

Die ideale Bassreflex-Box kann nur mit einem Treiber mit einer Gesamtgüte Q_{ts} von ca. 0.36 aufgebaut werden. Der Rauminhalt der Box und die Resonanz des Helmholz-Resonators liegen bei bekannter Resonanzfrequenz des Treibers F_s ebenfalls fest.

Die Gleichungen erlauben aber auch für andere Q-Faktoren den jeweils besten Kompromiss zu finden. Geringere Q-Faktoren führen zu einem allmählichen Übergang an der unteren Grenzfrequenz mit einem höher einsetzenden Bassabfall, höhere Q-Faktoren zu einer Resonanzüberhöhung am Übergang, die sich als Welligkeit im weiteren Frequenzgang fortsetzt (Tschebycheff-Filter).

Bei der Frequenz der Helmholzresonanz bewegt sich der Treiber fast gar nicht, die Abstrahlung erfolgt fast ausschließlich durch den Port der Öffnung.

Die gleiche Resonanz lässt sich mit einem kurzen Port und einer kleinen Öffnung oder umgekehrt erzielen. Eine Grenze in der Auswahl ergibt sich dadurch, dass bei kleinen Öffnungen die Schallschnelle in der Öffnung extreme Werte annimmt (man versucht, sie z.B. auf maximal 10% von c zu begrenzen - immer noch ein beachtlicher Wert). Das führt zu nichtlinearem Dämpfungsverhalten, dass bei maximaler Fließgeschwindigkeit proportional zum Quadrat der Geschwindigkeit statt direkt proportional ist. Damit wird die Wellenform verzerrt. Zusätzlich kann es zu hörbarem moduliertem Rauschen durch die entstehenden Wirbel kommen. Gegen beide Effekte arbeitet man mit großen Öffnungen und langen Tunneln sowie durch strömungsgünstige Formgebung (runde Abschlüsse des Tunnels).

8.1.4 Schallführung

Der in der Regel ziemlich bescheidene Wirkungsgrad eines Lautsprechers (Hifi-Boxen teilweise mit weniger als 0.25%!) resultiert zu einem großen Teil aus der schlechten mechanischen Impedanzanpassung zwischen den mechanischen Eigenschaften des Treibers (bewegte Masse, wirksame Fläche) und denen der extrem nachgiebigen und leichten Luft, speziell, wenn sie im Tieftonbereich je nach Position auf einen Raumwinkel bis 4π (voller Raum, freie Aufstellung) ausweicht.

Mit jeder direkt angrenzenden reflektierenden Begrenzung (Boden, Wand, Ecke) halbiert sich dieser Raumwinkel und im Tieftonbereich erhöht sich durch kohärente Überlagerung der Schalldruck jeweils auf das Doppelte, womit auch der Wirkungsgrad verdoppelt wird(zur Erinnerung: 3 dB mehr wäre doppelte Leistung entsprechend der Verteilung auf den halben Raumwinkel, durch die Kohärenz werden aber 6 dB gewonnen, also ist die Leistungsdichte vervierfacht und der Wirkungsgrad verdoppelt). Im Beschallungsbereich erreicht man den gleichen Effekt durch Stacking von mehreren phasensynchron abstrahlenden Subwoofern.

Wenn das Boxenarray kleiner als die Wellenlänge ist, vergrößert sich direkt der Wirkungsgrad, darüber ist die Anhebung stattdessen mit einer zunehmenden Richtwirkung verbunden.

Ein weiterer Weg, die Anpassung zu verbessern ist die Schallführung. Ein Rohr mit einer der wirksamen Fläche des Treibers entsprechenden Querschnittsfläche erzeugt eine viel bessere Ankoppelung, da nur eine Richtung statt eines großen Winkelbereichs versorgt wird. Leider erfolgt an ihrem Ende die gleiche Fehlanpassung, wobei der falsch angepasste Teil der Welle reflektiert wird, mit entsprechenden Rohr-Resonanzen. Mit entsprechender Dämpfung wird das bei der Transmission Line verwendet.

Horn

Man kann die Resonanz aber vermeiden, indem der Übergang zwischen Lautsprecherfläche und freier Luft graduell erfolgt. Dann ist die Reflektion derart verteilt, dass im Idealfall das Integral der Teilreflektionen sich durch verteilte Phasen auslöscht. Diese Konstruktion bezeichnet man als Horn.

Die übliche Theorie der Hörner betrachtet mit eindimensionaler Rechnung die Wirkung eines nach einem vorgegebenen Verlaufs der Querschnittsänderung in Abhängigkeit vom Abstand zum Treiber.

Die eindimensionale Betrachtung ist nur korrekt, wenn die Wand des Horns an allen Stellen senkrecht zur Wellenfront steht. Das ist nur für ein torusförmiges und ein konisches Horn exakt machbar.

Alle anderen Hornfunktionen werden mit mehr oder weniger massiven vereinfachenden Annahmen gerechnet. Da die Voraussetzungen verletzt sind, nimmt der Verlauf der Wellenfront nicht den gedachten Weg und teilt sich in mehrerer Moden auf, so dass eine frequenzabhängige Richtungsverteilung des Schalls resultiert. Man gewinnt aber teilweise extrem an Wirkungsgrad (bis zu 90%) und Schalldruck.

Die extremste Annahme rechnet mit einem ebenen Verlauf der Wellenfront und setzt den Querschnitt einfach an der berechneten Stelle als Ebene ein. Das lässt unter den Tisch fallen, dass die Wellen außen wegen des Horns einen Umweg gehen müssen und daher der Querschnitt zu weit entfernt vom Treiber platziert ist. Relativ gut verträglich ist diese Näherung, wenn ohnehin die Wellenfront durch gleichmäßige Biegung, einfügen von Reflektoren oder ganz simpel Knicke durcheinander kommt. Das passiert, wenn vor allem bei Basshörnern die Konstruktion gefaltet wird, um die Länge handhabbar zu machen.

Eine Vereinfachung, die zumindest die Krümmung der Wellenfront in gewissem Maße berücksichtigt, ist das Kugelwellenhorn. Bei dessen Berechnung nimmt man an, dass die Wellenfront Kugelförmig gekrümmt ist, wobei man die Wellenlänge der Grenzfrequenz als Radius ansetzt. Vorteilhaft ist u.a., dass das realisierte Horn kürzer wird.

Weitgehend ohne Reflektion ist das Horn, wenn die Länge der längsten vorkommenden Wellenlänge entspricht und der Umfang des Hornausgangs ebenfalls. Kürzere Hörner arbeiten mehr und mehr als Transmission Line, mit einer bei ansteigenden Frequenzen einsetzenden Hornwirkung.

Echte Tiefbasshörner sind auch gefaltet extrem groß, unter den berühmten Schmacks-Hörnern in einer Raumecke (wirksame Ausgangsfläche verachtfacht) braucht man ohne Kombination mehrerer Exemplare (deren Ausgangsfläche dann zusammen wirkt) gar nicht anzufangen.

Gerade beim Bassbetrieb unterscheidet man

Frontloaded Horn. Dabei ist das Horn auf der Vorderseite des Lautsprechers angebracht und der gesamte (begrenzte) Übertragungsbereich wird durch das Horn abgestrahlt. Die Rückseite ist in der Regel durch eine relativ kleine Box abgeschlossen.

Backloaded Horn. Die Hornkonstruktion ist auf der Rückseite des Lautsprechers angebracht und meist stark gefaltet, um die Konstruktion möglichst kompakt zu halten. Eine Druckkammer bildet mit dem Horneingang einen akustischen Tiefpass, um die für das gefaltete Horn ungeeigneten Frequenzen fernzuhalten. Im Wirkungsbereich des Horns bewegt sich die Membran nur minimal und die Abstrahlung erfolgt fast ausschließlich durch die Rückseite. Oberhalb der Trennfrequenz strahlt der Lautsprecher (meist Breitbänder) direkt ab. Damit der Frequenzgang halbwegs konsistent ist, muss das Chassis einen relativ schwachen Bass ohne Hornanschluss haben

(also relativ kleines Q_{ts}), weil sonst der Schalldruck unterhalb der Trennfrequenz ansteigt. Allzu gering sollte der Q-Faktor aber auch nicht sein, da seine Realisierung im Allgemeinen X_{max} stark einschränkt und das auch im Horn den erreichbaren Schalldruck im Bass einschränkt. Da die Trennung recht flach ist (6 dB/Oktave), gibt es Überlappungen. Der Schall nach hinten ist in der Polarität gedreht, und er ist verzögert. Das führt leicht zu Auslöschungen im Übergangsbereich, auf jeden Fall aber zu einem nicht allzu glatten Frequenzgang, vor allem bei kurzen Hörnern mit ihren Transmission Line Resonanzen.

Im Mitten- und Hochtonbereich sind die genannten Kompromisse nicht notwendig. Man verwendet weder Faltung noch Backloaded Hörner. Diese Hörner werden im Beschallungsbereich regelmäßig eingesetzt, damit mit einem einzelnen Treiber so viel Ausgangsleistung wie möglich realisiert wird, ohne das Interferenzverhalten mehrerer phasengleicher Lautsprecher (Lobing). Bei kompakten Zweiwege-Beschallungsboxen muss wegen des hohen Wirkungsgrades des Hochtonhorns der Pegel stark abgesenkt werden, was die Gesamtbelastbarkeit anhebt.

Typische Hornverläufe sind

Das Exponentialhorn verändert den Querschnitt exponentiell gegen den Schallweg. In der eindimensionalen Näherung verläuft er als

$$A(x) = A_0 \cdot e^{kx} \tag{8.5}$$

mit

$$k = 4\pi \frac{f_0}{c} = \frac{4\pi}{\lambda_0} \tag{8.6}$$

Der Frequenzgang oberhalb der Grenzfrequenz ist bis zum Einsetzen der Bündelung am Horneingang linear. Ein unendlich langes Horn schneidet darunter vollständig ab.

Das Traktrix-Horn hat als Kontur die Traktrix, die Kurve, die entsteht, wenn man eine reibungsgebremste Masse an einer drehbaren Stangen von einer nicht mit ihrem Ort zusammentreffenden Gerade zieht bzw. drückt.

Das hyperbolische Horn hat eine Hyperbel als Begrenzung. Der Anfang ist weniger geöffnet als beim Exponentialhorn, was den Frequenzgang in der Nähe der Grenzfrequenz anhebt.

Das konische Horn erfüllt den rechten Winkel zwischen Rand und Wellenfront, seine Beschreibung kann mit einer Dimension erfolgen. Es ist die Grundlage der Wave Guides und Constant Directivity Horns.

Wave Guide

Hörner, die keine Modenaufspaltung zeigen, weil sie so weit wie möglich den Hornverlauf senkrecht zur Wellenfront halten, werden als Wave Guide bezeichnet.

Genau genommen müssen sie alle konisch geöffnet sein. Wenn die eingehende Welle so gekrümmt ist, dass die Wellenform in Kugelschalen um den Schnittpunkt voranschreitet, ist die Bedingung exakt erfüllt.

In der Horntheorie sieht man allerdings, dass die Hornfunktion hier erst sehr allmählich und bei gegenüber den klassischen Hornfunktionen extrem hohen Frequenzen relativ zur Horngröße einsetzt. Zusätzlich kommt es am Hornende zu Reflektionen.

Beides kann man optimieren, indem man am Anfang es Horns einen exponentiellen Verlauf wählt, bis die Näherung der ebenen oder Kugelwelle so schlecht wird, dass Moden entstehen. Das erhöht den Wirkungsgrad (bessere Anpassung am Hornanfang). Die Reflektion am Hornende lässt sich durch einen gerundeten Übergang in die Vorderfläche der Box weitgehend unterdrücken. Der verbleibende relativ sanfte Übergang zur vollen Anpassung durch die einsetzende Hornfunktion lässt sich durch (möglichst aktive) Filterung in die Frequenzweiche kompensieren.

Durch den Wave Guide lässt sich der Winkel genau festlegen, in dem alle übertragenen Frequenzen gleichmäßig abgestrahlt werden. Die meisten hochwertigen Beschallungslautsprecher und Studiomonitore arbeiten deswegen mittlerweile mit diesem Konzept.

Ein Einführung in die Auslegung von Waveguides befindet sich auf [4], unter `http://sound.whsites.net/articles/waveguides1.htm`.

8.1.5 Passive Lautsprecher und Weichen

Wenn man (schon aus geometrischen Gründen) den Hörbereich von verschiedenen auf einzelne Teilbereiche optimierten Chassis wiedergeben lassen will, sollte man das Signal in einer Frequenzweiche auf diese passend aufteilen.

Die primitivste Variante trennt für das jeweilige Chassis ungeeignete Bassanteile mit Kondensatoren vor den Mittel- und Hochtönern ab, die sonst schon thermisch über das zulässige Maß hinaus belastet würden. Die Chassis selbst müssen dann die passenden Tiefpässe durch ihre Übertragungskurve liefern.

Besser ist eine echte Aufteilung mit Kondensatoren und Spulen sowie bei Bedarf Anpassung unterschiedlicher Empfindlichkeiten durch Spannungsteiler mit Widerständen.

Man unterscheidet verschiedene Ordnungen.

1. Ordnung verwendet für Hochpass eine Kondensator und für Tiefpass eine Spule. Die Abtrennung geschieht mit 6 dB/Oktave. Die Lautsprecher müssen weit über die Trennfrequenz hinaus möglichst linear arbeiten und die entsprechende Last überstehen.

2. Ordnung verwendet jeweils eine Spule in Reihe und einen Kondensator parallel für einen Tiefpass, für einen Hochpass umgekehrt. Die Abtrennung geschieht mit 12 dB/Oktave. Ab hier kann man zwischen einer graduellen Abtrennung per Bessel-, einer optimal flachen Abtrennung durch Butterworth- oder eine prompte Abtrennung mit Überschwingung im Frequenzgang durch Tschebyscheff-Charakteristik wählen.

Prinzipiell kann man die Ordnung beliebig hoch treiben, mehr als 3. Ordnung ist aber wegen des Aufwands nicht üblich.

Da die typischen Berechnungsgrundlagen der Filter von reellen Widerständen am Ausgang ausgehen, sollten die Chassis eine Parallele Verschaltung haben, die die Impedanz linearisiert. Das kann durch eine Widerstand-Kondensator-Kombination gegen den Impedanzanstieg wegen der Induktivität der Antriebsspule geschehen und durch ein RLC-Netzwerk gegen den Anstieg wegen der Chassis-Resonanz.

Große Induktivitäten mit geringem Wicklungswiderstand sind sehr groß und teuer. Sie sind bei niedrigen Grenzfrequenzen notwendig.

Neben den recht aufwändigen Bauteilen (vor allem Spulen) bei optimaler Dimensionierung leidet dieser Ansatz daran, dass bei hoher Last die Schwingspule sich aufheizt, was viel Parameter durch Anstieg des Gleichstromwiderstandes verändert. Unter anderem

sinkt der Wirkungsgrad, man spricht von Power Compression, die Grenzfrequenz und der Q-Faktor der Weiche ändern sich genau so wie der Q-Faktor des Chassis, der sich erhöht. Gerade hinter einem Hochpass sinkt die Grenzfrequenz und das schon massiv belastetet Chassis bekommt nun einen noch größeren Frequenzbereich mit typischerweise hohen Pegeln dazu. Das kann die Lebensdauer stark begrenzen.

Eine umfassende Erklärung der Funktionsweise mitsamt Betrachtung der Effekte und Kompensation der frequenzabhängigen Impedanzen findet sich wieder bei [4], `http://sound.whsites.net/lr-passive.htm`

8.1.6 Aktive Lautsprecher und Weichen

Aktive Weichen trennen durch analoge Schaltungen vor den verschiedenen Endstufen. Die Weichencharakteristik ist damit stabil gegen Parameteränderungen der Lautsprecher. Es ist vergleichsweise einfach, durch Operationsverstärker und mit Gyratorschaltung nur mit R- und C- Gliedern beliebige Kurvenformen auch für eine eventuelle Frequenzgangkorrektur der Chassis zu realisieren. Der Einfluss von Wicklungswiderständen der Spulen bei passiven Weichen fällt ebenfalls weg, so dass der Q-Faktor der Chassis kaum verändert wird, nur noch durch den Widerstand der Zuleitung von der jeweiligen Endstufe. Die Frequenzweiche kann auch durch einen Limiter an jedem Ausgang Überlastungssituationen weitgehend Unterdrücken. Wenn die Weiche und die Endstufen im Lautsprecher verbaut sind, spricht man von Aktiven Lautsprechern.

8.1.7 DSP-basierte Lautsprecher

Durch den Einsatz eines DSP vor den Endstufen kann man an die Grenzen des Machbaren gehen. Man kann Frequenzweichen mit beliebig steiler Trennung realisieren, Frequenzgangsfehler herausrechnen und die Limitierung nicht einfach an einem Pegel festmachen, sondern an einem Modell der Treiber auch deren mechanische und thermische Situation simulieren und passgenau die Leistungsangabe begrenzen. Wenn die Box und die Treiber das gewünschte Richtverhalten bieten und den notwendigen Pegel ausreichend genau wiedergeben können, kann das Meiste an verbleibenden Ungenauigkeiten weggerechnet werden. Notwendig ist dazu, dass die Exemplarstreuung und Parameteränderungen nicht die Grundlage der Korrektur unterwandern.

8.2 Raum

Außer im Freien hat der jeweilige Raum entscheidenden Einfluss darauf, was man im Ganzen hört.

Kammfiltereffekte können bei ungünstiger Platzierung der Lautsprecher zur vollständigen Auslöschung bestimmter Frequenzen führen. Die Modenstruktur kann den gesamten Frequenzgang im Bass extrem verfälschen. Das Nachklingen von einzelnen Moden und des Nachhalls verlängern die Dauer von Signalanteilen. Flatterechos stören die Wahrnehmung von zeitlichen Strukturen uns sind sehr auffällig.

Das soll alles aber nicht bedeuten, dass das Freie oder ein schalltoter Raum die ideale Abhörlösung wäre.

Zunächst zu den potentiell negativen Auswirkungen.

Die Moden sollten nicht zu wenige und zu stark ausgebildet sein. Sonst sind einige Basstöne zu laut und andere zu leise. Langsam ausklingende Resonanzen von einzelnen

Moden zerstören die zeitliche Struktur von Basspulsen, indem diese verlängert werden. Das ist auch deswegen störend, weil durch die Maskierungseffekte auch Bereiche betroffen sind, die sich in anderen Frequenzbereichen abspielen. Die Dämpfung der Moden kann vor allem durch großvolumige Bassfallen geschehen. Das sind dämpfende poröse Stoffe wie Schaumstoffe, Mineral- Glas- oder sonstige Fasern, die an der Oberfläche abgeschlossen sind, um die Überdämpfung der Höhen und Mitten zu verhindern.

Wenn das nicht praktikabel ist, sollte zumindest mit einem präzise gegensteuernden parametrischen Equalizer den Effekt der auffälligsten Resonanzen gemildert werden. Die ungleichmäßige Verteilung durch die räumliche Struktur von Moden lässt sich dadurch zwar nicht mildern, ein globaler Effekt durch die übermäßige Anregung jedoch durchaus, wie von Toole[31] [32] und auch Nyal [13] gezeigt wurde.

Für eine gleichmäßige Beschallung eines Raumes mit tiefen Frequenzen sollten entweder mindestens drei unabhängig gefilterte Subwoofer eingesetzt werden [6] oder entweder zwei jeweils vorne und hinten mittig oder vier in den Raumecken, wie durch eine Brute-Force Modellrechnung von Welti[33] herausgefunden wurde. Das ursprüngliche Paper mit Präsentation ist leider nicht mehr im Web verfügbar.

Der Nachhall sollte nicht zu lange und nicht zu stark abhängig von der Frequenz sein. Der Klang des Nachhalls sollte bis auf eine gleichmäßige Abnahme bei hohen Frequenzen dem des originalen Signals entsprechen, so dass das Gehör beide leicht zuordnen kann. Die Verwendung relativ dünner Absorber ist nur in den Höhen wirksam und bei übertriebener und schlecht ausgewogener Anwendung wird der gesamte Nachhall extrem dumpf.

Starke frühe Reflektionen sind zu vermeiden, da sie hörbare Auslöschungen im Frequenzgang verursachen. Außer bei Subwoofern sollte daher ein Abstand von mindestens einigen dm zur Rück- und Seitenwand eingehalten werden. Im Studio werden sie Lautsprecher teilweise bündig in die Wand integriert, was die Kammfiltereffekte ausschließt.

Im Zweikanal-Stereobereich sollte der Bereich um die Lautsprecher und die Flächen für die ersten Reflektionen (vor allem die seitlichen in der Praxis) nicht zu stark reflektieren. Der rückwärtige Bereich sollte aber reflektieren, um eine Umhüllung zu erreichen, die aufgenommener Originalhall nur von vorne bringen kann.

Detaillierte Empfehlungen gibt [2].

Bei Surroundwiedergabe ist es sinnvoll, auch im hinteren Bereich die Reflektionen gering zu halten, damit der umhüllende Aspekt der aufgenommenen Atmosphäre und des aufgenommenen Raumklangs nicht zu stark überdeckt werden. Weil aber in der Praxis auch zweikanalige Aufnahmen gehört werden sollen, muss man eine Kompromiss finden.

Detaillierte Empfehlungen gibt es in [3].

Um eine Überdämpfung zu vermeiden, aber stehende Wellen und Flatterechos zu bekämpfen, kann und sollte man auch mit Streuung an Diffusoren arbeiten.

8.3 Kopfhörer

Der Kopfhörer schließt den Einfluss des Raums komplett aus. Bei geschlossenen Bauweisen wird der externe Schall abgehalten, offene sind akustisch transparent - in beide Richtungen.

Zum Beurteilen eines Klangs in lauter Umgebung und zum Vermeiden von ungewollter Schallwiedergabe nach außen bei Overdub-Aufnahmen sollten geschlossene Kopfhörer verwendet werden.

Für Kopfbezogenen Aufnahmen, speziell Kunstkopf-Stereophonie sind Kopfhörer optimal.

Alle anderen Aufnahmen leiden darunter, dass das natürliche Übersprechen zwischen den Ohren fehlt. Das Gehör lokalisiert die Quellen statt im vorderen Winkelbereich mit übertriebener Trennung auf einer Linie zwischen den Ohren. Damit ist ohne massives Training keine Beurteilung der Links-Rechts Anordnung möglich, und auch nach Training nur mit starker Einschränkung. Das Fehlen des körperlichen Empfinden des Bassbereichs erschwert die Beurteilung des Pegels [1] und die Beurteilung des korrekten Basspegels. Beim Studioeinsatz ist der Kopfhörer daher nur als „akustische Lupeßum Heraushören von Details und als Notlösung sinnvoll, dann am Besten mit künstlich nachgeahmten frequenzabhängigem Übersprechen (Cross Feed).

Problematisch ist bei Kopfhörern, dass noch nicht endgültig geklärt ist, auf welchen Frequenzgang er optimal entwickelt werden sollte. Weder die Nachahmung eines Frei- noch eines Hallfelds von 2-Kanal-Stereophonie-Konstellationen wird bevorzugt. Derzeit arbeitet Sean Olive an der entsprechenden Grundlagenforschung. Das Hörbild einer Stereoanordnung in einem optimalen Hörraum scheint ein gutes Ziel zu sein, muss aber noch in seinen Parametern präzisiert werden. [14] [15] [16] [17]

Die Arbeiten von Sean Olive et. al. machen auch deutlich, wie groß in der Praxis der Einfluss der genauen Position auf den Ohren ist. Vor allem wirkt die Position über dem Gehörgang auf die Übertragung der Höhen aus und die Dichtigkeit des Sitzes bei geschlossenen Kopfhörern auf die Basswiedergabe.

[1] Man dreht leicht bis in den gehörschädigenden Pegelbereich auf, das macht das längere Hören mit Kopf- und Ohrhörern gefährlich.

9 Praxis der Aufnahme

9.1 Voraussetzungen

9.1.1 Musik, Musiker, Instrumente, Sprecher

Die Qualität der Aufführung und der Ausführenden, die der verwendeten Instrumente (und ihre Stimmung), die des aufzunehmenden Materials (Text, Komposition, Arrangement) bestimmen in erster Linie das erreichbare Maximum an Qualität des Endergebnisses.

Bei der Aufnahme und später bei der Mischung ist es wichtig, ein dazu passendes Konzept zu erarbeiten, dem man sich bei allen Schritten sinnvoll annähert. Das beginnt mit dem passenden Klang, der mit sehr abhängig von den dafür sinnvollen Mikrofonpositionen und eventuell der sinnvollen Akustik abhängt. Es ist ebenfalls unerlässlich, um gezielt die Balance und die Klangliche Ausgestaltung bei der späteren Mischung zu finden und nicht sinnlos herumzuprobieren. Das gesamte technische Verständnis zeigt den Weg auf, das künstlerische Verständnis ist notwendig, um das Ziel zu kennen.

Beide Welten zu verbinden, ist sehr anspruchsvoll, aber unerlässlich.

9.1.2 Gemeinsam, Nacheinander?

Die Frage stellt sich natürlich nur, wenn mehrere Spuren zu einem Gesamtergebnis verschmolzen werden sollen.

Die beste technisch erzielbare Trennung einzelner Spuren ergibt sich, wenn sie eine nach der Anderen eingespielt werden. Man kann jeweils die Gegebenheiten optimal auf die Bedürfnisse der Spur einrichten. Ebenso kann man die Aufnahme der einzelnen Spur beliebig oft wiederholen.

Man darf nicht übersehen, dass damit die Leistung der Ausführenden auch von der üblichen Vorgehensweise isoliert wird und etwas sehr Technisches erhält, was zu einer Verlagerung hin zu Perfektion und weg von intendierten Aussagen oder Ausdruck führen kann. Ebenso fehlt die spontane Kommunikation von mehreren Akteuren, die aufeinander hören und reagieren. Das wird durch eine Vorausplanung ersetzt, die unter Umständen zu statischen Ergebnissen führt, die im schlimmsten Fall langweilig werden.

Gerade bei großen Ensembles ist es in der Regel nur sinnvoll, dieses als Ganzes in Echtzeit aufzunehmen, durchaus auf beliebig vielen Spuren festgehalten. Das ist bei Musikern, die hauptsächlich Live spielen auch näher an der gewohnten Arbeitsweise.

Man kann beides auch kombinieren, indem man eine Gruppe auf Einmal aufnimmt und später noch Fehler ausmerzt und/oder zusätzliche Spuren darüber setzt (Hintergrundgesang, Streicher,...).

9.1.3 Die Psychologie der Aufnahme

Wie überall, wenn mit lebenden Menschen gearbeitet wird, darf man den Aspekt nicht vergessen. Die psychologische Verfassung hat einen entscheidenden Einfluss auf die Qualität der Leistung.

Die Umgebung während der Aufnahme sollte möglichst angenehm und ohne vermeidbare Ablenkung sein. Häufige Unterbrechung wegen technischer Probleme sind hier Gift.

Man sollte nicht unnötigen Druck aufbauen. Wenn die Belastungsgrenze erreicht ist - psychisch oder durchaus auch körperlich (Stimme, Verkrampfung), ist unbedingt die weitere Aufnahme zu vertagen.

Eine Rückmeldung zu notwendigen Wiederholungen oder Korrekturen darf nie als Abwertung empfunden werden, anderenfalls ist nicht mit besseren nachfolgenden Versuchen zu rechnen.

9.1.4 Perfektion - Genie - „Magie"

Im Studio hat man die Voraussetzungen, an einer Aufnahme so lange zu arbeiten, bis man der Perfektion extrem nahe kommt. Man kann viele Durchgänge der Aufnahmen veranstalten, sich eine optimale Spur durch Zusammenschneiden der jeweils besten Schnipsel bauen, kleine zeitliche Fehler durch Verschiebung korrigiere, sogar die Tonhöhe korrigieren.

Man darf aber zumindest bei Musik eines nicht vergessen: es handelt sich um eine Kunstform und man darf nie den technischen und Präzisionsaspekt der Umsetzung alleine betrachten. Es kommt immer wieder vor, dass durch Überproduktion jede Spur von Spontaneität und Gefühl aus der Aufnahme getilgt wird.

Wenn zwischen dem genialen magischen Moment und der Perfektion zu entscheiden ist, sollte man gut abwägen. Es gibt einige bemerkenswerte Aufnahmen, bei denen ein Fehler z.B. in einem improvisierten Solo belassen wurde, weil es die interessanteste oder global beste Variante war, oder aus einem Fehler wurde eine gute Idee geboren.

Das ist aber kein Plädoyer, Schrott auf der Aufnahme zu belassen.

9.1.5 Live - Studio

Bei Liveaufnahmen ist man einmal wegen der Echtzeitbedingung sehr eingeschränkt, denn es gibt pro Event genau einen Versuch für alles. Zusätzlich ist die Akustische Gegebenheit sowie der Wunsch nach optimaler Präsentation eine manchmal starke Einschränkung.

Die vorhanden Akustik muss gemeistert werden, die „Beiträge" des Publikums dürfen nur in passendem Maß im Endergebnis auftauchen, eine Beschallung (wenn vorhanden) erzeugt zusätzliche Störsignale. Man kann oft wegen Fremdschalls nicht die eigentlich wünschenswerten Mikrofonpositionen wählen und ist auf extrem nahe Positionierung festgelegt. Die Mikrofonauswahl kann eingeschränkt sein (Gesangsmikrofone, Dynamische Mikrofone wegen Wetterbeständigkeit oder mechanischer Robustheit).

Das Studio hingegen ist so konzipiert, dass man Störungen ausschließt und alle technischen Voraussetzungen für eine optimale Aufnahme hat. Die Akustik ist besser kontrolliert. Manchmal ist sie zu trocken, um Musiker wie gewohnt zusammen spielen zu lassen, sie hören wegen des geringeren Raumanteils die entfernteren Kollegen nur schlecht. In extremen Fälle kann man ein gemischtes Signal mit künstlichem Hall auf Kopfhörer geben oder durch Monitorlautsprecher den Aufnahmeraum künstlich kontrolliert halliger

gestalten. Damit tauscht man die technisch optimale Akustik gegen die bessere Arbeitsumgebung für die Künstler ein. Es kann sich lohnen (s.o.).

Mehrspur-Aufnahmen von Liveaufführungen werden teilweise im Studio mit Nachbesserungen versehen.

9.2 Die Mikrofonierung

9.2.1 Close Miking

In der klassischen Musik wird in Übereinstimmung mit der Hörererwartung und Erfahrung mit üblicher Aufführungspraxis in der Regel der Raum zu einem wesentlichen Teil mit aufgenommen. Das verleiht dem Klang Tiefe, zeitlichen und räumlichen Zusammenhang und die Empfindung von Größe.

Für alle anderen Stilrichtungen wird fast ausnahmslos mit Nahmikrofonierung gearbeitet. Wenn der Raum mit aufgenommen werden soll, so geschieht es in zusätzlichen Kanälen, so dass der Anteil bei der Mischung beliebig dosiert und bearbeitet werden kann.

Nur mit der Nahmikrofonierung erreicht man die volle mögliche Klarheit, da man eine hohe Zeitauflösung und unverminderte Höhen auf der Spur hat. Wenn mehrere Spuren gleichzeitig aufgenommen werden, ergibt sich mit der Methode die beste mögliche Kanaltrennung. Teilweise trennt man die Quellen auch akustisch weiter voneinander ab, durch passende Platzierung (Abstand) und die Verwendung von akustischen Trennkörpern, absorbierend oder transparent.

Man kann mit Richtmikrofonen arbeiten, um vor allem gezielt andere Quellen auszublenden. Ein Beispiel wäre ein singender E-Gitarrist, der gewohnt ist, beim Spielen zu singen. Dessen Verstärker kann dann im Auslöschungswinkel eines entsprechenden Richtmikrofons aufgestellt werden und er hört sich trotzdem wie gewohnt. Auch ein Raumeinfluss wird gemindert.

Unbedingt zu beachten ist dabei, dass alle Richtmikrofone den Nahbesprechungseffekt haben und der Bass nicht von Vorneherein so abgebildet wird, wie er akustisch vorliegt. Je nach Schallquelle kann es sich daher lohnen, mit einem Kugel-Mikrofon zu arbeiten, das man entsprechend näher positioniert.

Man muss die Abstrahlcharakteristik der Quelle berücksichtigen, damit man nicht eine Position verwendet, in der charakteristische Frequenzbereiche fehlen, oder bei der bestimmte Teilaspekte des Klanges fehlen oder zu stark betont werden. Das ist zum Beispiel bei allen Saiteninstrumenten von Bedeutung. Der Höhenanteil und kommt vor allem von den Saiten, der Resonanzkörper strahlt so gut wie alles Weitere ab - und das ist ein sehr wesentlicher Teil. Ganz wichtig ist auch, die typischen Anschlag- Anblas- und sonstigen Geräusche passend mit aufzunehmen. Sie dürfen nicht überbetont sein und ein Spieler wird sie im Regelfall minimieren. Andererseits sind sie wichtig, um das Instrument zu erkennen und tragen oft entscheidend dazu bei, rhythmische Details deutlich zu machen.

Entweder man findet eine Position, an der die gewünschte Klangliche Mischung gegeben ist, oder man nimmt die Teilaspekte an verschiedenen Positionen getrennt auf und vereinigt sie bei der Mischung, u.U. auch an verschiedenen Positionen in der Mischung. Dabei ist unbedingt auf Phasenbeziehungen durch Laufzeiten zu achten, sonst löschen sich Frequenzbereiche bei manchen Mischungsverhältnissen aus - spätestens bei monophoner Wiedergabe.

9.2.2 Multi-Mikrofonierung

Wenn mehrere Quellen gleichzeitig aufgenommen werden, der Raum mit erfasst werden soll, oder eine ausgedehnte Quelle im Stereobild ausgebreitet werden soll, wird mit mehreren Mikrofonen zeitsynchron aufgenommen. Bei digitaler Aufnahme ist dabei unbedingt erforderlich, dass alle A/D-Wandler synchron laufen, da sonst die Phasenverhältnisse auf den Spuren inkonsistent werden. Bei professionellen Wandlern kann der Takt extern synchronisiert werden, ansonsten ist ein Wandler mit ausreichend vielen Eingängen unvermeidlich.

Bei Einzelquellen, die im Stereobild verteilt abgebildet werden sollen, verwendet man eine der Stereo-Kombinationen von Mikrofonen. Entweder wird die endgültige Verteilung bei der Aufnahme durch die Positionierung festgelegt (groß AB, klein AB, ORTF, EBS,...), oder man arbeitet mit koinzidenten Anordnungen (XY, MS). Dann kann man z.B. ein volles Stereoabbild mit zwei Spuren erzeugen, die bei der Mischung unabhängig voneinander im Panorama verteilt werden, so dass Mittenposition und Breite veränderlich sind. Bei allen mit Laufzeiten arbeitenden Methoden kommt es bei Verändern des Panoramas zur Summierung in einem Kanal und zu Kammfiltereffekten.

Bei guter (und zum Stück passender) Akustik kann es sich lohnen, mit entfernt von den Quellen aufgestellten Raummikrofonen - vorteilhaft als groß AB - den Raumklang mit aufzunehmen. Allerdings ist die in ihm vorhandene Mischung der Quellen nachträglich nicht veränderbar.

Wenn man durch Multi-Mikrofonierung die maximaler Flexibilität in der Mischung erreichen will (wenig Übersprechen), ist es eigentlich konsequent, den passenden Raumhall künstlich zu generieren.

9.2.3 Einige konkrete Schallquellen

Im Folgenden kommen Betrachtungen zur Aufnahme für einige wichtige Quellen mit Beispielkonfigurationen. Diese sind nicht als allein selig machende Anleitung zu verstehen, sondern als Anregungen und Startpunkte für die eigene Suche nach der besten geeigneten Methode. Immerhin spielt die Umgebung auch eine große Rolle.

Stimme Die Stimme hat insgesamt die größte Bedeutung aller denkbaren Schallquellen. Unser Gehör ist evolutionär und durch tägliches Training darauf ausgerichtet, möglichst umfassende sachliche und emotionale Information aus ihrem Schall zu gewinnen. Sobald eine Stimme (oder gar mehrere) mit im Spiel ist, ist sie so gut wie immer die wichtigste Komponente. Entsprechend sorgsam muss mit ihr bei Aufnahme und Mischung umgegangen werden. Folgende Mikrofonpositionen bieten sich an:

Unmittelbar vor dem Mund . Da in dem Bereich die volle Wucht des Atems auftritt, ist unbedingt mit einem Poppschutz zu arbeiten. Das trifft vor allem bei richtenden Kapseln zu. Dies ist die beste Position bei einer Live-Wiedergabe und lauten Umgebungen. Die Verwendung dafür optimierter Mikrofone (meist als Gesangsmikrofon bezeichnet) ist sinnvoll. Anderenfalls muss ein ausreichend dicker Poppschutz verwendet werden, da keiner integriert ist. Bei Kapseln mit Richtcharakteristik ist es sinnvoll, solche mit relativ hoher unterer Grenzfrequenz einzusetzen, da sie durch den extremen Nahbesprechungseffekt ohnehin erweitert wird. Außer bei Kugelcharakteristik ist aber immer damit zu rechnen,

dass der Bassbereich in einem Equalizer weit heruntergedreht wird. Gegen verbleibende Popp-Effekte und Handhabungs- und Erschütterungsgeräusche ist ein Hochpassfilter, mindestens mit 12 dB/Oktave sehr sinnvoll.

Wichtig ist, dass Mund und Nase abgebildet werden (ohne Nase klingt es nasal). Bei seitlicher Besprechung fällt zwar der Nahbesprechungseffekt aus (oder ist je nach Winkel zumindest schwächer), das ist aber sehr variabel, wenn der Winkel wechselt (Mikrofon ist in der Hand des ausführenden).

Live birgt die Verwendung in der Hand auch massiv erhöhte Rückkoppelungsgefahr, da schnell Monitor- und sonstige Boxen in den Bereich großer Empfindlichkeit oder gar in die Nähe geraten können.

Ein geschickter Sänger vergrößert bei extrem lauten Stellen bewusst den Abstand. Das verändert immer auch den Klang, der bei richtenden Kapseln dann weniger Bass abbildet.

Ein Stativ hält das Mikrofon (solange es nicht bewegt wird) in einer konsistenten Lage relativ zur Bühne, ein Kopf- oder Nackenbügel relativ zum Kopf. Das garantiert eine konsistenten Klang, der Künstler kann aber nicht durch Positionsänderung z.B. Mitteilungen von der Aufnahme oder Wiedergabe ausschließen.

Neben dem Mundwinkel ist das Mikrofon aus dem unmittelbaren Bereich des Atems heraus. Wenn man dann noch eine Kugelcharakteristik einsetzt, ruhig mit Durchmesser im einstelligen mm-Bereich hat man an einem Nackenbügel ein recht gut einsetzbares Signal ohne Nahbesprechungseffekt, selbst für Live-Anwendungen.

Am Kragen (Lavaliermikrofon) hat man keine Beeinträchtigung durch Atemgeräusche, außerdem ist das Mikrofon schnell angebracht und recht unauffällig. Der Pegel ist allerdings recht klein, so dass bei Live-Anwendung die Rückkoppelungsgefahr stark ansteigt. Dazu kommt ein extrem verfärbtes Klangbild. Die Höhen fehlen stark, da sie in eine hauptsächlich andere Richtung bevorzugt abgestrahlt werden und da sie das Kinn noch zusätzlich abschattet. Der Brustkorb mit seinen Resonanzen hebt den Bereich um 600-700 Hz massiv an, was durch einen Kanal eines parametrischen Equalizers oder den Einsatz eines entsprechend vorentzerrten Mikrofons unbedingt ausgeglichen werden muss. Ansonsten ergibt sich ein dröhnender Klang, der nicht nur unangenehm ist, sondern wegen der Verdeckung höherer Frequenzen auch schlecht verständlich ist. Bei Verstärkung und Wiedergabe wird auch exzessiv Leistung in dem Bereich verlangt, die weit über das hinausgeht, was für die Wiedergabe eines guten Klangs notwendig ist.

Am Scheitel ist der Klang weitgehend dem entsprechend, was man nach vorne in einiger Entfernung hört. Er ist dadurch weitgehend unverändert einsetzbar. Bei Liveaufführungen von Theater- oder Musicalwerken kann man ein kleines Mikrofon unter Umständen unauffällig in die Frisur integrieren.

In einigem Abstand vor dem Mund klingt Sprache und Gesang so, wie wir des erwarten und alltäglich gewöhnt sind. Bei einem Abstand größer als 50 cm sollte immer ein Richtmikrofon eingesetzt werden, um eine Trennung der Umgebung zu erreichen. Kleinere Abstände erfordern zumindest bei Richtmikrofonen den Einsatz von Poppschutzfiltern im Schaumstoff-(besser Schaumnetz-)Technik

oder im Studio in Form von stoffbespannten Rahmen. Diese Rahmen sollten mindestens 10 cm von der Mikrofonkaspel entfernt sein, damit restliche Verwirbelungen durch den Atem und niederfrequente Druckstöße durch die Interaktion mit Luftstößen abklingen und nicht extrem durch den Nahbesprechungseffekt verstärkt werden. Der Stoffrahmen sollte nicht so ausgerichtet sein, dass die Kapsel sich in seiner Normalenrichtung befindet, d.h. sie sollte schräg gerichtet sein. Das verhindert die Teilreflektion der Reflektion der Kapsel zurück auf diese, da sonst ein vermeidbarer (wenn auch schwacher) Kammfiltereffekt den Klang verfälscht. Bei einem geringen Abstand von ca. 20 cm zwischen Mund und Kapsel kann man im Studio sehr gut mit einer Kugelcharakteristik arbeiten und alle Probleme der Richtmikrofone vermeiden. Zusätzlich sollte man nach Möglichkeit vermeiden, das Mikrofon im Bereich zu positionieren, in den ausgeatmet wird. Besser ist es, etwas tiefer oder höher zu gehen, wobei die Ausrichtung natürlich zum Mund hin erfolgen muss.

Im klassischen Bereich, vor allem in Hallen, kommt der typische große Hallradius entgegen, so dass man mit größeren Abständen als im Rock- und Popbereich arbeiten kann, was man auch sollte. Bei Liveaufführungen kann das Mikrofon dann auch etwas tiefer angeordnet werden und vor allem beim ohnehin auch in dem Fall ratsamen Einsatz von Kleinmembranmikrofonen relativ unaufdringlich wirken.

Kontaktmikrofon am Sprecherpult oder Tisch. Im Gegensatz zu einem Mikropon, das durch ein Stativ in einigem Abstand zur Oberfläche auf einem Tisch oder an einem Sprecherpult befestigt ist, treten bei einem Kontaktmikrofon keine Kammfiltereffekte durch die Reflektion auf der Fläche auf, in die es integriert ist. Die Anordnung wird u.A. bei Videokonferenzen gerne eingesetzt.

Problematisch ist allerdings, dass die Position noch besser geeignet ist, jedes Rascheln mit einem Konzept oder Handhabungsgeräusche von Kaffeetassen und Ähnlichem zu übertragen. Noch katastrophaler ist es, wenn jemand z.B. Akten auf das Mikrofon ablegt ohne es zu bemerken. Das verbessert den Klang der Stimme nicht wirklich und wird gerne mit einem technischen Ausfall der Verbindung verwechselt.

Stark bündelnde Mikrofone an der Decke können die Nachteile im praktischen Einsatz von Grenzflächenmikrofonen vermeiden. Der hohe Abstand wird durch die starke Richtwirkung (vor Allem Superniere) gemildert. Wenn die Neigung so gewählt wird, dass die Deckenreflektion (am Besten ohnehin durch passende akustische Gestaltung gemildert) im Auslöschungswinkel erfolgt, ist keine breitbandige Beeinflussung des Frequenzgangs zu befürchten. Was bleibt, ist der Kammfiltereffekt durch die Reflektion an der Tischplatte. Diese hat einen durch den Umweg etwas verminderten Pegel, so dass immerhin eine vollständige Auslöschung ausbleibt. Zusätzlich ist wegen der Richtwirkung der Sprache nicht der volle Frequenzbereich in vollem Pegel in ihr enthalten.

Halb-Superniere als Grenzflächenmikrofon am Boden. Die Position am Boden verhindert den Einfluss von Reflektionen, die von dort kommen. Durch die starke Richtwirkung und Ausrichtung auf die Quelle wird der Effekt der Pegelabnahme durch zunehmende Entfernung über einen weiten Bereich dadurch kompensiert, dass die Quelle mehr und mehr in den Bereich der höheren Emp-

findlichkeit durch die Richtwirkung kommt. Diese Anordnung ist für Aufnahmen von Theater sehr nützlich.[36]

Mikrofonarrays in eindimensionaler Ausführung bilden in einer Dimension einen üblich breiten Winkelbereich ab, während senkrecht dazu ein sehr schmaler Bereich erfasst wird. Das blendet sonstigen Schall sehr effektiv aus.

Bei starker vertikaler Bündelung wird ein horizontaler Streifen z.B. vor einem Rednerpult erfasst. Der Redner kann sich seitlich sehr weit bewegen, ohne aus dem Aufnahmebereich zu fallen.

Bei einem Konferenztisch wird stattdessen horizontal gebündelt. Der Nebenmann ist ausgeblendet, der Sprecher kann aber sitzen oder stehen, er ist immer im Aufnahmebereich.

Flügel, Klavier gehören zu den wenigen Instrumenten, bei denen wegen der Abmessungen und bauartbedingten Verteilung der Tonerzeugung eine stereophone Aufnahme und Wiedergabe des Instruments selbst sinnvoll sein kann (nicht etwa muss). Deswegen kommen hier die üblichen Mikrofonanordungen für stereophone Aufnahmen in Frage, außer Groß-AB, für das das Instrument dann doch zu schmal ist.

Den vollen Frequenzumfang kann man ausschließlich mit Kugelcharakteristik einfangen.

Bei Koinzidenztechnik (MS mit Kugel-Mitte, im Ensemble eventuell XY, da der tiefe Bass unter Umständen anderen Instrumenten überlassen bleiben soll) lässt sich die Breite und Position der stereophonen Abbildung nachträglich ändern. Das ist wichtig, wenn das Instrument nicht solo aufgenommen wird.

Alle Techniken mit Laufzeitanteil erfordern, die Positionierung und Ausrichtung so zu wählen, dass die Stereoabbildung bei der Aufnahme für die Endabmischung stimmig ist, da eine Veränderung des Sterebildes zwei ähnliche Signale mit verschiedenen Laufzeiten auf einen Kanal mischt, mit den entsprechenden Kammfiltereffekten.

Der Klangcharakter variiert extrem mit dem Ort der Mikrofone, da die verschiedenen Anteile des Gesamtklangs deutlich unterschiedlich gewichtet werden.

Einen sehr vollen Klang, der vor allem für begleitende Aufgaben im Hintergrund tragfähig ist, erhält man durch Klein-AB am vom Spieler abgewandten Ende. Hier fällt der Geräuschanteil durch die Mechanik und die Hämmer fast ganz weg, die Saiten und der Resonanzboden werden aber sehr wuchtig aufgenommen. Der Klang ist sehr indirekt und in der Form eigentlich nur für passende klassische Werke geeignet.

Abbildung 9.1: Mikrofonierung eines Flügels: Endposition

Für einen direkteren Klang kann man mit Klein-AB in der Krümmung an der Seite arbeiten. Hier sind alle Komponenten (Saiten, Resonanzboden und Mechanik/Hämmer) in der Aufnahme enthalten. Damit ist die rhythmische Komponente besser abgebildet. Für ein Solo-Piano vor Allem im klassischen Bereich kann das ein guter Ausgangspunkt für die Suche nach der optimalen Position sein.

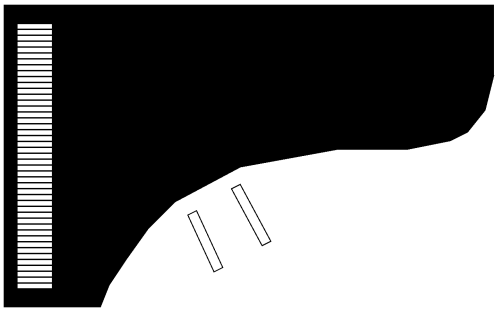


Abbildung 9.2: Mikrofonierung eines Flügels: Seitenposition

Bei sehr rhythmischer Musik, vor allem im Rock- Jazz- oder Popbereich betont man gerne die Geräuschkomponenten von Mechanik und Hämmern, da sie den Rhythmus des Anschlags deutlich machen und durch den hellen Anteil der frisch angeschlagenen Saiten und Hervorhebung der kurzen Saiten der oberen Töne einen auch in komplexen Mischungen sehr durchsetzungsfähigen Klang ergeben. Üblich sind Klein-AB über den Hämmern oder MS/XY-Techniken.

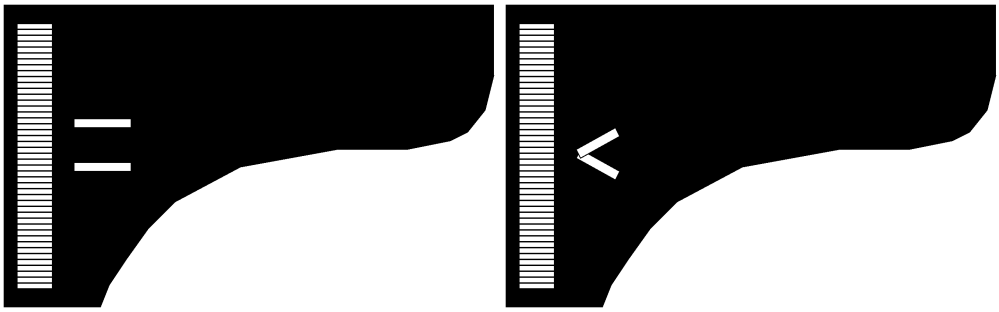


Abbildung 9.3: Mikrofonierung eines Flügels: Bei den Hämmern, AB und XY-Technik

Bei Live-Einsetzen sind die dazu notwendigen Abstände aber oft zu hoch, um Fremdschall gut genug auszublenden. Dann kann man auf mehrere Mikrofone in unmittelbarer Saitennähe ausweichen. Im Extremfall (z.B. Live-Rockmusik) sollte man realistischerweise spezielle Tonabnehmer oder gleich elektronische Stage-Pianos einsetzen. Hier wird bei der Mischung oft extrem in den Klang eingegriffen, indem Mitten und Höhe angehoben werden.

Blechbläser und Saxophone haben im Bereich der Mitten und Höhen oft eine ausgeprägte Richtwirkung. Wenn der gesamte Frequenzgang erfasst werden soll, muss das Mikrofon in der Hauptabstrahlungsrichtung stehen, bei Live-Einsätzen oft in kompakter Ausführung per Halter direkt an der Öffnung befestigt.

Hörner sind ein Spezialfall. Ihre Öffnung wird traditionell von den Hörern weg gerichtet, so dass sie ganz anders als z.B. Trompeten klingen. Hinter den Instrumenten

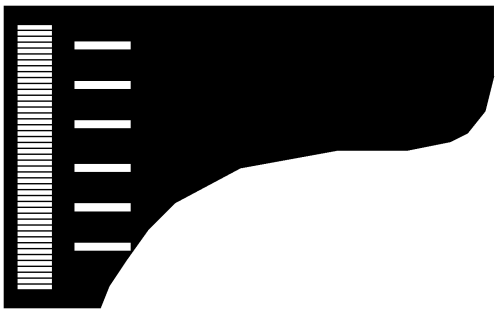


Abbildung 9.4: Mikrofonierung eines Flügels: Bei den Hämmern, Mikrofonarray

sollte aber unbedingt eine reflektierende Wand sein, so dass insbesondere das Anblasgeräusch hörbar verzögert und indirekt mit aufgenommen wird.

Typische Gesangsmikrofone für Nahbesprechung können hier neben Kondensatormikrofonen auch zu guten Ergebnissen führen. Die akustischen Gegebenheiten und Anforderungen ähnelnd denen bei Nahbesprechung mit Sprache.

Sonstige Holzbläser sollten nach vorne oder leicht nach oben aufgenommen werden, da sich dort die beste ausgewogene Mischung des eigentlichen Tons und der Nebengeräusche ergibt. Die Nebengeräusche (Anblasgeräusch, evtl. Klappen) sind zu minimieren. Fehlen sie aber ganz, ist die Charakteristik des Instruments aber oft nicht mehr vorhanden.

Akustische Gitarre. Es ist notwendig, die korrekte Balance zwischen Anschlagsgeräusch, Saiten- und Korpusklang und Griffgeräuschen zu finden. Sie hängt unter Anderem sehr stark von der Spielweise und dem Stil ab. In der Nähe des Schalllochs ist der Bass durch die Helmholzresonanz überbetont, daher sollte man nicht in seine Nähe ein Mikrofon positionieren. Monophon sollte ein Mikrofon in einem gewissen Mindestabstand etwa vor der Mitte der volle Saitenlänge passen. Man kann aber auch versuchen, das Instrument stereophon abzubilden, aber nicht über die volle Basisbreite, denn das entspricht nicht dem realen Eindruck des Instruments.

Ein gutes Instrument, von einem fähigen Musiker gespielt, hat einen sehr ausgewogenen Klang, so dass man unbedingt möglichst verfärbungsarme Mikrofone einsetzen sollte. Entweder arbeitet man mit Kleinmembran-Kondensatormikrofonen oder mit dynamische Mikrofonen, die den typischen Mitten- und Höhenanstieg im Frequenzgang kompensiert haben - dauerhaft (Beyerdynamic M201) oder schaltbar (Sennheiser MD441, Shure SM7B).

Eingebaute Piezo-Tonabnehmer haben Live durchaus Vorteile, sind aber nicht in der Lage, einen für hochwertige Aufnahmen notwendigen ausgewogenen Klang zu liefern. EQ-Nachbearbeitung ist in der Regel notwendig.

E-Gitarre Der klassische Verstärker für E-Gitarren ist unter Anderem ein inhärenter Bestandteil des Instruments, da ein großer Teil des endgültigen Klangs in ihm geformt wird. Dazu tragen bei:

- der Vor- und Endverstärker mit ihren nichtlinear bis in die vollständige Sättigung gefahrenen typischerweise Röhrenstufen mit Ausgangsübertrager

- die meist einfache 3-Kanal Klangregelung, die mit klassischerweise mit einer einfachen Poti/Widerstands/Kondensatorschaltung nur eine Anhebung von Bass und Höhen erlaubt [1]
- ein Hochpass in der Eingangsstufe, der die Grundschwingungen massiv dämpft
- die Lautsprecherbox, die bewusst ohne Hochtöner die schärfsten Anteile des verzerrten Klangs unterdrückt, jedoch die Mitten meist anhebt, vor allem bei Ansteuerung durch die Ausgangsimpedanz einer Röhrenendstufe vor allem in Übersteuerung, bei der die Gegenkopplung keine Impedanzminderung mehr bewirkt.

Solange die Sättigung des Ausgangsübertragers und des Lautsprechers keine wesentliche Rolle spielt, kann man mittlerweile meist vor der letzten Stufe die Lautstärke vermindern, ohne die Sättigung zu verlassen (Master Volume).

Die Lautstärke in unmittelbarer Nähe des Lautsprechers ist ziemlich hoch. Da keine Höhen mitspielen, kann man ohne Einschränkung auch mit dynamischen Mikrofonen arbeiten. Die Position des Mikrofons vor dem Lautsprecher bei Nahabnahme ist extrem kritisch für den Klangeindruck. In der Mitte direkt vor dem Ansatzpunkt der Schwingspule werden die meisten hohen Mitten aufgenommen. Wegen einer für die in dem Zusammenhang meist verwendeten Chassis typischen Nachgiebigkeit der Membran nehmen diese Anteile nach außen immer mehr ab. Oft kommen mehrere Mikrofone zum Einsatz, zumindest, wenn ein Raumanteil getrennt mit aufgenommen werden soll.

Mehr und mehr kommen Emulationen von gesamten Verstärker- und Boxenkombinationen auf den Markt, die meist auch die gängigsten Effektpedale mit umfassen. Damit wird die Wiedergabe von der Klangformung getrennt. Vor allem ist das Ergebnis einer Aufnahme nicht mehr von der exakten Position eines Mikrofons abhängig.

Wenn man bezüglich des Klangs nicht ganz sicher ist, die optimale Einstellung oder Kombination von Komponenten gefunden ist, kann man parallel auf einer Spur mit einer zwingend aktiven und hochohmigen DI-Box das unverstärkte Signal aufnehmen. Das kann man dann später nach Gutdünken beliebigen anderen Verstärkern und oder Einstellungen zuspielen, bis der Klang überzeugt (Re-Amping). Das Signal braucht entgegen anderslautenden Überzeugungen nicht künstlich hochohmig zu sein wie das einer passiven Gitarre.

E-Bass Auch beim E-Bass kann die Verstärker-Boxenkombination klangformend sein. Bei der Mikrofonierung ist auf die notwendig tiefe untere Grenzfrequenz zu achten, das Instrument reicht typischerweise bis 40 Hz herab. Um die unteren Frequenzen im Bedarfsfall zur Verfügung zu haben, sollte hierbei immer mit einer DI-Box das ursprüngliche Signal mit aufgenommen werden, um zugemischt zu werden. Re-Amping ist ebenfalls möglich.

Elektronische Keyboards werden meist über DI-Boxen direkt aufgenommen. Bei einigen ist aber der Verstärker und die Box mit klangbestimmend.

Vor allem E-Pianos werden oft über Kofferverstärker für Gitarren wiedergegeben. Dann trifft alles zu E-Gitarren gesagte entsprechend.

[1] Siehe [4], Artikel über Equalizer, Abschnitt 8: Guitar Amp Tone Stacks

Vor allem elektromechanische Orgeln und ihre Emulationen verwenden zum Teil rotierende Lautsprecher als mechanische Effektgeräte zur Klangformung, sieh Rotary-Effekt[2]. In dem Fall müssen geeignete Mikrofone für die Aufnahme der Rotoren (oft getrennt nach Bass und Höhen) eingesetzt werden. Im Bass ist auf ausreichend tiefe Grenzfrequenz zu achten, das Instrument reicht bis ca 30 Hz. Die Hochtonwiedergabe ist auf ca.$\tilde{6}$ KHz begrenzt. Die Aufnahme kann nah oder fern erfolgen, bei naher Aufnahme wird durch die Abstandsänderung eine zusätzliche Lautstärkemodulation aufgeprägt. Bei einem mittleren Abstand und dahinter befindlicher Wand wird der Chorus-Effekt bei langsamem Betrieb verstärkt, da der Dopplereffekt des Echos das gegenteilige Vorzeichen hat. Man kann die Rotation durch stereophone Aufnahme betonen.

9.2.4 Der große geschlossene Klangkörper - Orchester, Chor, Orgel

Bei großen geschlossenen Klangkörpern wird mit den weiter oben beschriebenen Mikrofonanordnungen [3]zunächst der Gesamtklang mit Raumeinfluss und der Verteilung der Einzelstimmen aufgenommen.

Orchester

Speziell bei Orchestern erweitert man dieses durch Stützmikrofone, die einzelne Solisten und Instrumentengruppen (diese dann aus so viel Entfernung, dass sie zu einer Sektion verschmelzen) getrennt aufnehmen.

Man kann mit dem Stützmikrofonen die Lautstärke von Teilen anheben, die sich nicht deutlich genug wahrnehmen lassen, zusätzlich gewinnen sie durch die damit verbundene Pegelstereophonie an Lokalisationsschärfe und sie klingen direkter (weniger Raumanteil) als der Gesamtklang. Das wird noch unterstrichen, wenn die Stützmikrofone wir in der Analogtechnik üblich nicht verzögert werden, um die Laufzeit der bis zu den Hauptmikrofonen anzupassen.

Chor

Ein Chor sollte aus großer Höhe aufgenommen werden, damit die hinteren Reihen nicht zu weit entfernt und noch dazu durch die Sänger der vorderen Reihen im Höhenbereich abgeschattet werden. Bei homophonen Sätzen bietet sich an, die Stimmen hintereinander zu positionieren, so dass der gesamte Klang verschmilzt. Bei polyphonen Sätzen ist eine Aufteilung der Stimmen auf der Stereobasis von Vorteil, da sie die Unterscheidung und Deutlichkeit der Stimmführung erleichtert.

Orgel

Eine (Pfeifen-)Orgel ist unter Einbeziehung des Raums am Besten mit Groß-AB Technik aufzunehmen. Es geht bei der Stereoabbildung nicht darum, die einzelnen Register lokalisieren zu können. Die Orgelbauer versuchen sogar, durch abwechselnde Anordnung der tiefen und großen Pfeifen auf beiden Seiten die Symmetrie des Klangbildes zu erreichen.

[2]sie Kapitel 7.7.6, Seite 102

[3]Pegel- (Kapitel 5.2.2 Seite 67), Zeitdifferenz- (Kapitel 5.2.3, Seite 72) und Kombinationsstereophonie (Kapitel5.2.4, Seite 73)

Eine unscharfe Stereoabbildung, die den Raum und das Instrument vor allem verteilt und groß (gerne verteilt) erscheinen lassen, passt am Besten zum Charakter des Instruments. Beim Raumeindruck ist es gut, die Tiefenstaffelung von (wenn vorhanden) Rückpositiv - Hauptwerk - Echowerk einzufangen.

9.2.5 Das Schlagzeug

Auch beim Schlagzeug, sofern es im Wesentlichen natürlich klingen soll, verwendet man eine Kombination von Haupt- und Stützmikrofonen. Die Hauptmikrofone sind über dem Kopf des Musikers angebracht. Sie nehmen nahezu das Klangbild auf, das er wahrnimmt. Bei AB-Mikrofonie ist zu beachten, dass die Entfernung zur Snare Drum bei beiden Mikrofonen gleich sein sollte, weil sonst bei Mono-Wiedergabe der Frequenzgang von ihr stark eingeschränkt ist, und mit der ist immer zu rechnen.

Dieser Klang sollte schon alles Wesentliche enthalten, bis auf die Bass Drum, vor allem bei XY-Mikrofonie (weil man z.B. das Schlagzeug nicht über den gesamten Stereobereich verbreitern will). Entscheidend ist der Frequenzgang, der auch die Becken natürlich und bis in die höchsten Frequenzen übertragen muss. Wenn alle Instrumente außer den Becken gestützt werden, darf der Bass abgesenkt sein.

Wichtig: bei niedrigen Decken müssen diese entweder stark gedämpft sein, oder es ist mit gerichteten Mikrofonen zu arbeiten, deren Auslöschung die Deckenreflektion bekämpft.

Alternativ kann man zumindest die Höhen in der Reflektion auch schon durch dünne Absorber entfernen und die Mikrofone unmittelbar darunter positionieren, so dass die nicht absorbierten Frequenzen keine merkliche Phasenverschiebung erleiden.

Die Stützmikrofone sind in Reihenfolge abnehmender Wichtigkeit:

Bass Drum(s). Der Frequenzbereich liegt bei der Grundwelle meist zwischen 50 und 60 Hz. Der Schalldruck in der Nähe ist extrem. Entweder nimmt man extrem pegelfeste Kugelmikrofone oder Nierencharakteristik mit Nahbesprechungs-Bassanhebung. Trotzdem ist auf eine ausreichend niedrige Grenzfrequenz zu achten. Das Mikrofon kann sich hinter dem Fell befinden, das dem Schlagfell gegenüberliegt, oder bei geöffnetem Fell in der Trommel selbst, um das Schlaggeräusch wegen der rhythmischen Betonung mit aufzunehmen.

Snare. Das Mikrofon sollte gerichtet arbeiten und vom Rand auf die Mitte zeigen. Wenn man die Schnarrsaiten betonen will, kann ein zusätzliches Mikrofon die Unterseite mit aufnehmen. Um keine Auslöschung zu bekommen, muss es umgepolt werden.

Hi-Hat. Bei manchen Stilen ist ihr Rhythmus entscheidend (Swing), ansonsten markiert das Instrument den Grundrhythmus und neben den Becken wichtige Betonungen. Man sollte sie von schräg oben aufnehmen, so dass die Snare akustisch verdeckt ist. Ausnahme: ein Mikrofon für Snare und Hi-Hat zwischen beiden. Der Bereich neben der Hi-Hat ist wegen des Luftzugs zu vermeiden.

Toms. Bis auf das bassstarke Stand-Tom brauchen diese Mikrofone gar nicht besonders breitbandig zu arbeiten. Sie sollten nahe am jeweiligen Instrument angebracht sein, zwischen zwei Hänge-Toms kann ein Mikrofon ausreichen.

9.3 Mischung der Aufnahme

9.3.1 Das Ziel bei Aufnahmen: Simuliertes perfektes Ereignis, nicht Dokumentation

Die schlechte Nachricht zuerst: auch mit den derzeitig ausgefuchstesten Methoden gelingt es nicht, ein von der Realität ununterscheidbares Abbild der Aufnahmesituation herzustellen.

Die gute Nachricht: das ist gar nicht notwendig. Wenn man alles ausnutzt, was an modernen Techniken und Verfahren zur Verfügung steht, kann man eine überzeugende Simulation eines akustischen Ereignisses erstellen, das in der Form nie vorgelegen hat und die Möglichkeiten an realen Ereignissen zum Teil weit übertrifft. Man kann Fehler ausmerzen, die Balance optimieren, ausgleichen, hervorheben und einem perfekten Klangbild sehr nahe kommen.

9.3.2 Aufräumen

Jeder Teil einer Spur, der (zumindest bei Polymikrofonie) keinen Anteil am Ergebnis zu einer gegebenen Zeit hat, sollte stumm geschaltet werden. Dabei muss vor allem bei Signalen mit allmählichem Anschwingen unbedingt im Solo-Modus nach Gehör gearbeitet werden. Andernfalls (bei Arbeit nach Sicht) schneidet man schnell wesentliche Teile des Anschwingens (oder Anblasens, oder ...) weg.

Vorsicht ist geboten, wenn der Kanal einen Raumanteil besitzt. Das Stummschalten kann unter Umständen den Eindruck des Hintergrundes der „Atmosphäre" hörbar verändern, zum Beispiel im Panorama.

9.3.3 Balance der Schallquellen

Die ursprüngliche Bedeutung der Mischung und immer noch der wichtigste Aspekt ist die Balance der Lautstärken der einzelnen Schallquellen. Diese muss in der Regel während der Aufnahme kontinuierlich entlang der jeweiligen Bedingungen nachgeführt werden. Dies kann durch Mixautomatisierung (Faderfahrten) mittlerweile sehr gut aufgezeichnet, reproduziert und daher auch mit mehrfacher Verfeinerung versehen werden. Alan Parsons äußerte in einem Interview bei Google, dass die ursprüngliche Bezeichnung „Balance" eigentlich die Hauptaufgabe gut beschreibt.[4]

Durch Effekte, die auf die Lautstärke einwirken (vor allem Kompressoren) kann man einen Teil der Anpassung automatisch erledigen. Die passende Parameterkombination zu finden ist allerdings alles Andere als trivial. Ethan Winer geht davon aus, dass man mit dem dafür notwendigen Aufwand auch von Hand eine Faderfahrt in allen Einzelheiten festlegen kann.

9.3.4 Klang der einzelnen Kanäle

Der Grundklang, wie er vom Mikrofon an der gewählten Position zur Verfügung gestellt wird, kann durch Equalizer an die Bedürfnisse der Mischung angepasst werden. Dabei ist unbedingt zu beachten, dass im Zweifel der Gesamtklang wichtiger als der Klang

[4] Video auf [19]

einer einzelnen Quelle ist. Jede Beeinflussung ist letztendlich im vollständigen Mix zu kontrollieren.

Wichtig ist, dass nicht zu viele Spuren zum Bassanteil beitragen, sonst kommt es durch Verdeckungseffekte zum Verlust der Transparenz. Neben der Kompensation der Nahbesprechung sollte jeder unnötige Tieftonanteil unterdrückt werden, wo es sinnvoll ist auch mit Hochpassfiltern.

Eine Faustregel besagt, man sollte (mit dem parametrischen Equalizer) breitbandig anheben und schmalbandig absenken. Eine schmalbandige Anhebung verändert den Charakter der Quelle, da unser Gehör diese oft anhand von charakteristischen Resonanzen erkennt. Um eine störende Frequenz genau zu bestimmen, kann man mit einer schmalbandigen Anhebung die Frequenzen durchfahren und danach diejenigen absenken, bei denen der Klang durch die Anhebung besonders unangenehm wird. Eine Abhandlung darüber findet sich bei Falconer[5].

9.3.5 Lokalisierung

Durch Panpot und Zuordnung der Hauptmikrofone zu Kanälen verteilt man die einzelnen Quellen entlang der Stereobreite oder (bei Surround) dem Umfeld. Das sollte sich bei bekannten Gegebenheiten wie einem Orchester an der realen Aufstellung orientieren.

Einzelne Solostimmen sollten im Zentrum der Aufmerksamkeit, also in der Mitte abgebildet werden. Die Verteilung erleichtert, verschiedene Stimmen auseinander zuhalten und trägt neben Balance und Klanganpassung zur Klarheit und Durchhörbarkeit der Gesamtmischung bei.

Wichtig ist auch, im Mittel die Links-Rechts-Balance zu halten und nicht eine Seite zu bevorzugen.

Ein besonders wuchtiges Klangbild ergibt sich, wenn Unisono-Instrumente mit unterschiedlichem Klang auf den extremen Positionen des Stereobildes miteinander zu hören sind (Wall of Sound). Ein Frage- und Antwortspiel mehrerer Stimmen wird durch Links-Rechts-Verteilung hervorgehoben. Man sollte aber nicht so weit gehen, wie in der Anfangszeit ein extremes Ping-Pong Stereo zu erzeugen.

Der Hall sollte den Stereobereich ausfüllen, bei Surround vor allem auch die Surround-Lautsprecher, damit eine maximale Umhüllung eintritt und der Hall natürlich wirkt.

9.3.6 Rauminformation

Eine mit aufgenommene Rauminformation sollte mit breitem Stereobild so eingemischt werden, dass sich eine überzeugende Einheit mit dem passenden Direktsignal ergibt. Keinesfalls dar das Signal als vom Raum getrennt erscheinen.

9.3.7 Kombination von Effekten: Erzeugen von Tiefenstaffelung

Neben dem Winkel in der Ebene (oder neuerdings auch nach oben) gibt es noch eine weitere Dimension, in der eine Quelle lokalisiert wird: Die wahrgenommene Entfernung. Zur Gestaltung gibt es neben der Aufnahme bei passender Konfiguration folgende Möglichkeiten bei der Mischung, um die Tiefenstaffelung zu gestalten:

Lautstärke Sie ist schon bei der Balance mit beschrieben. Sicher klingen leise Quellen auch im Endeffekt weiter entfernt.

Anteil extremer Höhen Die Luft dämpft auf große Entfernung die Höhen (Extremfall: Donnerschlag). Durch den Höhenregler kann man daher auch Entfernung simulieren oder umgekehrt.

Präsenzfrequenzen Durch die Ergebnisse von Blauert kennt man Frequenzen, die eine Quelle mehr oder weniger präsent erscheinen lassen.

Nähe erzeugt man durch Absenkung bei 1 Khz und Anhebung bei 300 Hz und 2-4 KHz, jeweils recht breitbandig, laut Sengpiel 2/3 Oktave. Ferne erzeugt man entsprechen umgekehrt. Bis zu 6 dB sind für den Effekt sinnvoll

Hallverzögerung Je schneller der Hall (vor allem die frühen Reflektionen) einsetzt, umso ferner nimmt man die Quelle wahr. In der akustischen Realität wird das durch abnehmende Umwege von streifenden Reflektionen und erst recht Reflektionen von einer Rückwand verursacht.

Man kann mehrere virtuelle Ebenen erzeugen, indem man einen Raumhall verwendet, für den man verschieden lange Verzögerungen von entsprechenden Bussen vorschaltet. Entfernte Quellen werden direkt in den Halleingang gegeben, je weiter sie vorne sein sollen, um so länger ist die Verzögerung, die der entsprechende Bus vorschaltet.

Hallpegel Je weiter eine Quelle entfernt ist, um so höher ist der Hallpegel relativ zum Pegel des direkten Signals.

Durch Kombination dieser Effekte mit der Stereo-Lokalisation hat man schon bei 2-Kanalstereophonie eine gesamte virtuelle Fläche, auf der man die Quellen verteilen kann. Das erhöht die Auflösung in einzelne Quellen und die Transparenz der gesamten Fläche, ohne dass die Mischung unnötig trocken (hallarm) sein muss.

Ein illustratives Beispiel für einer Pop-Ballade, man muss nicht alle Parameter wirklich nutzen:

9.3.8 Fokus

Mit den genannten Mitteln lenkt man auch die Aufmerksamkeit des Hörers. Vor allem, wenn es nur um eine Audioaufnahme ohne Film geht, kann man fehlende optische Hinweise auf Ereignisse durch die Lenkung der Aufmerksamkeit (Betonung bestimmter Ereignisse in der Mischung durch Lautstärke, Klang) ausgleichen. Auch damit kann eine gute Aufnahme einem realen Ereignis überlegen werden.

9.3.9 Dynamik

Die Dynamik von Stimmen und Instrumenten ist so hoch, dass sie in realen Wiedergabesituationen oft nicht darstellbar ist. Deswegen ist es oft notwendig, die Dynamik der gesamten Aufnahme zu korrigieren, in der Regel zu Komprimieren.

Vor einiger Zeit gab es einen absolut desaströsen Wettlauf um die lautest mögliche Aufnahme, in dem bei vielen Pop- und Rockaufnahmen jede Abweichung von Vollaussteuerung oder gar Übersteuerung durch Brick Wall Limiter, Kompressoren und Multibandkompressoren gewaltsam unterdrückt wurde. Der Effekt ist nicht umkehrbar, da ursprünglich vorhandene Information über die Dynamik verloren ging. Rhythmische Akzente und Dynamik als wichtiges Ausdrucksmittel gingen verloren. Glücklicherweise geht die Ära der

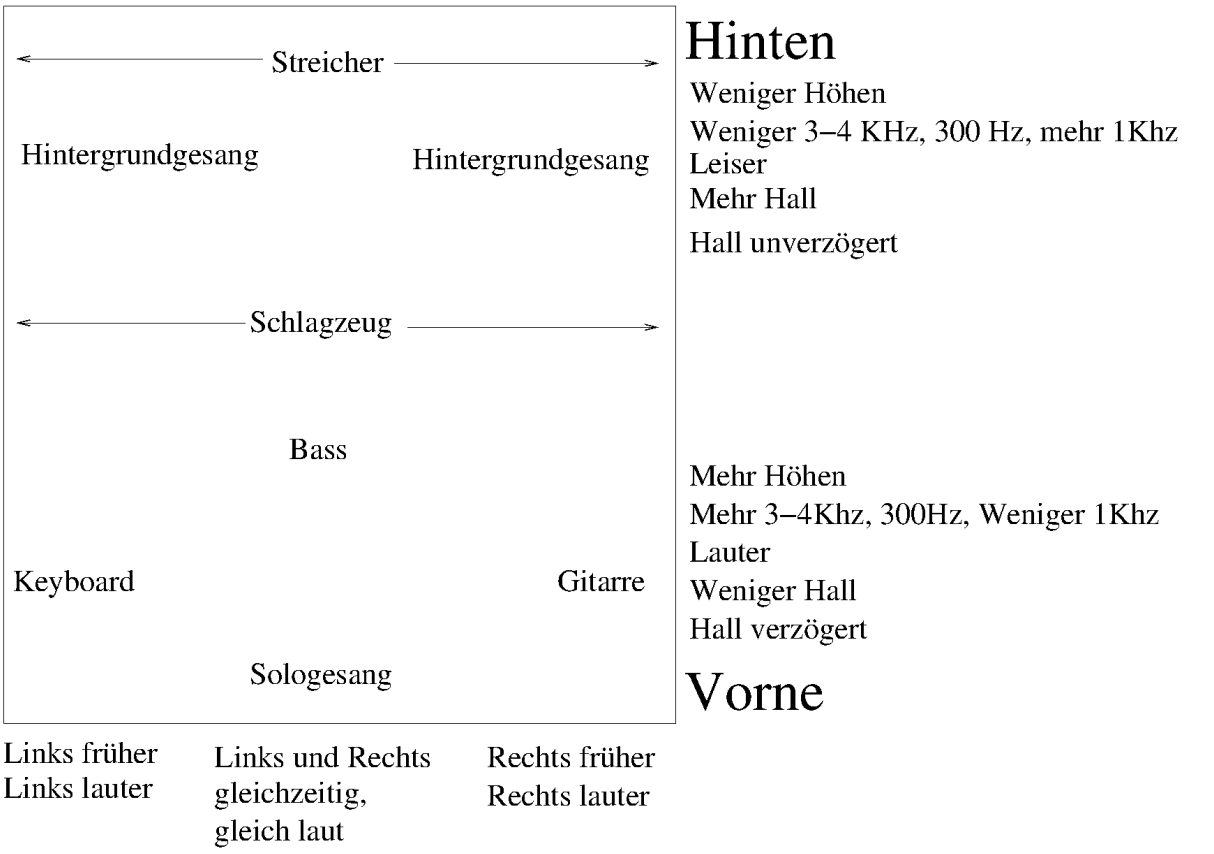


Abbildung 9.5: Beispiel einer Stereofläche: Links-Rechts und Vorne-Hinten

„Loudness Wars" durch die konsequente Bereitstellung mit gehörmäßig konstantem Pegel aller Stücke auf Streaming-Plattformen anscheinend dem Ende entgegen.

Eine sinnvolle Verringerung der Dynamik speziell bei Klassikaufnahmen geschieht am Besten von Hand, indem vor starken Änderungen der Lautstärke die Korrektur vorweggenommen wird. Der Sprung bleibt damit gut wahrnehmbar. Beispiel: Bevor ein Fortissimo einsetzt, wird die vorhergehende Musik schon langsam und unmerklich abgeregelt. Der Wechsel bleibe damit originalgetreu, obwohl der Dynamikbereich auf praxisgerechte Differenzen begrenzt wird.

10 Praxis der Beschallung

10.1 Echtzeit

Spätestens nach dem typischerweise auch kurzen Soundcheck erfolgt alles Weitere in Echtzeit. Die Tontechnik muss immer präsent sein und bei Bedarf eingreifen. Jedes Problem ist so weit wie irgend möglich in Echtzeit zu lösen.

Ein tiefes Verständnis der eingesetzten Technik und der akustischen Gegebenheiten ist dazu unerlässlich. Ein tiefes Nachdenken über komplexe Sachverhalte kann allerdings im Nachhinein helfen, bei späteren Events analoge Probleme von vorne herein zu vermeiden.

Eine gute Vorbereitung vermeidet eine Menge an Problemen. Dazu gehören neben einer guten Anlage, die gut eingerichtet gehört auch eine gute Ausstattung mit Messgeräten wie Kabeltester.

Kabel sind stolpersicher zu verlegen, alles Notwendige sollte fixiert sein (z.B. mit dem berühmten Gaffa-Tape). Der Ablauf muss um Vorfeld feststehen, Absprachen müssen getroffen sein (z.B. bestimmte Effekte, Einspieler).

10.2 Die Rückkoppelung

Da die Wiedergabe im gleichen Raum oder auch im Freien in unmittelbarer Nähe der Bühne stattfindet, wird immer einiges an Schall von der Beschallung oder dem Monitorsignal wieder in die Mikrofone gelangen.

Im besten Fall verschlechtert das als verzögertes und noch dazu im Frequenzgang massiv verbogenes Störsignal den Klang der einzelnen Mikrofonsignale, im schlimmsten Fall führt es zur gefürchteten Rückkoppelung, die sich als Pfeifen bis zur Leistungsgrenze oder (meist bei Übertragung durch den Boden und Ständer) auch massivem Dröhnen zeigt. Sie kann zu Hörschäden und zu Ausfällen von Komponenten führen. Das sollte eigentlich nicht mehr passieren können, man kann sich aber nicht blind darauf verlassen.

Alle vertretbaren Maßnahmen zur Vermeidung der Rückkoppelung sollten angewandt werden. Dies sind:

10.2.1 Begrenzung der Lautstärke bzw. Verstärkung

Die Rückkoppelung setzt ein, sobald die Lautstärke einer wiedergegebener Komponente an einem Mikrofon oder der Gesamtmischung bei passender Phase bei einer einzigen Frequenz den Originalpegel erreicht, die Über-Alles Verstärkung also bei 1 oder 0 dB ankommt. Daher ist es wichtig, die Verstärkung und Lautstärke nicht unnötig hoch zu wählen, auch nicht ein klein wenig.

Man darf nicht übersehen, dass die negativen Auswirkungen der Rückkoppelung bereits vor dem Einsetzen des sich selbst aufschaukelnden Signals katastrophale Auswirkungen auf den Klang haben. Bei den kritischen Frequenzen tritt bereits in einigem Abstand vor der Oszillation ein Resonanzverhalten ein, das den Klang extrem verfärbt, ebenso erhält

man einen Kammfilter-Effekt mit Wiederholung sowie ein zunehmend langes Nachklingen. Das sind alles gute Rezepte gegen jede Form einer brauchbaren Abmischung.

Auch die Lautstärke der Quellen auf der Bühne selbst (vor allem Instrumentalverstärker) sollte so gering wie möglich sein. Diese Verstärker sollen bei PA-Einsatz nicht das Publikum und die Bühne beschallen, sondern nur den ausführenden Künstler. Wenn also nicht der Klang durch Lautsprecher-Verzerrung gewollt geformt wird, sollten dies Verstärker so nahe wie möglich am Künstler positioniert und auf ihn ausgerichtet werden, eventuell am Boden gekippt oder auf Hochständer. So kann der Künstler sich selbst deutlich hören, ohne die akustische Situation an anderen Stellen, vor allem dem Platz weiterer Mikrofone, zu komplizieren.

Wenn ein Signal zu schlecht zu hören ist, sollte man immer zuerst prüfen, ob ein anderes verdeckend wirkt und abgesenkt werden kann. Das ist immer gefahrlos möglich, im Gegensatz zu einer Anhebung eines Pegels.

10.2.2 Sinnvolle Ausrichtung von gerichteten Lautsprechern, Isolation

Die wiedergebenden Lautsprecher, vor allem der PA, sollten so gut wie möglich nur den für sie vorgesehenen Bereich beschallen. Jedes Übersprechen auf den Bereich, auf dem die aufnehmenden Mikrofone untergebracht sind, verschlechtert die Bedingungen. In extremen Fällen werden Abtrennungen verwendet (Vorhänge, Plexiglas-Scheiben).

10.2.3 Nahmikrofonie

Bei hoher gewünschter Verstärkung ist es unerlässlich, alle Quellen so nahe wie möglich zu mikrofonieren (abzunehmen). Im Gegensatz zur Aufnahme im Studio sind hier Kompromisse im Klang deutlich besser vertretbar. Der theoretisch bessere Klang einer entfernteren Mikrofonierung hilft nichts, wenn er durch die Rückkoppelung nicht einsetzbar ist. Mit EQ-Einsatz muss man versuchen, den möglichen Kompromiss-Klang zu optimieren.

10.2.4 Richtmikrofone, geschickt ausgerichtet

Die Bühne ist die Domäne von guten Richtmikrofonen. Ganz besonders wichtig ist, dass beim Handeinsatz die rückwärtigen Schalleinlässe nicht abgedeckt werden (man sieht es leider immer wieder).

Man sollte die nahen Fremdquellen, vor allem Monitor-Boxen oder andere laute Schallquellen (Schlagzeug) möglichst in den Auslöschungsbereichen unterbringen.

Ganz wichtig ist, dass die Richtcharakteristik möglichst vom Mikrofon gut und gleichmäßig eingehalten wird. Oft ist die Auslöschung ausgerechnet in dem Bereich der oberen Mitten, der wegen eine besseren Verständlichkeit eventuell anheben muss, durch Beugungseffekte nur eingeschränkt. Eine einzige unerwünscht aus der Richtung angehobene Frequenz definiert die damit verminderte Schwelle zur Rückkoppelung.

10.2.5 Vorsicht bei Anhebung von Frequenzbereichen

Jede Anhebung eines Frequenzbereichs geht mit der Gefahr der Rückkoppelung einher. Daher ist das alternative Absenken eines komplementären Bereichs sicherer.

10.2.6 DI-Boxen, wo immer möglich

So weit wie irgend möglich sollte bei elektronischen Signalen der direkte Weg über DI-Boxen gewählt werden. Das Signal kann dann nicht mehr zu eine Rückkoppelung führen und es ist getrennt von anderen Signalen, was eine deutlich sauberere Mischung ermöglicht.

Wenn Verstärker und Lautsprecher klangformend sind (Gitarrenverstärker, Leslie), sollte über eine Emulation (vielleicht parallel als Fallback-Lösung) nachgedacht werden. Nicht jeder Künstler ist damit einverstanden, aber das Problem lässt sich umgehen, wenn diese Klangformung elektronisch durch Emulation gelöst wird und eine neutrale Monitorbox dem Künstler seinen eigenen Klang gibt.

10.2.7 Möglichst resonanzarme Wandler

Jede Resonanz, egal wie schmal oder wie niedrig angehoben, verstärkt die Gefahr der Rückkoppelung. Das betrifft die Lautsprecher (vor allem Monitor) und alle Mikrofone. Leider sind die meisten angegebenen Frequenzgänge geglättet, was die Gefahr durch die Komponente extrem untertreibt. Bei einigen dynamischen Bühnenmikrofonen wird neuerdings verstärkt auf diesen Aspekt geachtet.

10.2.8 Wenig Hall im Monitor

Der Hall ist immer mit einem extrem stark zerklüfteten Frequenzgang verbunden, da jedes Echo seinen eigenen Kammfilter-Effekt mit aufprägt.

Daher sollte mit Hall im Monitor sehr vorsichtig gearbeitet werden. Er ist aber nicht vollständig zu verdammen, da er die Hörbarkeit von Tonhöheänderungen wie Vibrato sehr stark erhöht (der Hall bietet eine zeitliche Referenz) und das Gefühl des Künstlers verbessern kann. Dessen Performance ist unerlässlich für ein gutes Ergebnis.

10.2.9 Vorsichtiger Umgang mit Kompressoren & Co

Kompressoren und Limiter senken die Verstärkung bei hohen Pegeln. Greift man in dem Moment einer lauten Stelle in die Mischung ein, kann es sein, dass bei Absinken des Pegels die Verstärkung in den Bereich der Rückkopplung steigt.

Expander und Noise Gates senken die Verstärkung oder schalten das Signal an leisen Stellen ab. Hier kann durch Einsetzen des Signals plötzlich eine Rückkopplung einsetzen.

10.2.10 Equalizer

Mit einem Equalizer kann man aus dem Monitor- oder PA-Weg gezielt die Frequenzen absenken, bei denen eine Rückkoppelung einsetzt oder einzusetzen droht. Oft reicht eine sehr schmale Absenkung aus, was den klanglichen Eingriff minimiert. Ein mitlaufender Frequenz-Analyzer ist mittlerweile per Applikation auf jedem Smartphone trivial zu erhalten und hilft, die betroffene Frequenz im Notfall sicher und genau zu lokalisieren.

10.2.11 Feedback-Killer

Die Feedback-Killer verfolgen das Signal und regeln selbsttätig ein Notch-Filter an die passenden Frequenzen. Der Vorteil ist, dass dies im laufenden Geschehen auch auf Änderungen (bewegte Mikrofone) reagiert.

Vorsicht ist geboten bei Signalen, die mit einer Rückkoppelung verwechselt werden können, wie lang stehende hochpegelige Orgeltöne oder gewollte Rückkoppelung einer E-Gitarre.

10.3 Erschütterung, Wind und Popp

Gerade richtende Mikrofone sind sehr empfindlich gegen Erschütterungen, Wind und Popp-Einflüsse.

Wenn kein tiefer Bassanteil übertragen werden muss wie bei Gesangs- und Sprachmikrofonen kann man die dafür und für Nahbesprechung optimierten Gesangsmikrofone verwenden. Sie haben auch einen Wind- und Popp-Schutz integriert. Bei extremer Nahbesprechung verbleibt aber eine Restempfindlichkeit gegen Popp-Geräusche bei direktem Auftreffen von Atmung. Ein weiterer Schutz kann sinnvoll sein. Er ist auch leicht auswechsel- und waschbar. Die Schutzkonstruktionen lassen sich meist abschrauben und sollte regelmäßig gesäubert werden. Ich bekam normale Geschirrspüler empfohlen.

Bei Instrumenten mit hoher Lautstärke kann die minimale Entkoppelung gegen Erschütterung durch ein normales Stativ ausreichend sein, da das Nutzsignal genug Pegel hat.

Im Freien ist zu beachten, ob Windstöße zu tieffrequenten Störungen führen. Wenn ja, braucht man ausreichend große Schaumstoff-Schutzüberzüge. Kleine sind entweder schlecht wirksam oder so dicht, dass die Höhen unzumutbar geschwächt werden[36].

Es ist wichtig, Instrumentenmikrofone so zu fixieren, dass ihre gefundene optimale Position konsequent und verlässlich erhalten bleibt. Stative, Kabel und Mikrofone dürfen keine Stolperfallen darstellen.

10.4 Wettereinflüsse

Feuchte und Wasser (Regen) sind natürliche Feinde von allem, was entfernt mit Elektrik zu tun hat. Im Freien ist dafür zu sorgen, dass kein Teil der Ausrüstung gefährdet wird.

Gesangsmikrofone in Nahbesprechung sind durch Kondenswasser aus dem auskühlenden Atem gefährdet. In dynamischen Kapseln können wenigstens keine mindestens lautstarke Spannungsüberschläge von der Polarisationsspannung oder im Impedanzwandler eintreten. Bei Bedarf schützt ein zusätzlicher Schaumstoffschutz auch hiervor.

10.5 PA - Beschallung des Publikums

Die PA (**P**ublic **A**ccess) hat die Aufgabe, den Zuhörerbereich zu beschallen. Sie muss eine hohe akustische Leistung breitbandig, mit möglichst linearem Frequenzgang und einer für die geometrischen Gegebenheiten passenden für möglichst umfassende Frequenzbereiche konstanten Richtcharakteristik bereitstellen. Wenn (eigentlich immer) mehr als eine Reihe von Zuhörern erreicht werden soll, muss zumindest der Höhenbereich über der Kopfhöhe abgestrahlt werden, da sonst die Köpfe der ersten Reihen den Bereich vor Erreichen der hinteren Hörer absorbieren.

Hier ist unbedingt zu beachten, wie der Bedarf an Leistung (und damit von benötigten Komponenten) wächst, wenn der notwendige Schalldruck oder die abzudeckende maximale Entfernung anwächst, insbesondere im Freien ohne Nachhallfeld.

Ich erinnere an die dB-Rechnungen: doppelter Schalldruck bedeutet vierfache Leistung, doppelte empfundene Lautstärke zehnfache Leistung, doppelte beschallte Entfernung im Freien vierfache Leistung.

PA-Lautsprecher zeichnen sich daher immer durch eine hohe Belastbarkeit und einen möglichst hohen Schalldruck aus.

10.5.1 Minimallösung, kein Bass

Ein ganz kleines Setup für bassarme Signale (Sprache, kleine akustische Instrumente) kann durch zwei Boxen rechts und links der Bühne auf Hochständern realisiert werden. Eine einzelne Box würde entweder im Weg zwischen Künstler und Publikum oder dahinter an der für Rückkoppelung gefährlichsten vorstellbaren Stelle stehen.

10.5.2 Voller Frequenzbereich, Subwoofer

Die Basskomponenten von einer Box auf einem Hochständer erfahren gerade im oberen Bassbereich durch den Kammfiltereffekt der ersten Reflektion vom Boden bei typischen Positionen eine starke Abschwächung. Wenn also der volle Hörbereich abgedeckt werden soll, ist die Anwendung mindesten eines Subwoofers dringen empfohlen. Er sollte direkt auf dem Boden stehen, so dass dessen Reflektion im Bassbereich in Phase erfolgt, was den Schalldruck um 6 dB und den Wirkungsgrad um immerhin 3 dB erhöht (Addition des Schalldrucks bei gleicher Phase).

10.5.3 Klassischer Stack

Die klassische Variante zum Erzeugen einer hohen akustischen Leistung verwendet einen Stapel von Lautsprecherboxen auf beiden Seiten. Am Boden stehen mächtige Subwoofer, meist große Bassreflex- oder (mittlerweile seltener)Hornboxen. Diese arbeiten zueinander in Phase, so dass sich der Schalldruck addiert und der Wirkungsgrad verbessert. Man kann im Bass bei zunehmendem Bedarf so viele gleichphasige Boxen wie notwendig verwenden. Wenn im oberen Bassbereich bereits eine Richtwirkung durch Interferenz einsetzt, die enger als gewünscht ist, kann man sie im Kreisbogenausschnitt aufstellen. Dabei tritt aber der Effekt auf, dass vor dem Einsetzen der gewünschten Winkels ein Übergangsbereich auftritt, in dem die Krümmung der Wellenfront noch nicht genug Phasenunterschied aufbringt, um den Winkel auf dem des Kreisausschnitts zu erweitern. Der Bereich ist stärker gewichtet.

Im Bereich der oberen Mitten und insbesondere Höhen ist dieses Stacking wesentlich problematischer. Man kann mit klassischen Hörnern (die man in dem Bereich wegen des notwendigen Wirkungsgrades praktisch immer verwendet) keinen Anschluss mit passenden Phasen der Wellenfronten und ohne Lücken am Ausgang erreichten. Das führt bei der Kombination mehrerer Quellen zur Ausprägung eines Gitters mit entsprechendem gitterförmigem Abstrahlverhalten (Lobing). Man sollte also versuchen, entweder mehrere dieser Lautsprecher so nahe wie möglich übereinander zu montieren, damit im gesamten Publikumsbereich horizontal der Klang möglichst konsistent ist oder am Besten mit einem Mittelhochton-Teil mit ausreichender akustischer Leistung auskommen. Da die Anforderungen an die Leistung im Bass je nach Musiksignal wesentlich höher sind als in den Mitten und Höhen, kann man mit der Methode aber eine ziemlich hohe Gesamtleistung realisieren.

10.5.4 Vertikales Array

Bei einem vertikalen Array wird das Lobing in vertikaler Richtung vermieden (oder zumindest extrem reduziert), indem die Komponenten so ausgelegt werden, dass die Wellenfronten am vorderen Ausgang von oben bis unten gleichmäßig eben oder leicht gekrümmt (meist 5°) ankommen. Man kann diese dann übereinander anschließend montieren und durch Einstellung der Winkelstellung die Kurvenform der ausgehenden Wellenfront einstellen. Um den Pegelverlust durch große Entfernung auszugleichen, hängt man die Konstruktion recht hoch auf und wählt man in der Regel im oberen Bereich einen Winkel senkrecht zur Richtung zu den hinteren Hörern mit einem großen Teil der Komponenten und winkelt die unteren mehr und mehr nach unten ab, zu den vorderen Hörern. Da diese näher sind, strahlen weniger Einheiten in ihre Richtung.

Den Bassbereich realisiert man aber auch dabei in der Regel mit Stacks von Subwoofern auf dem Boden.

Wenn man genug Leistung zur Verfügung hat, kann man eine Richtcharakteristik bis in den Tiefbass erreichen, indem man durch Subwooferkonstruktionen mit teiloffenen Rückseiten wie bei Richtmikrofonen eine nierenförmige Charakteristik verwendet.

Diese Art von Anlagen ist sinnvoll nur nach vorgeschalteten Simultationsrechnungen auszurichten und einzustellen.

10.6 Monitor

10.6.1 Monitorboxen

Damit die Künstler sich auf der Bühne gegenseitig genug hören, kann man Monitorboxen einsetzen, denen man einen eigenen Monitor-Mix zuspielt. Das kann ein globaler Mix aus dem Saalmischer sein oder mehrere Mischungen für jeden Künstler, dann meist von einem zusätzlichen Mischer, getrennt vom PA-Signal. Wichtig ist die gute Kommunikation mit der Bühne. Ein Monitor-Mischer hat teilweise selbst eine Monitorbox in der Nähe, auf die er die verschiedenen Monitormischungen zur eigenen Kontrolle wahlweise aufschalten kann.

Man unterscheidet angewinkelte Bodenmonitore, die sinnvollerweise im Auslöschungswinkel der wichtigsten Mikrofone platziert werden, und stehende Sidefill-Monitore neben der Bühne, die so etwas wie eine kleine PA für die Gesamtbeschallung der Bühne darstellen.

Entscheidend ist, dass Vorkehrungen gegen eine Rückkoppelung über die Monitoranlage getroffen werden.

Dazu gehören die geschickte Positionierung von Boxen und Mikrofonen, die Verwendung von Boxen ohne starke Resonanzüberhöhungen, kein oder minimaler Einsatz von Halleffekten, da diese typischerweise eine zerklüfteten Frequenzgang mit Spitzen zeigen, Equalizer zum Ausblenden gefährlicher Frequenzen oder ein automatisches System zur Rückkopplungsunterdrückung.

Ein schlechter Monitormix kann eine Gruppe noch schlechter dastehen lassen als ein schlechter PA-Mix. Das Timing gerät durcheinander und die Künstler scheinen unfähig.

Monitorboxen brauchen nicht in jedem Fall eine starke Basswiedergabe, da je nach Aufstellung, Raumakustik und PA-System aus der PA genügend Bass (oder gar mehr) auf die Bühne zurückkommt. Problematisch ist allerdings, wenn diese Klanganteile wegen der größeren Laufzeiten merklich verzögert auf die Bühne gelangen. Das kann es schwer

machen, den Takt genau zu erkennen.

10.6.2 In-Ear

Bei der In-Ear Monitorlösung verwendet man schalldichte Ohrhörer, über die ein drahtloses Monitoring-Signal auf die einzelnen Künstler verteilt wird. Das schließt jede Rückkoppelungsgefahr durch die Monitor-Anlage aus. Von manchen Akteuren wird die Trennung vom realen akustischen Umfeld unangenehm empfunden. Es kann helfen, über dafür speziell aufgestellte Mikrofone ein Signal der Publikumsreaktion mit einzumischen.

Literaturverzeichnis

[1] Übersichtsseite der DLR zu Mikrofonarrays
http://messtec.dlr.de/de/technologie/dlr-aerodynamik-und-stroemungstechnik/mikrofon-array-mikrofon-array/, Zugriff 2016-05-30

[2] EBU Tech. 3276 - 2nd ed. Listening conditions for the assessment of sound programme material: monophonic and two–channel stereophonic, Mai 1998, Zugriff 2016-11-09
URL: https://tech.ebu.ch/docs/tech/tech3276.pdf

[3] EBU Tech 3276-E Listening conditions for the assessment of sound programme material Supplement 1 Revised May 2004 Multichannel sound, Zugriff 2016-11-09
URL: https://tech.ebu.ch/docs/tech/tech3276s1.pdf

[4] Rod Elliot: Webseite zu Elektronik, vor allem Audio-Elektronik.
URL: http://sound.whsites.net, Zugriff 2018-03-27

[5] Joel Falconer: How to Use a Parametric Equalizer, http://music.tutsplus.com/tutorials/how-to-use-a-parametric-equalizer--audio-2301, Zugriff 2016-06-07

[6] Earl Geddes: Multiple Subwoofers in Small Rooms, Presentation http://www.gedlee.com/downloads/OptimalBassPlaybackinSmallRooms.pptx, Video https://www.youtube.com/watch?v=SCWL-zusyqw, Zugriff 2016-06-01

[7] Andreas Gernemann: „Decca Tree" - gestern und heute, http://www.uni-koeln.de/phil-fak/muwi/ag/tec/deccatree.pdf, Zugriff 2016-06-02

[8] Andreas Gernemann: Psychoakustische Werte für die Lokalisation mit zwei und drei Frontlautsprechern, http://www.uni-koeln.de/phil-fak/muwi/ag/tec/lokalisation.pdf, Zugriff 2016-06-02

[9] Jürg Jecklin: Musikaufnahmen: Grundlagen, Technik, Praxis - München: Franzis Verlag, 1980

[10] Stephan Leschka: Digitale Mikrophontechnik,
http://www.neumann.com/download.php?download=lect0052.PDF, Zugriff 2016-05-18

[11] Volker Meitz: Die historische Entwicklung von Kondensatormikrophonen unter Berücksichtigung von Schaltungstechnik und Klangverhalten https://www2.ak.tu-berlin.de/~akgroup/ak_pub/abschlussarbeiten/2005/MeitzVolker_MagA.pdf, Zugriff 2016-06-10

[12] Swen Müller: Digitale Signalverarbeitung für Lautsprecher http://publications.rwth-aachen.de/record/56081/files/Mueller_Swen.pdf, Zugriff 2016-07-20

[13] Nyal: Hard proof that equalization kills room modes http://www.acousticfrontiers.com/201163hard-proof-that-equalization-kills-room-modes-html/

[14] Sean Olive: A Virtual Headphone Listening Test Method, http://seanolive.blogspot.de/2016/04/a-virtual-headphone-listening-test.html, Zugriff 2016-06-01.

[15] Sean Olive: Perceiving and Measuring Headphone Sound Quality: Do Listeners Agree on What Makes a Headphone Sound Good? http://seanolive.blogspot.de/2014/06/the-2014-loudspeaker-industry.html, Zugriff 2016-06-01.

[16] Sean Olive: Harman Researchers Make Important Headway in Understanding Headphone Response http://seanolive.blogspot.de/2013/07/harman-researchers-make-important.html, Zugriff 2016-06-01.

[17] Sean Olive: The Relationship between Perception and Measurement of Headphone Sound Quality http://seanolive.blogspot.de/2013/04/the-relationship-between-perception-and.html, Zugriff 2016-06-01.

[18] Harry F. Olson, Acoustical Engineering, 2nd ed. 1948

[19] Alan Parsons & Julian Colbeck: Art and Science of Sound Recording, Talks at Google https://www.youtube.com/watch?v=9pDUwak1GA4&list=PL9Jp8w1LJcfIrwpBwFCyrpq7QhBLSLogV&index=6ş Zugriff 2016-06-06

[20] Stefan Peus: Modern Acoustic and Electronic Design of Studio Condensor Microphones, AES Convention Paper 6131, Berlin, 2004

[21] Richard Pierce: A Novel Approach to Rapid Loudspeaker Design and Prototyping, 1993, http://www.rdrop.com/~billmc/dick_pierce/spreadsheet.ps, Zugriff 2016-05-30

[22] Dick Pierce, Loudspeaker.sc Spreadsheet für Unix-Tabellenkalkulation sc, http://www.rdrop.com/~billmc/dick_pierce/, Zugriff 2016-05-30

[23] Martin Schneider: Kondensatormikrophone im Vergleich - Comparing Condenser Microphones https://www.neumann.com/download.php?download=lect0057_Schneider_TMT_2010_Kondensatormikrophone_im_Vergleich.pdf, Zugriff 2017-06-12

[24] Eberhard Sengpiel URL: http://www.sengpielaudio.com, Zugriff 2016-05-02

[25] Sivian, O'Neil, Journal Acous. Coc. Amer., Vol. 3, No4, p 483, 1932

[26] R. H. Small: Direct Radiator Loudspeaker System Analysys, J. Audio Eng. Soc, vol. 20, pp383-395, (1972)

[27] R. H. Small: Closed-Box Loudspeaker Systems, Pts I and II, J.Audio Eng. Soc., vol 20, pp 798 -808, vol. 21 (1972), pp. 11-18 (1973)

[28] R. H. Small: Vented-Box Loudspeaker Systems, Pts. I-IV, J.Audio Eng. Soc., vol 21, pp 363-372, pp. 438-444, pp. 549-554, pp. 635-639 (1973)

[29] A.N. Thiele: Loudspeakers in Vented Boxes, J. Audio Eng. Soc, vol 19, pp. 282-392, pp471-4831971

[30] Wikipedia-Eintrag zum Soundfield-Mikrophon `https://en.wikipedia.org/wiki/Soundfield_microphone`, Zugriff 2016-07-12

[31] Floyd E. Toole: The Acoustical Design of Home Theaters `http://eu.infinityspeakers.com/tl_files/themes/shop/skins/infinityshop/stylesheet/02/series/technologies/acoustical_design.pdf`, Zugriff 2016-06-01

[32] Floyd E. Toole:Getting The Bass Right `http://www.harman.com/sites/default/files/white-paper/12/11/2015%20-%2006%3A25/files/LoudspeakersandRoomsPt3.pdf`, Zugriff 2016-06-01

[33] Sumit Chawla, Todt Welti, Kevin Voecks: Multiple Subwoofers Benefits Setup `http://www.rapalloav.co.nz/blog/Multiple-Subwoofers-Benefits-Setup`, Zugriff 2016-06-01

[34] Wittek: Mikrofontechniken für Atmoaufnahme in 2.0 und 5.1 und deren Eigenschaften `http://www.hauptmikrofon.de/HW/Wittek_Atmo_TMT2012.pdf`, Zugriff 2016-07-12

[35] Wittek: "ORTF-3D": A microphone setup for 3D Audio and VR ambience recording `http://www.hauptmikrofon.de/3d/ortf-3d`, Zugriff 2019-02-30

[36] Jörg Wuttke: Mikrophonaufsätze
URL: `http://www.schoeps.de/documents/Mikrofonbuch_komplett.pdf`
Zugriff 2016-05-11

[37] Jörg Wuttke: persönliche Webseite URL: `http://www.ingwu.de/`, Zugriff 2016-05-11

[38] Jörg Wuttke: Wissenswertes rund ums Mikrophon, `http://www.ingwu.de/mikrofontechnik/mikrofonaufsaetze/34-20-wissenswertes-rund-ums-mikrofon.html`, accessed 2017-08-04

[39] Christopher (Monty) Montgomery and the Xiph.Org Community: A Digital Media Primer for Geeks,
URL: `https://wiki.xiph.org/Videos/A_Digital_Media_Primer_For_Geeks`, Zugriff 2016-05-19

[40] Christopher (Monty) Montgomery and the Xiph.Org Community: Digital Show and Tell,
URL: `https://wiki.xiph.org/Videos/Digital_Show_and_Tell`, Zugriff 2016-05-19

[41] Wolfram Wagner, Video Liste zur Veranschaulichung von Audiothemen, URL:`https://www.youtube.com/playlist?list=PL9Jp8w1LJcfJF60H4xynTjqXfzjYzNeoT`

[42] Manfred Zöllner und Eberhard Zwicker: Elektroakustik, Springer, 2003