

Gerhard Nierhaus

Hauptmikrofonverfahren

Schriftliche Arbeit zu Erlangung des akademischen Grades Magister artium

Durchgeführt und eingereicht am

Institut für elektronische Musik
An der Universität für Musik und darstellende Kunst Graz
Vorstand: o.H.Prof. Mag. Dipl.-Ing. Dr. Robert Höldrich

Betreuer: o.H.Prof. Mag. Dipl.-Ing. Dr. Robert Höldrich

Graz, im Juni 1999

Inhaltsverzeichnis:

1	EINFÜHRUNG	5
2	SCHALLWELLEN UND SCHALLSCHWINGUNGEN	6
2.1	KENNWERTE EINER SCHALLWELLE	7
2.1.1	Schalldruck	7
2.1.1.1	Schalldruckwerte für den Hörbereich	7
2.1.1.2	Effektivwert des Schalldrucks	7
2.1.2	Schalldruckgradient	8
2.1.3	Schalldruckpegel	8
2.1.4	Schallschnelle	8
2.1.4.1	Das Verhältnis von Schallschnelle und Schalldruck	8
2.1.5	Schallkennimpedanz	9
2.1.6	Schalleistung, Schallintensität	10
2.1.7	Schallgeschwindigkeit, Frequenz, Wellenlänge	10
2.2	DARSTELLUNG VON SCHALLWELLEN ALS SCHWINGUNGEN	11
2.2.1	Die einfache Schwingung	11
2.2.1.1	Geometrische Darstellung einer Schwingung und ihrer Größen	12
2.2.2	Die zusammengesetzte Schwingung	13
2.3	ÜBERLAGERUNG VON SCHALLWELLEN	14
2.3.1	Interferenz	14
2.3.2	Schwebung	14
2.3.3	Kombinationstöne	15
2.4	SCHALLSCHWINGUNGEN IM ZEITLICHEN VERLAUF	15
2.4.1	Resonanz	15
2.4.1.1	Helmholtzresonator	16
2.4.2	Darstellung des zeitlichen Verlaufs eines Schallereignisses	17
3	RAUMAKUSTIK.....	18
3.1	REFLEXION VON SCHALLWELLEN	18
3.1.1	Reflexion an einer ebenen Fläche	18
3.1.2	Reflexion an gekrümmten Flächen	19
3.1.2.1	Reflexion an konkaven Flächen	19
3.1.2.2	Reflexion an einer konvexen Fläche	20
3.1.2.3	Reflexion an einer krummlinigen Fläche	20
3.2	AKUSTISCH STÖRENDE REFLEXIONSERSCHEINUNGEN	21
3.2.1	Kammfiltereffekt	21
3.2.2	Die stehende Welle	22
3.2.3	Flatterecho	23
3.3	ABSORPTION	23
3.3.1	Absorptionsgrad	23
3.3.2	Das Absorptionsvermögen	24
3.3.3	Absorber	24
3.3.3.1	Höhenabsorber	25
3.3.3.2	Mittenabsorber	25
3.3.3.3	Tiefenabsorber	25
3.4	BRECHUNG	25
3.5	BEUGUNG	26
3.5.1	Huygensches Prinzip	26
3.5.2	Beugung an einem Hindernis	26
3.5.2.1	Klangverfärbung durch Beugungsercheinungen	26
3.6	HALL	27
3.6.1	Hallradius	28
4	SCHALLWAHRNEHMUNG	29
4.1	DIE HÖRFLÄCHE	29
4.2	DIE LAUTSTÄRKE	29
4.3	DIE LAUTHEIT	31
4.4	AUFLÖSUNGSFÄHIGKEIT DES MENSCHLICHEN GEHÖRS	32
4.4.1	Physiologische Einschwingzeit des Ohres	32
4.4.2	Tonkennzeit	32
4.4.3	Tonhöhenunterscheidungsvermögen	33

4.4.4	Unterscheidung von Dynamikveränderungen einer Schallquelle	33
4.4.5	Verwischungsschwelle	33
4.4.6	Der Precedence-Effekt	33
4.4.7	Verdeckungseffekt	34
4.4.8	Der Cocktailparty-Effekt	35
5	RÄUMLICHES HÖREN	36
5.1	RÄUMLICHES HÖREN BEI EINER NATÜRLICHEN SCHALLQUELLE	36
5.1.1	Räumliches Hören in der Horizontalebene	36
5.1.1.1	Lokalisierung durch Intensitätsunterschiede	36
5.1.1.1.1	Einfluß von Klangfarbenunterschieden auf die Richtungsinterpretation	37
5.1.1.2	Lokalisierung durch Laufzeitdifferenzen	37
5.1.2	Räumliches Hören in der Vertikalebene	37
5.1.3	Tiefenräumliche Schallwahrnehmung	38
5.2	RÄUMLICHES HÖREN BEI ELEKTROAKUSTISCHER WIEDERGABE	39
5.2.1	Lautsprecherwiedergabe	39
5.2.1.1	Lokalisation durch Laufzeitunterschiede	40
5.2.1.2	Lokalisation durch Intensitätsunterschiede	40
5.2.1.3	Einfluß der verschiedenen Aufnahmeverfahren auf die Lautsprecherwiedergabe	40
5.2.1.3.1	Auswirkung reiner Intensitätsinformationen	41
5.2.1.3.2	Auswirkung von Laufzeitinformationen	41
5.2.1.3.3	Auswirkung von Aufnahmen, die mit Trennkörpern durchgeführt wurden	41
5.2.2	Kopfhörerwiedergabe	42
5.2.2.1	Einfluß der Aufnahmeverfahren bei Kopfhörerwiedergabe	42
5.2.3	Assoziationsmodell von Theile	43
6	MIKROFONE – FUNKTIONSPRINZIP, EIGENSCHAFTEN	44
6.1	EINIGE KENNDATEN VON MIKROFONEN	44
6.1.1	Frequenz- oder Übertragungsbereich	44
6.1.2	Frequenzgang	44
6.1.3	Geräuschspannungsabstand	45
6.1.4	Dynamikbereich	45
6.1.5	Empfindlichkeit eines Mikrofons - der Feld-Übertragungsfaktor	45
6.1.6	Grenzschalldruckpegel eines Mikrofons	46
6.1.7	Verzerrungen	46
6.1.8	Klirrfaktor	46
7	MIKROFONTYPEN – WANDLERPRINZIPIEN	47
7.1	DYNAMISCHE WANDLER	47
7.1.1	Das Bändchenmikrofon	47
7.1.2	Tauchspulenmikrofon	48
7.2	MAGNETISCHE WANDLER	48
7.3	AKTIVE, IRREVERSIBLE WANDLER	49
7.3.1	Kohlemikrofon	49
7.3.2	Piezowandler	50
7.3.3	Kondensatormikrofone	51
7.3.3.1	Der Elektretwandler als Unterform des Kondensatormikrofones	52
8	MIKROFONE - KAPSELAUSFÜHRUNGEN UND RICHTCHARAKTERISTIKEN	54
8.1	DRUCKEMPFÄNGER	55
8.2	DRUCKGRADIENTEN ODER SCHNELLEEMPFÄNGER	56
8.2.1	Achterrichtcharakteristik	56
8.2.2	Nieren- oder Cardioidcharakteristik	57
8.2.2.1	Nierencharakteristik – Unterformen	58
8.2.3	Nahbesprechungseffekt	60
8.3	VERGRÖßERUNGSFAKTOREN VERSCHIEDENER RICHTCHARAKTERISTIKEN	61
9	MIKROFONE - ERWEITERTE BAUFORMEN	62
9.1	KONDENSATORMIKROFON MIT UMSCHALTBARER RICHTCHARAKTERISTIK	62
9.2	ZOOM-MIKROFON	63
9.3	GRENZFLÄCHENMIKROFON	64
9.4	INTERFERENZEMPFÄNGER MIT KEULENCHARAKTERISTIK:	65

10	AUFNAHMEVERFAHREN	67
10.1	HAUPTMIKROFONIE.....	67
10.2	HAUPT-STÜTZMIKROFONIE.....	67
10.2.1	Position der Phantomschallquelle.....	67
10.2.2	Kammfiltereffekte.....	68
10.2.3	Laufzeitdifferenzen.....	68
10.3	EINZELMIKROFONVERFAHREN.....	68
11	DIE VERFAHREN DER HAUPTMIKROFONIE	70
11.1	KOINZIDENZMIKROFONIE.....	70
11.1.1	XY-Verfahren.....	70
11.1.1.1	XY-Verfahren durch zwei Mikrofone mit Nierencharakteristik.....	71
11.1.1.2	XY-Verfahren durch zwei Mikrofone mit Achtercharakteristik.....	72
11.1.1.3	XY-Verfahren durch zwei Mikrofone mit Kugelcharakteristik.....	74
11.1.2	MS-System.....	74
11.1.2.1	Vorteile des MS-Systems:.....	75
11.1.2.2	Nachteile des MS-Systems:.....	76
11.1.3	Groß AB(C)-Technik in einem nahen Abstand zum Klangkörper.....	76
11.1.4	Spezialanordnungen für Intensitätsstereophonie.....	76
11.2	LAUFZEITSTEREOPHONIE.....	77
11.2.1	Klein AB-Verfahren.....	77
11.2.2	Klein ABC-Verfahren.....	79
11.2.3	Groß AB-Verfahren für einen schmalen Aufnahmebereich.....	79
11.3	NAH-KOINZIDENZMIKROFONIE.....	80
11.3.1	Nah-Koinzidenzmikrofonie mit Cardioidkapseln.....	80
11.3.2	Nahkoinzidenzmikrofonie mit Hypercardioidkapseln.....	81
11.3.3	Nahkoinzidenzmikrofonie mit Infracardioidcharakteristiken.....	81
11.4	TRENNKÖRPERSTEREOPHONIE.....	82
11.4.1	Jecklin-Scheibe oder OSS-System.....	82
11.4.2	Das KFM- oder Kugelflächenmikrofon.....	83
11.4.3	Kunstkopfsystem.....	84
11.5	ÜBERSPRECHKOMPENSATION.....	84
12	DOKUMENTATION	86
12.1	MUSIKSTÜCK:.....	86
12.2	AUSFÜHRENDE:.....	86
12.3	ORT, DATUM:.....	86
12.4	AUFNAHMETECHNIK:.....	86
12.5	AUFNAHMEVERFAHREN, TRENNKÖRPERSYSTEME:.....	86
12.6	MIKROFONE, TRENNKÖRPER, KUNSTKOPFSYSTEME.....	87
12.6.1	Kenndaten des Kondensatormikrofons AKG C 480.....	88
12.6.1.1	Frequenzdiagramm einer zufällig ausgewählten Kugelkapsel CK 62:.....	88
12.6.1.2	Frequenzdiagramm einer zufällig ausgewählten Nierenkapsel CK 61:.....	88
12.6.2	verwendete Trennkörper.....	89
12.7	GRUNDRISS: AUFNAHMERAUM - AULA DER MUSIKUNIVERSITÄT GRAZ.....	90
12.8	POSITIONEN DER INSTRUMENTALGRUPPEN UND MIKRONANORDNUNGEN.....	90
12.9	PARTITUR.....	92
13	LITERATUR	101
13.1	VERZEICHNIS DER VERWENDETEN BÜCHER.....	101
13.2	ARTIKELSAMMLUNG.....	103
14	SCHLUBBEMERKUNG	121
15	DANKSAGUNG	122

1 Einführung

Für eine Musikaufnahme stehen im Prinzip drei Verfahren zur Verfügung: Das Einzelmikrofonverfahren, Die Hauptmikrofonie sowie die Haupt-Stützmikrofonie.

Beim Einzelmikrofonverfahren werden verschiedene Komponenten eines Klangkörpers separat aufgenommen und nach verschiedenen Modifikationen zu einem einheitlichen Klangbild zusammengefügt. Dieses Verfahren ermöglicht eine Vielzahl von technischen Manipulationen, läßt jedoch die gegebene räumliche Disposition unberücksichtigt.

Das Hauptmikrofonverfahren versucht einen Gesamteindruck von Raum und Klangkörper zu vermitteln, ohne Einzelaspekte des Klangbildes hervorzuheben.

Bei der Haupt-Stützmikrofonie werden einzelne Bereiche des Klangkörpers durch zusätzliche Stützmikrofone variiert, der Gesamteindruck des Hauptmikrofonverfahrens wird jedoch weitestgehend beibehalten.

Das Thema dieser Arbeit sind die Verfahren der Hauptmikrofonie. Schallausbreitung, raumakustische Gegebenheiten, Klangwahrnehmung, räumliches Hören etc. sind Faktoren, die in ihrer Gesamtheit die Bedingungen für eine Aufnahmesituation ergeben. Diese Arbeit versucht durch ihren schrittweisen Aufbau ein Verständnis für die komplexen Zusammenhänge dieses Gebietes zu vermitteln.

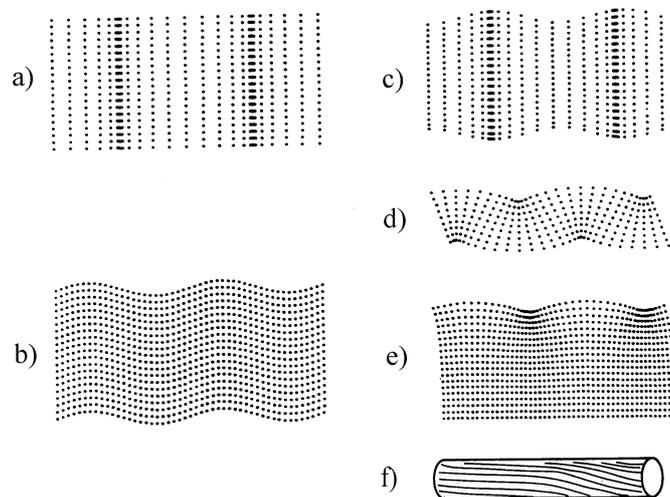
Zur Veranschaulichung der beschriebenen Verfahren ist eine CD mit Hörbeispielen beigelegt. Es wurde ein kurzer Orchestersatz mit verschiedenen Mikrofonanordnungen aufgenommen. Die „Dokumentation“ enthält Informationen über die Musik, das Ensemble, den Raum, die Aufnahmeverfahren, die verwendeten Mikrofonsysteme und ihre Positionierung.

Neben dem üblichen Literaturverzeichnis schließt sich eine Liste mit nummerierten Artikeln an, die als weiterführende Literatur zu diesem Thema dienen sollen. Die kopierten Artikel befinden sich in drei Ordnern am Institut für elektronische Musik an der Universität für Musik und darstellende Kunst Graz.

2 Schallwellen und Schallschwingungen

Durch äußere Krafteinwirkung werden Materieteilchen in eine Schwingung um ihre Ruhelage versetzt. Durch elastische Verkoppelung benachbarter Teilchen breitet sich die Schwingung in einem Medium aus. Da es zu einer zeitlichen Verzögerung in Richtung der Ausbreitung kommt, entstehen im jeweiligen Medium abwechselnd Zonen mit erhöhter sowie geringerer Dichte. Sofern diese Schwingungen für die Ausbreitung von Schall relevant sind, werden diese Wellen Schallwellen genannt. Schallwellen können sich in einem festen, flüssigen oder gasförmigen Medium ausbreiten, nur im Vakuum ist aufgrund der Abwesenheit von energieübertragenden Teilchen keine Schallausbreitung möglich. Durch die Art des Mediums ändert sich auch die Schwingungsrichtung zum Beispiel der Moleküle. Bei flüssigen und gasförmigen Medien pflanzt sich der Schall durch Längs- oder Longitudinalwellen fort. Bei festen Körpern treten zusätzlich noch andere Arten von Schallwellen auf.

Abbildung 1: aus Zwicker, Zollner 1993 und Dickreiter 1995



- a) Längs- oder Longitudinalwellen:
Die Schwingungsrichtung der Moleküle ist mit der Ausbreitungsrichtung des Schalls identisch. Bei Festkörpern treten diese Wellenformen unter anderem nur auf, wenn die Ausdehnung des Mediums groß im Vergleich zur \rightarrow Wellenlänge ist.
- b) Transversalwelle:
Die Moleküle schwingen senkrecht zur Ausbreitungsrichtung des Schalls. Bei dieser Wellenform kommt es zu einer Formänderung des Mediums, auch Schubdeformation genannt, jedoch zu keiner lokalen Volumenänderung.

Wellenformen, die außerdem in festen Körpern vorkommen können:

- c) Dehnungswelle
d) Biegewelle
e) Raleigh- oder Oberflächenwelle
f) Torsionswelle

2.1 KENNWERTE EINER SCHALLWELLE

2.1.1 Schalldruck

Der Schall- oder Schallwechseldruck wird durch geringfügige Druckschwankungen, die dem stationären atmosphärischen Gleichdruck überlagert sind, gebildet. Der Schalldruck wirkt immer in jeder Richtung in gleicher Weise. Eine bevorzugte Richtung, wie zum Beispiel bei der Luftteilchenbewegung, gibt es nicht. Der Schalldruck wird gewöhnlich in *Pascal (Pa)* oder *Newton pro m²* angegeben. Es wird auch die Einheit *μbar* verwendet: $1 Pa = 1 N/m^2$, $1 \mu bar = 0,1 N/m^2$.

2.1.1.1 Schalldruckwerte für den Hörbereich

Für den Hörbereich liegen die Schalldruckwerte ungefähr zwischen $2 \times 10^{-5} Pa$ und $5 \times 10^2 Pa$. Dieser Bereich wird für einen Ton mit der \rightarrow Frequenz von 1.000 Hertz (Hz) angenommen und erstreckt sich von seiner ersten Wahrnehmung, der *Hörschwelle*, bis zum Erreichen einer Schmerzempfindung, der *Schmerzgrenze*.

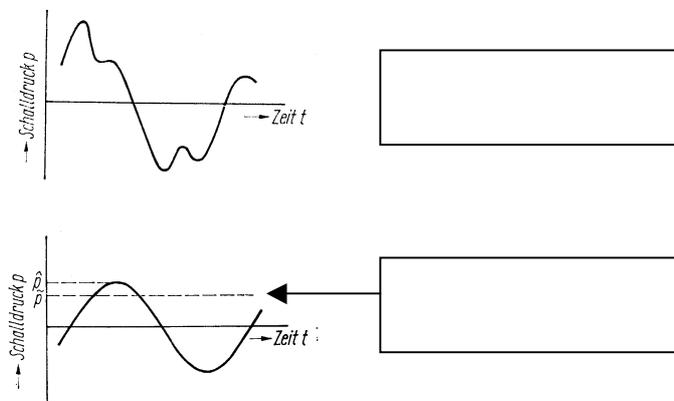
Der durchschnittliche atmosphärische Luftdruck beträgt $1.000 \text{ Hektopascal}$. Ein mäßig lauter Ton hat einen Schalldruck von ungefähr $0,1 Pa$. Der durchschnittliche Schalldruck beträgt somit nur etwa 1 Millionstel des Atmosphärendrucks.

$$1.000 \text{ Hektopascal} = 1 \text{ bar}, 0,1 Pa = 1 \mu \text{ bar}$$

2.1.1.2 Effektivwert des Schalldrucks

Da eine Schallwelle abwechselnd aus Zonen verdichteter und verdünnter Luft besteht, verändert sich damit auch der Wert des Schalldrucks. Aus diesem Grund wird der Schalldruck (p) als eine *Wechselgröße* bezeichnet. Der *Momentanwert* des Schalldrucks gibt den Druck zu einem bestimmten Zeitpunkt der Schwingung wieder. Der *Effektivwert*, in dem Wechselgrößen zumeist angegeben sind, stellt einen quadratischen Mittelwert aus den sich ändernden Beträgen dar.

Abbildung 2: aus Fasold 1987



- $P = \text{Schalldruck (Pa)}$
 - $P_0 = \text{Bezugsschalldruck } 2 \cdot 10^{-5} \text{ Pa; entspricht: } 2 \cdot 10^{-4} \text{ } \mu\text{bar}$
- 8

Für den Effektivwert einer sinusförmigen Schwingung ergibt sich die Relation:

$$\text{Effektivwert} = \frac{\text{Spitzenwert}}{\sqrt{2}}$$

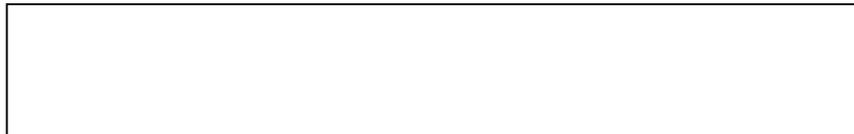
2.1.2 Schalldruckgradient

Als *Schalldruckgradient* wird die Druckdifferenz zwischen zwei Punkten des Schallfelds bezeichnet. Alle Mikrofone mit einer \rightarrow *Richtcharakteristik* sind *Druckgradientenempfänger*.

2.1.3 Schalldruckpegel

Da das menschliche Gehör einen sehr weiten Schalldruckbereich wahrnehmen kann und auf die Änderung des Schalldruckes genau reagiert, wird zur Beschreibung der akustisch interessanten Schalldruckwerte ein logarithmischer Maßstab angewandt. Man gibt das 20fach logarithmierte Verhältnis des Schalldrucks zu einem genormten Bezugsschalldruck an, der etwa der Hörschwelle entspricht. Die Einheit ist das *dB*. Durch den *Schalldruckpegel* lassen sich auch die Verhältnisse von Schalldruckwerten gut darstellen.

$$L_p = 20 \lg \frac{P}{P_0}$$



Nach einer internationalen Übereinkunft wird als Bezugsschalldruck die Hörschwelle für einen Ton mit der Frequenz von *1.000 Hz* angenommen. Bei dieser Frequenz liegt die Hörschwelle bei *4 dB*, die Schmerzgrenze bei ca. *130 dB*. Ein Bereich mittlerer Lautstärke entspricht einem Schallpegel von ca. *70–80 dB*.

2.1.4 Schallschnelle

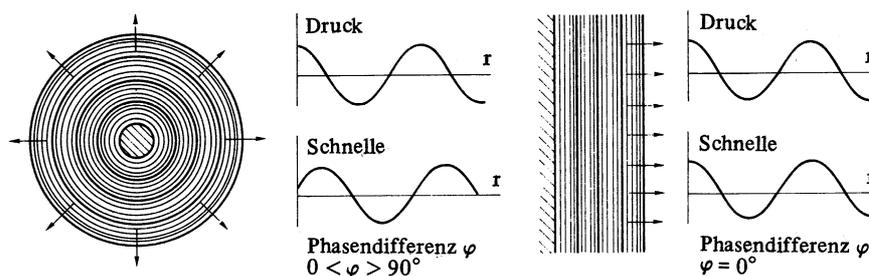
Die Geschwindigkeit, mit der sich Teilchen um ihre Ruhelage bewegen, wird als *Schallschnelle* (*v*) bezeichnet. Die Schallschnelle der Teilchen, die in einer Schallwelle schwingen, ist nicht sehr hoch. Sie beträgt zum Beispiel bei einem Schalldruck von *0,1 Pa* in Luft nur *0,25 mm* pro Sekunde. Die Schallschnelle wird in Meter pro Sekunde (*m/s*) und, da sie eine Wechselgröße darstellt, meist als Effektivwert angegeben.

2.1.4.1 Das Verhältnis von Schallschnelle und Schalldruck

Durch die Größen Schalldruck und Schallschnelle wird das *Schallfeld* gebildet. Die Ausbreitung einer Schallwelle erfolgt in Luft geradlinig nach allen Richtungen. Mit zunehmendem Abstand von der Schallquelle nähert sich die kugelförmige Ausbreitung immer mehr einer ebenen Welle an. Der Bereich der ebenen Welle wird das *Fernfeld*, der Bereich der Kugelwelle das *Nahfeld* genannt.

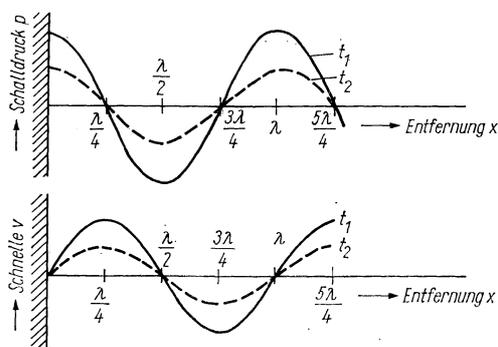
Bei Annäherung an eine Schallquelle im Bereich der ebenen Welle nehmen die Beträge von Schallschnelle und Schalldruck in gleicher Weise ab, außerdem besitzen sie gleiche \rightarrow *Phasenlage*. Im Fernfeld sind also Schalldruck und Schallschnelle in Phase und zueinander proportional. Im Nahfeld steigt der Wert der Schallschnelle in einem überproportionalen Maß zu dem des Schalldrucks an, außerdem kommt es zu einer \rightarrow *Phasenverschiebung* bis 90° . Der Anstieg der Schallschnelle ist außerdem von der Frequenz abhängig. Dieses Verhalten äußert sich in einer Anhebung von tiefen Frequenzen bei \rightarrow *Druckgradientenempfängern* und wird als \rightarrow *Nahbesprechungseffekt* bezeichnet.

Abbildung 3: aus Dickreiter 1997



Bei Reflexion einer Welle an einer Wand ergeben sich ebenfalls Unterschiede von Schalldruck und Schallschnelle. An der Stelle der harten Wand hat der Schalldruck sein Maximum, die Schnelle jedoch ihr Minimum, da sich die Wand nicht bewegt. Es ergibt sich eine Phasenverschiebung von 90° .

Abbildung 4: aus Fasold 1987



2.1.5 Schallkennimpedanz

Der Quotient aus Schalldruck und Schallschnelle wird als *Schallkennimpedanz* bezeichnet. Die Schallkennimpedanz ist im Nahfeld, aus den geschilderten Zusammenhängen, eine komplexe Größe. In der ebenen Welle, dem Fernfeld, ist sie an jedem Raumpunkt konstant.

$$\frac{p}{v} = Z_0 \quad Z_0 = \text{Schallkennimpedanz der ebenen Welle (Ns/m}^3\text{)}$$

- I = Schallintensität im Abstand r von der Schallquelle (W/m^2)
 δ = Dichte (ρ) der Schallquelle (m)
 c = Schallgeschwindigkeit (m/s)
 $4\pi r^2$ gibt die Oberfläche einer Kugelschale an

Die Schallkennimpedanz errechnet sich aus dem Produkt von Raumdichte und Schallgeschwindigkeit

$$Z_0 = \delta \cdot c$$



Bei einem Luftdruck auf Meereshöhe und 20° Celsius hat die Schallkennimpedanz einen Wert von $Z_0 = 408 \text{ Ns/m}^3$

2.1.6 Schalleistung, Schallintensität

Um die Stärke einer Schallquelle unabhängig vom Abstand des Hörers und den räumlichen Gegebenheiten zu beschreiben, wofür man den Schalldruckpegel verwendet, werden die Größen *Schalleistung* und *Schallintensität* gebraucht. Die Schalleistung (P) wird in *Watt* (W) angegeben, die Schallintensität (I) in *Watt pro m²* (W/m^2). Die Schallintensität bezeichnet die Schalleistung, die durch eine senkrecht zur Ausbreitungsrichtung der Schallwelle stehende Flächeneinheit hindurchströmt. Die gesamte Schalleistung einer Schallquelle setzt sich zusammen aus der Summe aller Schallintensitäten, die an senkrecht zur Ausbreitungsrichtung stehenden Flächenelementen anliegen. Gemäß der Ausbreitungsrichtung einer Schallquelle im freien Schallfeld liegen diese Flächenelemente auf Kugelschalen im Abstand des Radius (r) von der Schallquelle.

Für die Schallintensität im Abstand r gilt also:

$$I = \frac{P}{4\pi r^2}$$



2.1.7 Schallgeschwindigkeit, Frequenz, Wellenlänge

Die *Schallgeschwindigkeit* (c) bezeichnet die Ausbreitungsgeschwindigkeit der Schallwelle in ihrem jeweiligen Medium. Die Ausbreitungsgeschwindigkeit der Schallwelle in Luft ist eine Konstante, die von atmosphärischen Bedingungen bestimmt wird. Bei 20° Celsius auf Meereshöhe beträgt sie 343,8 Meter pro Sekunde (m/s). Die Schallgeschwindigkeit in Festkörpern ist meist wesentlich höher. Sie liegt bei einigen tausend Metern pro Sekunde.

Breitet sich die Schallwelle mit einer bestimmten Fortpflanzungsgeschwindigkeit aus, ergibt sich zwischen zwei aufeinanderfolgenden Druckmaxima ein räumlicher Abstand. Diesen räumlichen Abstand bezeichnet man als *Wellenlänge* (λ). Der äquivalente zeitliche Zwischenraum wird als *Periodendauer* (T) bezeichnet und in Sekunden (s) angegeben. Die Anzahl der Periodendauern, die sich innerhalb einer Sekunde ereignen, wird als *Frequenz* (f) bezeichnet, die Einheit ist das *Hertz* (Hz).

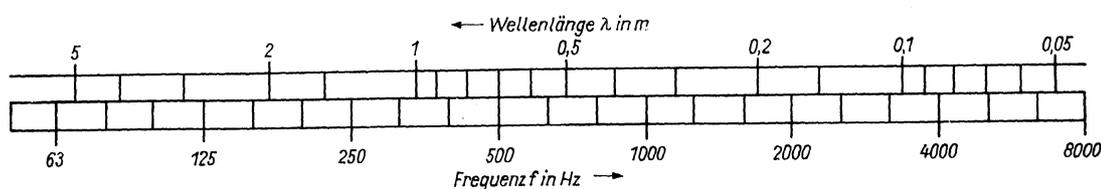
Für die →*Schallwahrnehmung* sind Wellenlängen im Bereich von ca. 20 m (16 Hz) bis ungefähr 1,5 cm (20 kHz) relevant.

Wellenlänge, Frequenz und Periodendauer stehen also in folgenden Zusammenhängen:

$$\lambda = c \cdot T \qquad f = \frac{1}{T} \qquad T = \frac{\lambda}{c}$$

Nachfolgend die Relation von Wellenlänge und Frequenz in grafischer Darstellung:

Abbildung 5: aus Fasold 1987



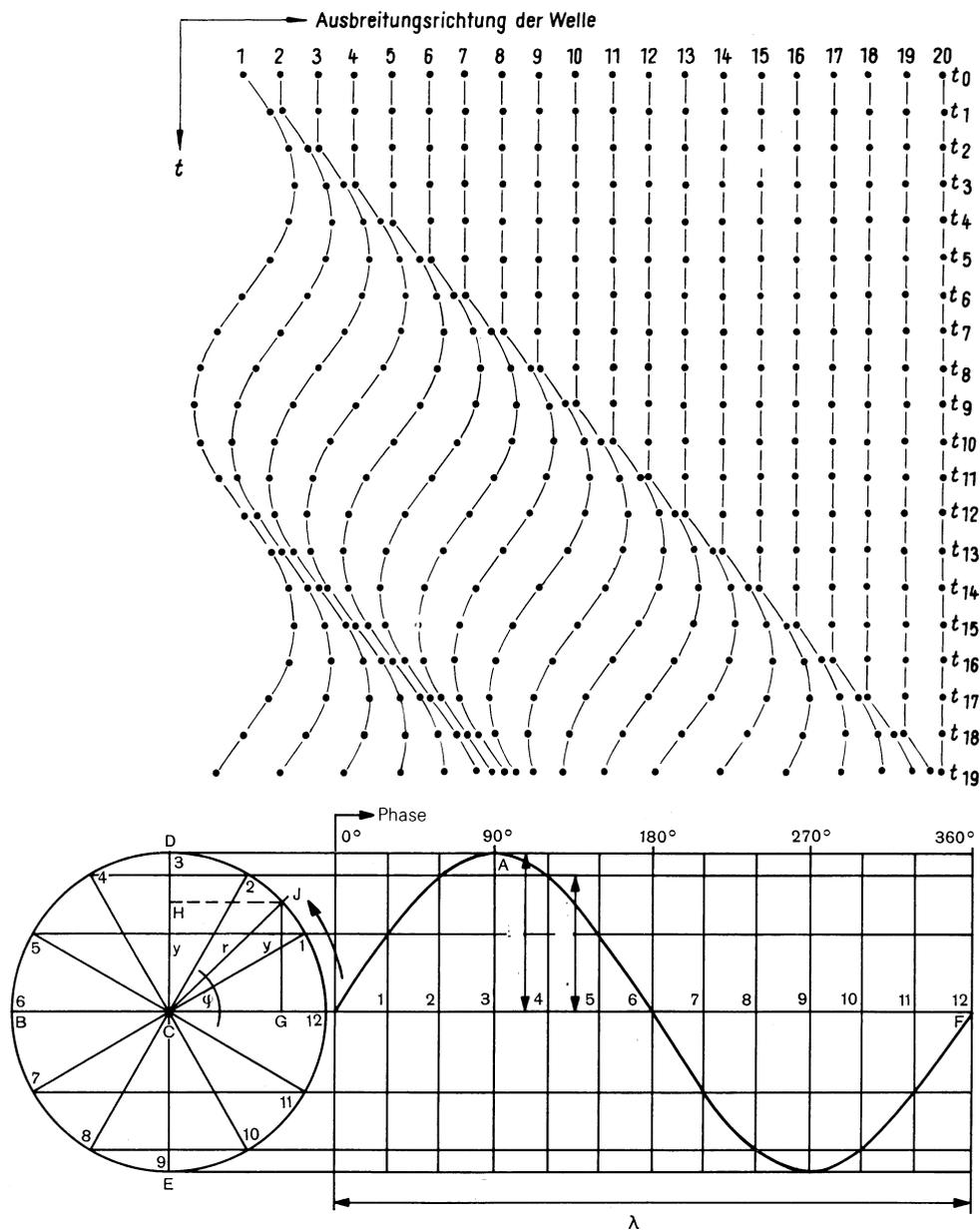
2.2 DARSTELLUNG VON SCHALLWELLEN ALS SCHWINGUNGEN

2.2.1 Die einfache Schwingung

In nachfolgender Abbildung ist das Fortschreiten einer Schallwelle dargestellt. Die schwingenden Teilchen werden durch Punkte bezeichnet. Die Horizontalrichtung bezeichnet die Ausbreitungsrichtung der Welle, die Vertikale zeigt den Zustand der angeregten Teilchen in verschiedenen Zeitabständen (t).

Für den Zeitpunkt $t=19$ ist die Schallwelle durch eine → *sinusförmige Schwingung* dargestellt. Auf der Horizontalen werden die räumlichen Positionen der Druckveränderungen im Medium dargestellt. Die vertikale Auslenkung der Schwingung gibt die Stärke der Druckveränderungen an.

Abbildung 6: aus Webers 1989 und Adam 1985



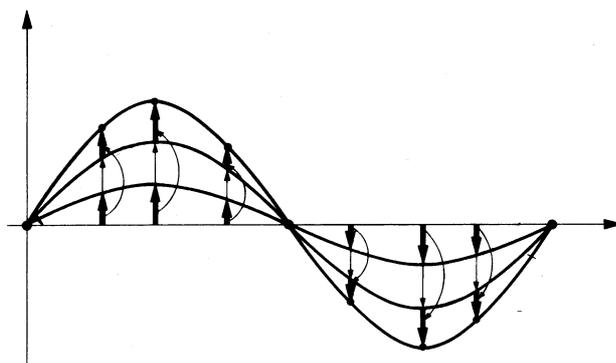
2.2.1.1 Geometrische Darstellung einer Schwingung und ihrer Größen

Die Lage eines Punktes auf einer Kreislinie wird durch den Radius des Kreises und den senkrechten Abstand von der Abszisse bestimmt. Diese Lage wird durch den Winkel φ in Grad angegeben. Der Sinus dieses Winkels ergibt sich durch das Verhältnis der Strecken G zu J . Der Kreis wird entsprechend der Umlaufgeschwindigkeit in zwölf Abschnitte unterteilt. Wenn man nun einen Punkt auf der Peripherie dieses Kreises in der Zeit wandern lässt, ergibt sich eine *sinusförmige Schwingung*. Die *Schwingungsdauer* T bezeichnet den zeitlichen Verlauf einer vollständigen Schwingung und entspricht der Periodendauer. Der größte Abstand von der Zeitachse bezeichnet die *Amplitude* einer Schwingung. Die Wellenlänge (λ) entspricht einer vollständigen Schwingung. Die *Elongation* bezeichnet den Abstand eines beliebigen Punktes von der Zeitachse. Die *Phase* (φ) bezeichnet den Momentanzustand eines Punktes in bezug auf den Nullpunkt der Zeitachse. Die Phasenlage wird in dieser Kreiseinteilung in Grad (0° bis 360°) angegeben.

2.2.2 Die zusammengesetzte Schwingung

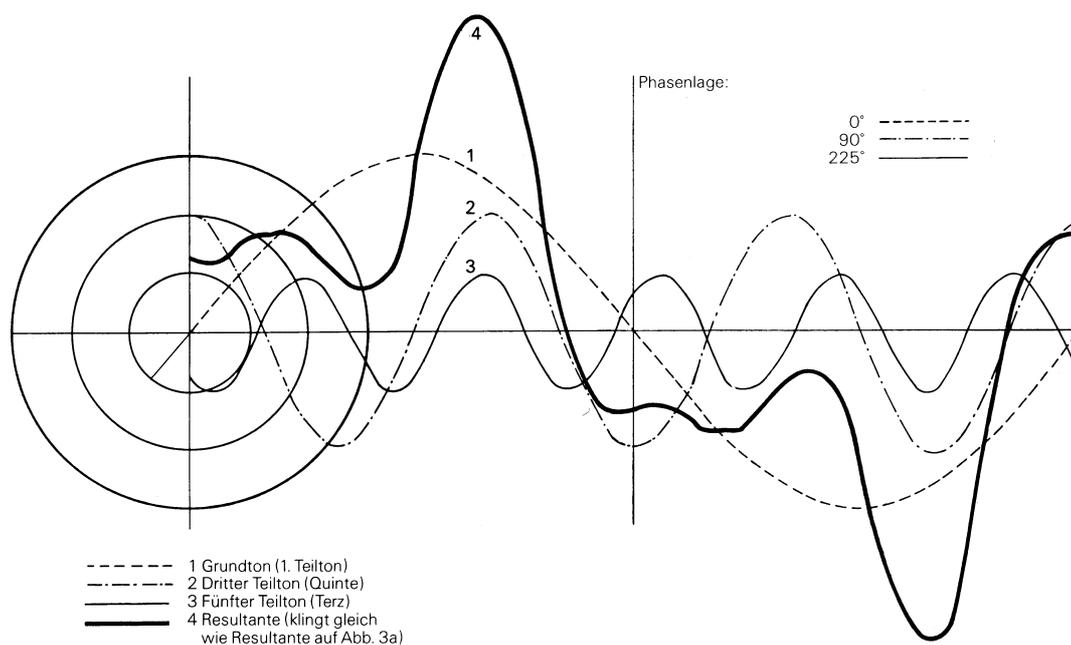
Für die Veranschaulichung der verschiedensten Erscheinungen, die durch Zusammensetzung mehrerer Schwingungen entstehen können, wird folgende einfache graphische Addition verwendet:

Abbildung 7: aus Borucki 1989



Es werden beide Teilschwingungen in einem Achsenkreuz aufgetragen, die Elongationen werden Punkt für Punkt addiert. Negative Elongationen müssen subtrahiert werden. Daraus resultiert eine Punkt für Punkt graphische Darstellung der zusammengesetzten Schwingung. Dieses Verfahren lässt sich auch für die Zusammensetzung komplizierterer Teilschwingungen verwenden. Als Beispiel zeigt folgende Abbildung die Zusammensetzung eines Klanges bestehend aus Teilschwingungen unterschiedlicher Phasenlage.

Abbildung 8: aus Adam 1985



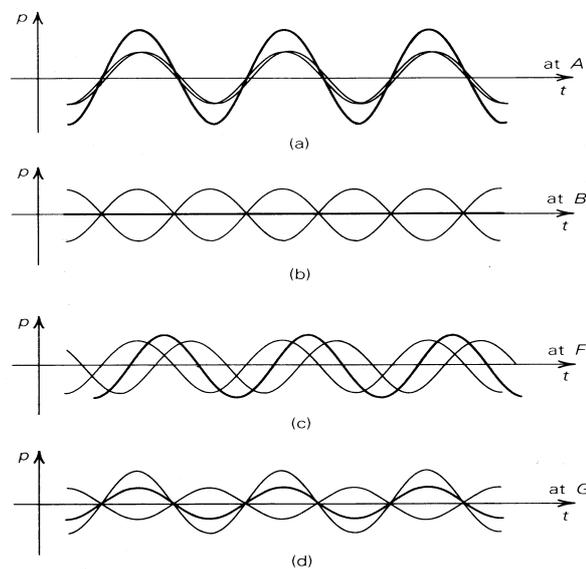
2.3 ÜBERLAGERUNG VON SCHALLWELLEN

Bei Überlagerung oder *Superposition* von Schallwellen führt jedes Teilchen eine Schwingung aus, die sich aus allen Teilschwingungen zusammensetzt, die auf das Teilchen einwirken. Überlagern sich Schwingungen ähnlicher Frequenz, so lassen sich einige akustisch interessante Erscheinungen beobachten.

2.3.1 Interferenz

Die Überlagerung von mehreren Teilschwingungen gleicher Frequenz wird *Interferenz* genannt. Je nach Phasenlage und Amplitude der Teilschwingungen kommt es zu Verstärkung oder Abschwächung der resultierenden Schwingung (starke Linie).

Abbildung 9: aus Hall 1991

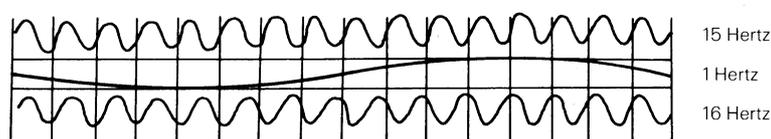


- Gleiche Phasenlage: Verstärkung der resultierenden Schwingung
- Entgegengesetzte Phasen: Auslöschung der resultierenden Schwingung
- Geringer Unterschied in der Phasenlage: Verstärkung der resultierenden Schwingung, wenn auch nicht in dem Maße wie bei Gleichphasigkeit
- Entgegengesetzte Phasenlage der Teilschwingungen, jedoch unterschiedliche Amplituden: Abschwächung der resultierenden Schwingung.

2.3.2 Schwebung

Zu einer *Schwebung* kommt es, wenn sich überlagernde Schwingungen in ihrer Frequenz geringfügig unterscheiden. Für den Verlauf einer Sekunde werden zwei Teilschwingungen mit der Frequenz von 15 Hz und 16 Hz dargestellt, die resultierende Schwebung besitzt eine Frequenz von 1 Hz. Die Schwebungsfrequenz entspricht somit der Differenz der beiden Grundschwingungen:

Abbildung 10: aus Adam 1985



2.3.3 Kombinationstöne

Steigt die Zahl der Schwebungen pro Sekunde weiter an, so tritt zunächst eine Rauigkeit des resultierenden Klanges auf, bei weiterer Erhöhung kommt es schließlich zur Wahrnehmung von sogenannten *Kombinationstönen*. Besonders deutlich wird der *Differenzton* wahrgenommen. Die Frequenz dieses Tones ergibt sich aus der Differenz von f_2 (höhere Frequenz) und f_1 (tiefere Frequenz). Weniger deutlich, doch ebenfalls hörbar werden weitere Kombinationstöne aus den Frequenzen:

$$2 \cdot (f_1 - f_2) \text{ sowie } 3 \cdot (f_1 - f_2)$$

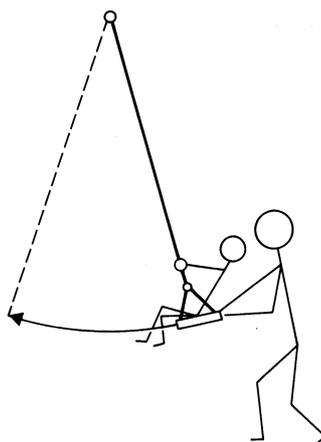
2.4 SCHALLSCHWINGUNGEN IM ZEITLICHEN VERLAUF

Werden einem schwingenden Körper dauernd neue Impulse zugeführt, so entsteht eine *erzwungene Schwingung*. Wird keine neue Energie zugeführt, so spricht man von einer *gedämpften Schwingung*, wie sie zum Beispiel beim Klavier und verschiedenen Schlaginstrumenten auftritt.

2.4.1 Resonanz

Ein besonderer Fall der erzwungenen Schwingung ist die *Resonanz*. Bei der Resonanz wird ein schwingungsfähiges System mit seiner Eigenschwingung erregt. Anhand Abbildung 11 läßt sich das Prinzip der Resonanz verdeutlichen. Die Schaukelbewegung des Kindes erfolgt mit einer bestimmten Frequenz, die sich durch die Länge des Seils bestimmt. Wenn der Schaukel zum richtigen Zeitpunkt ein schwacher Stoß versetzt wird, so steigt die Auslenkung der Bewegung stetig an, obwohl der Betrag der anregenden Energie klein ist im Verhältnis zur resultierenden Auslenkung der Schaukel.

Abbildung 11: aus Rossing 1983



Ein anderes Experiment läßt sich durch zwei Stimmgabeln derselben Eigenfrequenz realisieren, die in einigem Abstand einander gegenübergestellt werden. Wird die eine Stimmgabel angeschlagen, beginnt nach kurzer Zeit die zweite ebenfalls zu schwingen. Wird jedoch die Eigenfrequenz einer Stimmgabel zum Beispiel durch Befestigung eines kleinen Massestückes am Stimmgabelzinken verändert, so findet kaum noch ein Mitschwingen der zweiten Stimmgabel statt.

f_{res} = Resonanzfrequenz des Helmholtzresonators (112)

c = Schallgeschwindigkeit (m/s)

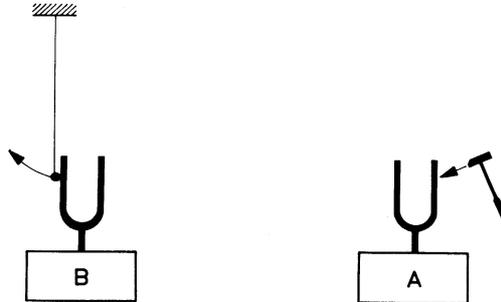
S = Fläche der Halsöffnung (m²)

l = Länge des Halses (m)

V = Volumen der Kugel (m³)

Resonanzverhalten zweier Stimmgabeln gleicher Eigenfrequenz:

Abbildung 12: aus Borucki 1989

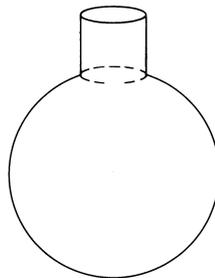


Resonanzerscheinungen können auch zum Einsturz von Bauwerken führen. Ein oft gebrauchtes Beispiel ist eine Kolonne, die im Gleichschritt über eine Brücke marschiert und diese dadurch in ihrer Eigenschwingung anregt.

2.4.1.1 Helmholtzresonator

Ein bekanntes Beispiel für einen Resonator ist der *Helmholtzresonator*. Der Arzt und Naturforscher Hermann v. Helmholtz (1821-1894) verwendete Kugelresonatoren aus Glas für die Analyse von Schallerscheinungen.

Abbildung 13: aus Rossing 1983



Erklingt ein Ton, dessen Frequenz mit der Eigenfrequenz des Resonators identisch ist, beginnt dieser aufgrund der Resonanz zu schwingen. Die Resonanzfrequenz des Helmholtzresonators ergibt sich aus folgendem Zusammenhang:

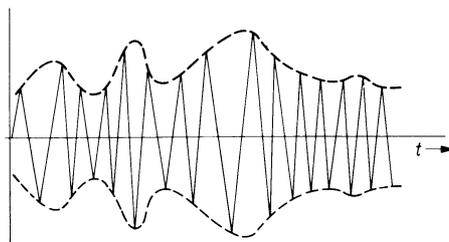
$$f_{res} = \frac{c}{2\pi} \cdot \sqrt{\frac{S}{V \cdot l}}$$



2.4.2 Darstellung des zeitlichen Verlaufs eines Schallereignisses

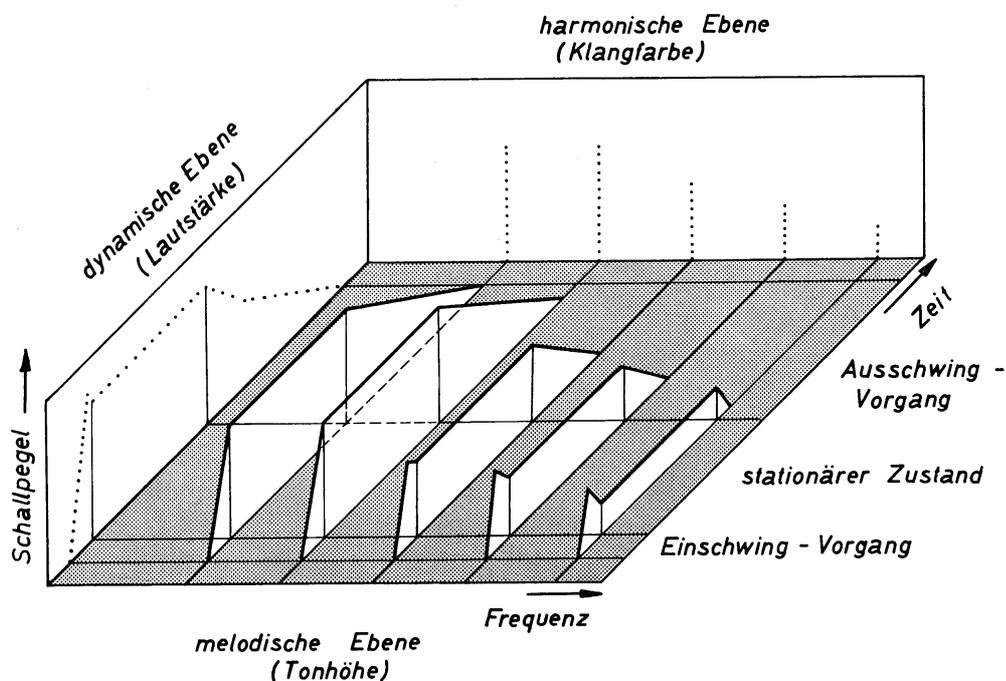
Der komplexe zeitliche Verlauf von Schwingungsvorgängen kann graphisch durch eine *Hüllkurve* wiedergegeben werden. Ihre Begrenzungslinien geben die zeitliche Änderung der Amplitude wieder.

Abbildung 14: aus Blauert 1974



Nachfolgend die Gesamtdarstellung eines Tones als ein sich zeitlich verändernder Schwingungsvorgang, charakterisiert durch die Anzahl und Stärke seiner Schwingungen im zeitlichen Verlauf:

Abbildung 15: aus Meyer 1972



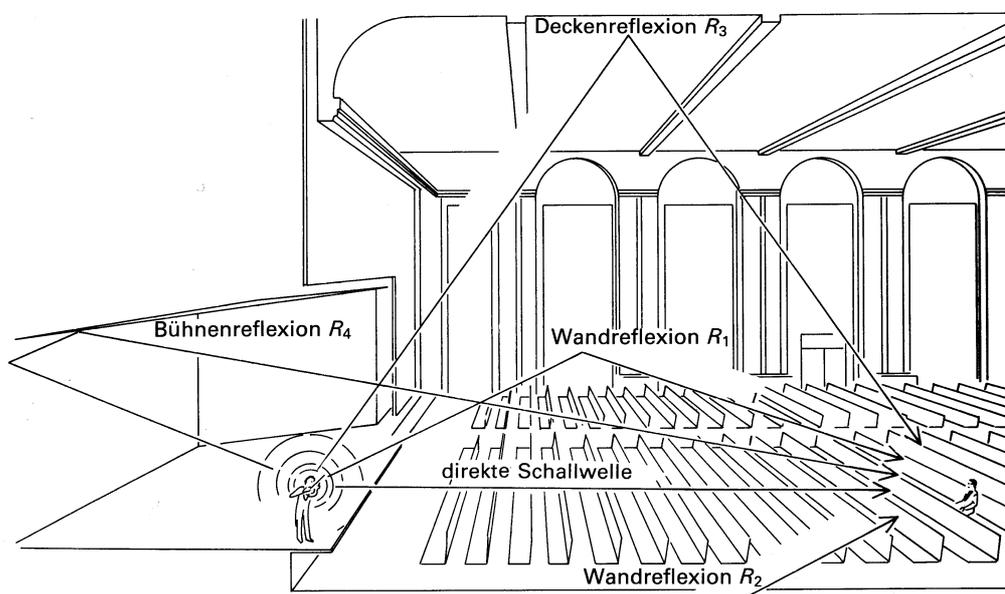
3 Raumakustik

Bei Ausbreitung von Schallwellen in einem geschlossenen Raum kommt es zu verschiedenen akustischen Erscheinungen. Die *geometrische Raumakustik* untersucht den zeitlichen und räumlichen Verlauf eines Schallstrahls. Die *statistische Raumakustik* untersucht das Verhalten der gesamten im Raum auftretenden Schalldichte.

3.1 REFLEXION VON SCHALLWELLEN

Bei Ausbreitung einer Schallwelle in einem Raum kommt es zu einer Reihe von Schallreflexionen, die durch Schallstrahlen dargestellt werden können.

Abbildung 16: aus Pierce 1985

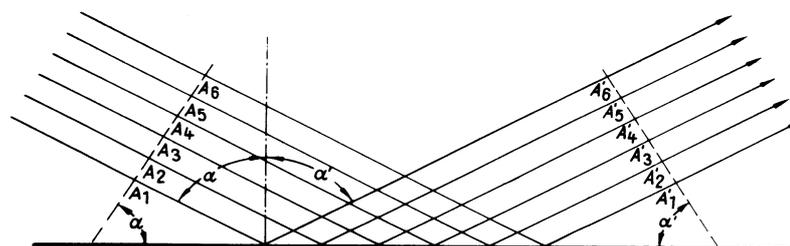


Das Verhalten eines Schallstrahles läßt sich analog der aus der Optik bekannten Gesetze der Reflexion darstellen. Für die Reflexion einer Schallwelle muß jedoch die reflektierende Fläche groß gegen die Wellenlänge der zu reflektierenden Schallwelle sein.

3.1.1 Reflexion an einer ebenen Fläche

Trifft eine Schallwelle auf eine ebene Grenzfläche auf, so ist bezüglich des Einfallslotes der Schallstrahlen der Einfallswinkel der Schallstrahlen gleich dem Reflexionswinkel, es gilt $\alpha = \alpha'$.

Abbildung 17: aus Webers 1989



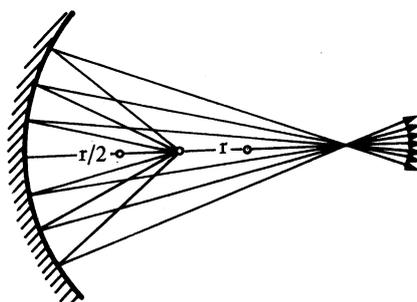
3.1.2 Reflexion an gekrümmten Flächen

3.1.2.1 Reflexion an konkaven Flächen

Treffen Schallwellen auf eine konkave, nach innen gewölbte Fläche, so werden je nach dem Verhältnis vom Abstand der Schallquelle zum Krümmungsradius der reflektierenden Fläche vier Fälle unterschieden:

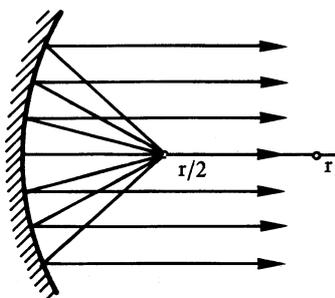
- a) Der Abstand der Schallquelle von der Reflexionsfläche ist kleiner als der *Krümmungsradius* (r), jedoch größer als der halbe Krümmungsradius: der reflektierte Schall bündelt sich in einem Punkt außerhalb des Krümmungsradius.

Abbildung 18: aus Dickreiter 1997



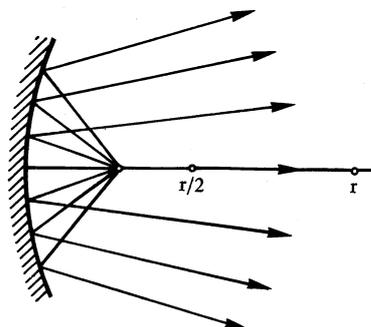
- b) Der Abstand der Schallquelle zur Reflexionsfläche ist gleich dem halben Krümmungsradius: die Schallstrahlen verlaufen nach der Reflexion in einer parallelen Richtung.

Abbildung 19: aus Dickreiter 1997



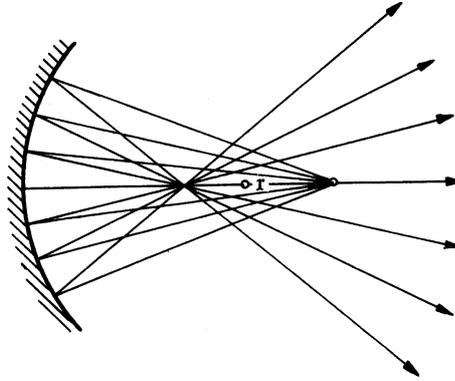
- c) Der Abstand der Schallquelle zur Reflexionsfläche ist kleiner als der halbe Krümmungsradius, dadurch kommt es zu einer Schallzerstreuung oder *Diffusion*.

Abbildung 20: aus Dickreiter 1997



- d) Der Abstand der Schallquelle zur Reflexionsfläche ist größer als der Krümmungsradius: Es kommt zu einer noch stärkeren Diffusion als im vorhergehenden Beispiel.

Abbildung 21: aus Dickreiter 1997



Für Reflexion von Schallstrahlen an Ellipse, Hyperbel und Parabel gelten durch die angenäherte Kreisform der Reflexionsfläche ähnliche Bedingungen. Für eine genaue Darstellung bedient man sich der Verfahren der analytischen Geometrie.

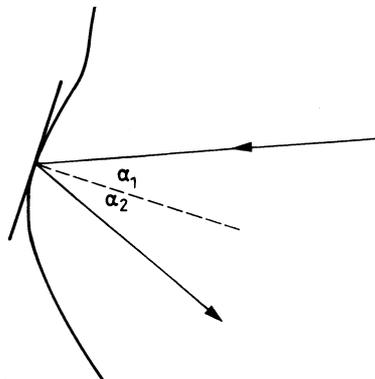
3.1.2.2 Reflexion an einer konvexen Fläche

Bei Reflexion von Schallstrahlen an einer konvexen, nach außen gewölbten Fläche. Da die Schallstrahlen nach der Reflexion in jedem Fall auseinanderstreben, entsteht Diffusion.

3.1.2.3 Reflexion an einer krummlinigen Fläche

Bei Reflexion von Schallstrahlen an krummlinigen Hindernissen lässt sich der Reflexionswinkel für jeden einzelnen Schallstrahl graphisch darstellen, indem man auf jedem Punkt der Reflexionsfläche eine Tangente errichtet. Die Tangente wird als ebene Reflexionsfläche betrachtet. Somit gilt wieder für jeden einzelnen Schallstrahl $\alpha_1 = \alpha_2$.

Abbildung 22: aus Borucki 1989



3.2 AKUSTISCH STÖRENDE REFLEXIONSERSCHEINUNGEN

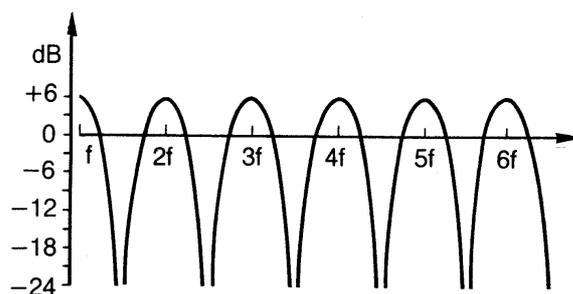
3.2.1 Kammfiltereffekt

Wird eine Schallwelle mit einer bestimmten Zeitversetzung und gleichem Pegel mit sich selbst überlagert, kann es als besondere Form einer Interferenzerscheinung zu einer sogenannten kammfilterartigen Färbung des Frequenzganges des resultierenden Klages kommen. Dieser Effekt kann sowohl bei einer Mikrofonaufnahme bei der Überlagerung eines Schallsignals mit der Bodenreflexion desselben Schallsignales entstehen, als auch bei der Verwendung von zwei Mikrofonen, die in einem bestimmten Abstand voneinander positioniert sind. Der räumliche Abstand der beiden Mikrofone bewirkt eine Phasenverschiebung der beiden Signale bei ihrer Überlagerung.

Beim Abstand einer Wellenlänge oder ihrer ganzzahlig Vielfachen kommt es zu einer gleichphasigen Überlagerung des resultierenden Signals und damit zu einer Verstärkung. Für Frequenzen, deren halbe Wellenlänge oder ungeradzahlig Vielfache davon gleich dem Abstand der Mikrofone ist, kommt es bei Überlagerung zu einer Auslöschung. Siehe auch: Interferenz.

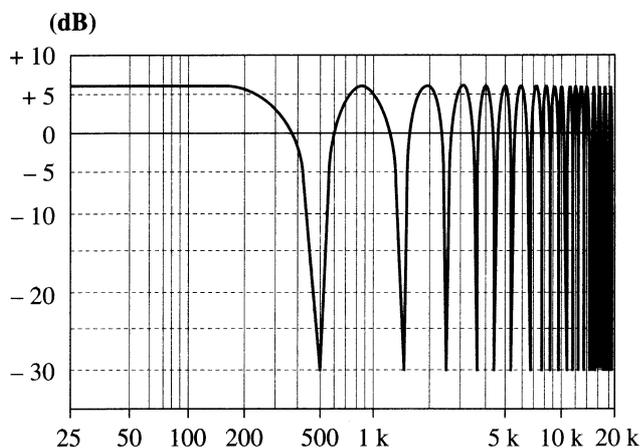
Schematische Darstellung einer Kammfilterkurve:

Abbildung 23: aus Dickreiter 1995



Frequenzdiagramm einer Kammfilterkurve für einen Mikrofonabstand von 34 cm entsprechend einer Verzögerung von 1 ms :

Abbildung 24: aus Hugonnet 1998



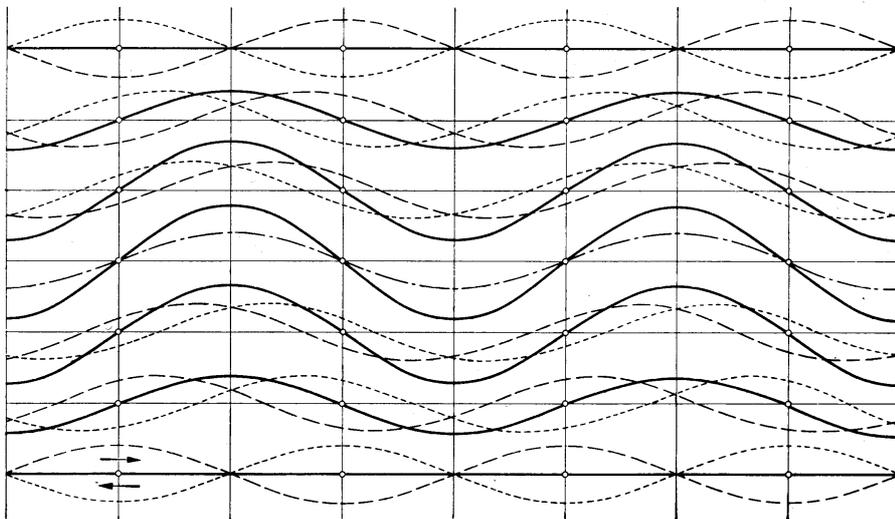
Störend auf das Klangbild wirken sich Kammfiltereffekte aus, die durch eine Zeitverzögerung im Bereich zwischen 1 ms und 15 ms entstehen. Im Diffusfeld kommt es zu einer ständigen Änderung der Phasendifferenzen, dadurch treten in diesem Bereich kaum Kammfiltereffekte auf.

3.2.2 Die stehende Welle

Bei Reflexionen von Schallwellen zwischen parallelen Wänden kann es durch Interferenzerscheinungen zur Ausbildung einer *stehenden Welle* kommen.

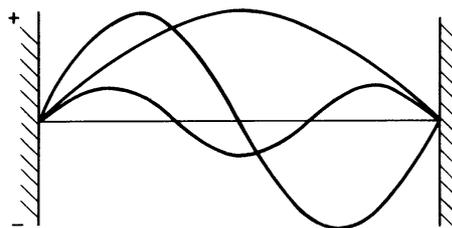
Verschiedene Stadien der Bildung einer stehenden Welle:

Abbildung 25: aus Trendelenburg 1961



Da es bei der stehenden Welle zu einer ortsfesten Ausbildung von *Schwingungsbäuchen*, Stadien erhöhten Pegels, sowie von *Schwingungsknoten*, Auslöschungen der Schallwelle kommt, kann zum Beispiel bei Aufnahmen diesem Effekt durch eine Positionsveränderung des Mikrofons abgeholfen werden. Ein weiterer unangenehmer raumakustischer Effekt in einer stehenden Welle ist die Verstärkung von bestimmten Baßtönen, deren Frequenz vom Abstand der reflektierenden Wände abhängt.

Abbildung 26: aus Borwick 1996

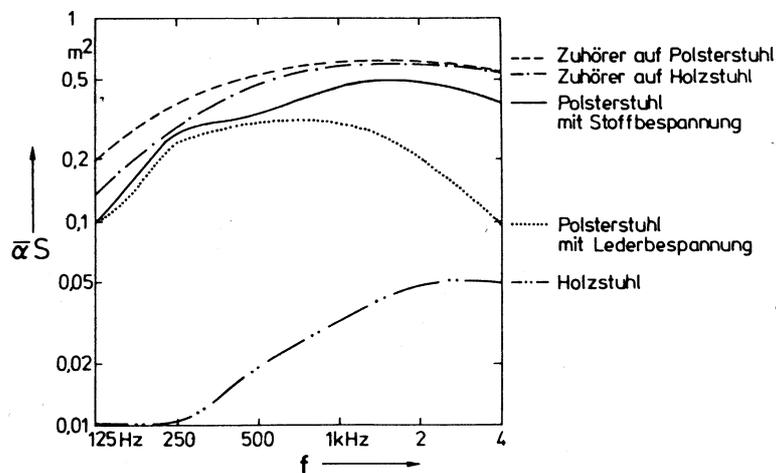


Gelegentlich findet man Absorptionsgrade von über 1, dies ist darauf zurückzuführen, daß die wirksame Fläche eines absorbierenden Materials größer ist als ihre rein geometrische Fläche.

3.3.2 Das Absorptionsvermögen

Das *Absorptionsvermögen* (A) gibt die Gesamtabsorption einer Wand oder eines Raumes an und ist das Produkt des Absorptionsgrades α und der absorbierenden Fläche (m^2). In Konzertsälen spielt aber nicht nur das Absorptionsvermögen der Raumflächen eine große Rolle. Einen nicht zu unterschätzender Einfluß ergibt sich durch die Anzahl der Zuhörer sowie die Art der Bestuhlung. Die Grafik zeigt das Absorptionsverhalten verschiedener Bestuhlungen bei verschiedenen Frequenzen:

Abbildung 29: aus Zwicker, Zollner 1993

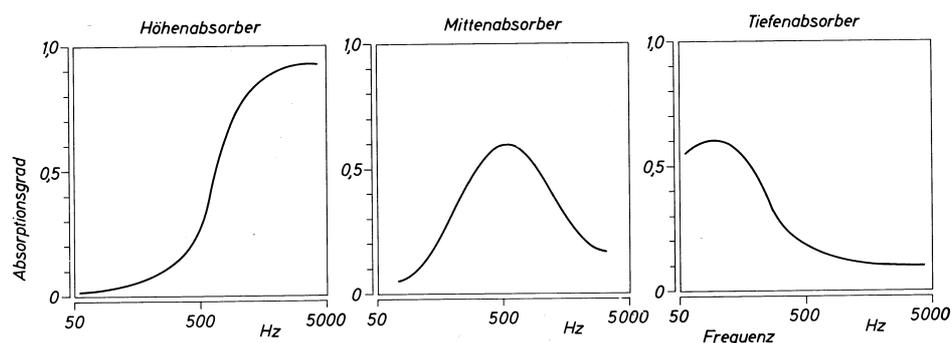


3.3.3 Absorber

Durch Anbringen von *Absorbern* auf den reflektierenden Flächen eines Raumes kann die Gesamtabsorption erhöht werden, um zu lange \rightarrow *Nachhallzeiten* zu verhindern. Je nach Materialeigenschaften und Konstruktion des Absorbers ergibt sich eine starke Frequenzabhängigkeit. Es wird zwischen *Höhen-*, *Mitten-* und *Tiefenabsorbern* unterschieden.

Frequenzbereiche von Absorbern:

Abbildung 30, aus Meyer 1972



3.3.3.1 Höhenabsorber

Höhenabsorber bestehen hauptsächlich aus Faserstoffen, wie Vorhänge, Teppiche etc. Die eindringende Luft führt Schwingungsbewegungen in den Poren des jeweiligen Materials aus, wodurch sich ein Verlust der Schallenergie durch die mittels Reibung erzeugte Wärmeenergie ergibt.

3.3.3.2 Mittenabsorber

Mittenabsorber bestehen zumeist aus Höhenabsorbieren, die jedoch durch bauliche Maßnahmen wie zum Beispiel vergrößerter Wandabstand, größere Schichtdicke etc. in einem mittleren Frequenzbereich wirksam werden. Es gibt aber auch Mittenabsorber, die aus gelochten oder geschlitzten Platten bestehen, die vor einem Hohlraum angebracht sind. Diese funktionieren nach dem Prinzip des \rightarrow Helmholtzresonators. Solche Absorber wirken in einem relativ schmalbandigen Frequenzbereich, bessere Ergebnisse erzielt man durch Auskleidung der Hohlräume.

3.3.3.3 Tiefenabsorber

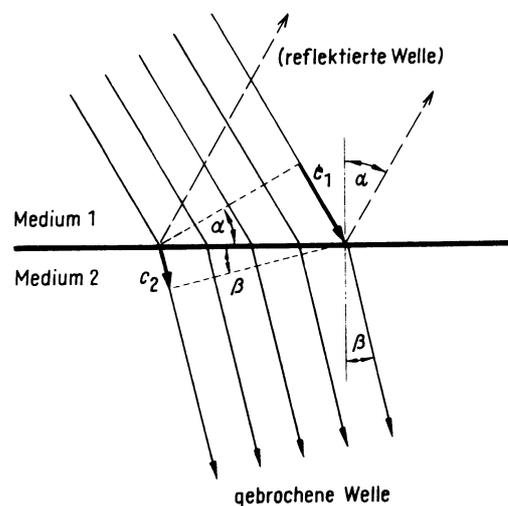
Tiefenabsorber werden zumeist aus Holzplatten angefertigt, die auf einem Rahmen luftdicht vor einer Wand montiert sind. Die auftreffende Schallwelle bringt die Platten zum Schwingen, durch Reibung und Dämpfung der bewegten Luft im eingeschlossenen Fasermaterial kommt es zu einem Entzug der Schallenergie.

3.4 BRECHUNG

Bei Reflexion einer Schallwelle kommt es auch zu einer *Brechung* des eindringenden Schallanteiles. Der *Brechungsindex* (n) ergibt sich aus dem Verhältnis der Schallgeschwindigkeiten des jeweiligen Mediums. Beim Brechungsindex wird angegeben, welches Material die geringere, welches die größere Schallgeschwindigkeit besitzt.

$$n = \frac{c^1}{c^2}$$

Abbildung 31: aus Webers 1989



3.5 BEUGUNG

Neben Reflexion, Absorption und Brechung von Schallwellen kommt es beim Auftreffen auf ein Hindernis auch zu *Beugungen*. Diese Erscheinungen sind raumakustisch relevant, da die Wellenlängen von Schallwellen für den menschlichen Hörbereich im Größenbereich natürlicher Hindernisse liegen.

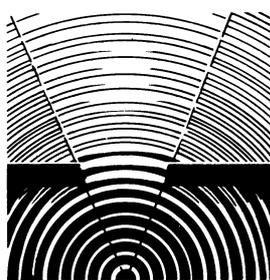
3.5.1 Huygensches Prinzip

Trifft eine Welle auf ein Hindernis mit einem Spalt in Größe der *Wellenlänge* λ , so entsteht eine sich kreisförmig ausbreitende *Elementarwelle*. Trifft eine Welle beliebiger Form auf ein Hindernis mit mehreren Öffnungen, ergibt sich durch Interferenzerscheinungen in einiger Entfernung vom Hindernis wiederum die ursprüngliche Wellenform. Bei sehr dicht stehenden Öffnungen sieht es so aus, als würde die Welle ungehindert durch das Hindernis hindurchströmen.

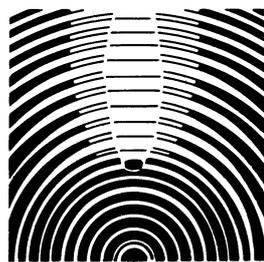
3.5.2 Beugung an einem Hindernis

Eine Beugung ist umso größer je größer die Wellenlänge im Vergleich zum Hindernis ist. Dadurch ergibt sich eine Frequenzabhängigkeit der Beugungserscheinung.

Abbildung 33: aus Webers 1989



Hindernis groß im Vergleich zur Wellenlänge



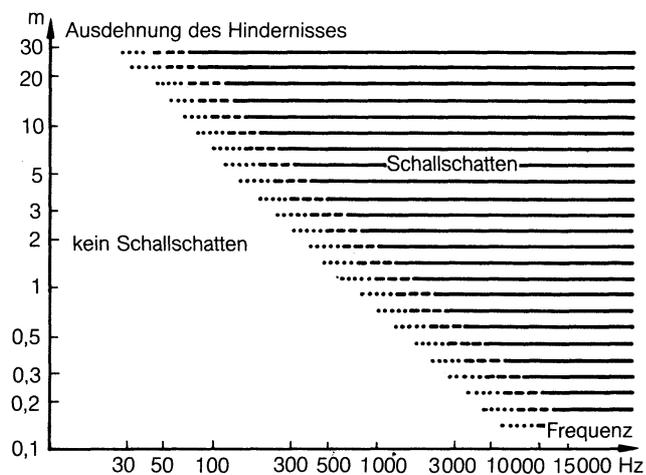
Hindernis ist gleich der Wellenlänge; es kommt zur Bildung einer Elementarwelle

3.5.2.1 Klangverfärbung durch Beugungserscheinungen

Trifft eine Schallwelle auf ein Hindernis, so ergibt sich je nach Frequenz der Schallwelle und Größe des Hindernisses eine Klangverfärbung, die zu einem dumpferen Klangbild führt. Große Wellenlängen werden um das Hindernis herumbeugt, höherfrequente Klanganteile abgeschattet.

Zusammenhang von Hindernisgröße, Schallschatten und Frequenz:

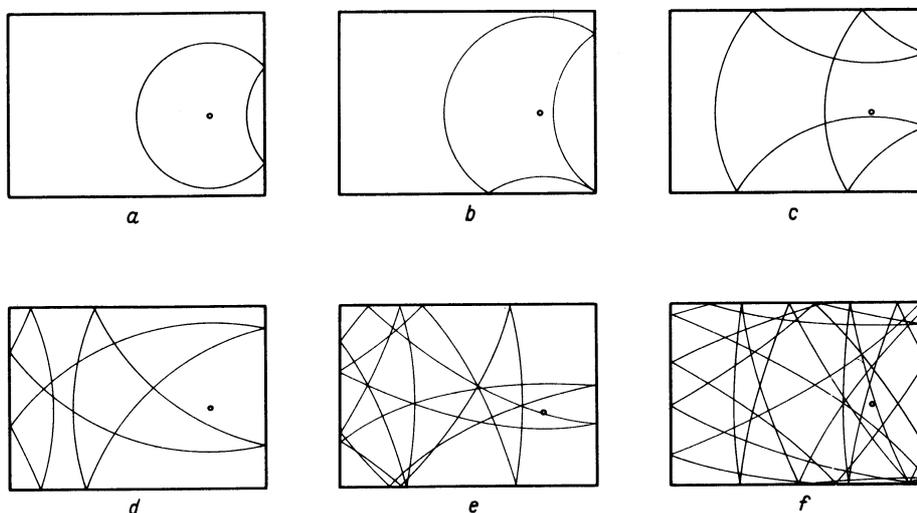
Abbildung 34: aus Dickreiter 1995



3.6 HALL

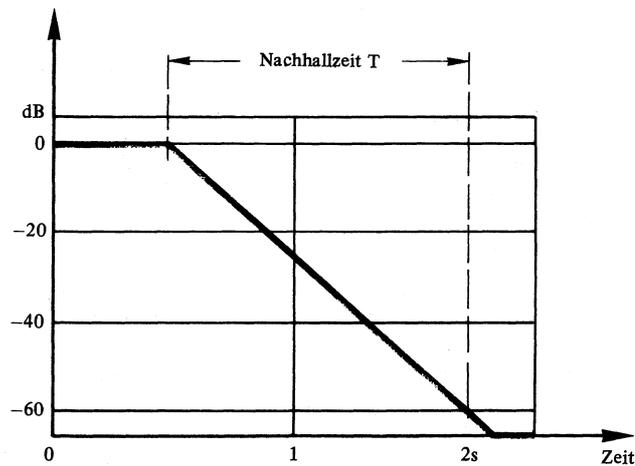
Bei Ausbreitung einer Wellenfront im Raum kommt es nach einiger Zeit zu immer mehr Reflexionen, die in einer völligen Durchmischung des Raumes mit Schallwellen resultieren. Diese Durchmischung wird auch als *Diffusität* bezeichnet.

Abbildung 35: aus Webers 1989



Der *Hall* bezeichnet den gesamten diffusen Schall in einem Raum. Bei plötzlichem Erklängen einer Schallquelle baut sich das Diffusfeld erst im Laufe einer bestimmten Zeit auf. Der *Nachhall* bezeichnet die Abnahme des diffusen Schallfeldes nach Abschalten der Schallquelle. Die *Nachhallzeit* ist derjenige Zeitabschnitt T (s), innerhalb dessen nach Abschalten der Schallquelle die Schallenergie auf den millionsten Teil abnimmt. Dieser Energieabfall ist mit einer Abnahme des Schalldrucks auf ein Tausendstel oder auch einer Verringerung des Schalldruckpegels um 60 dB gleichzusetzen.

Abbildung 36: aus Dickreiter 1997



Je nach akustischer Verwendung eines Raums werden Richtwerte für optimale Nachhallzeiten angenommen. (nach: Dickreiter 1997)

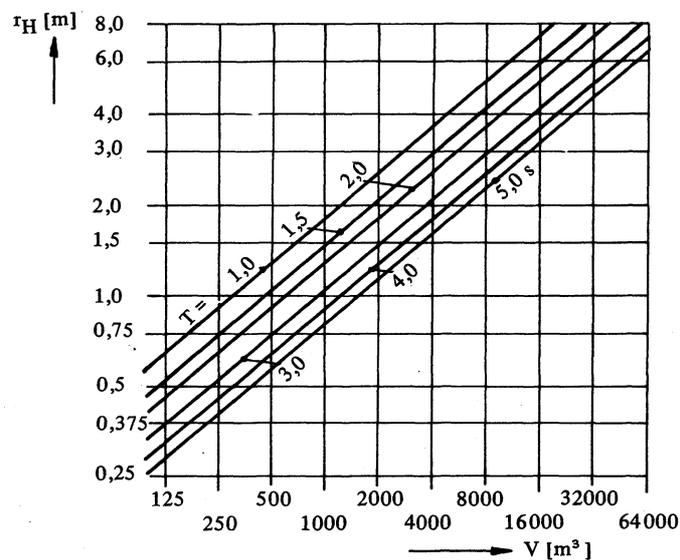
Raum	Nachhallzeit (s)
Sprecherstudio	0,3
Hörspielstudio	0,6
Theater	0,7 – 1,2
Opernhaus	1,5
Konzertsaal	2,0
Kirche	2,5 – 3,0

3.6.1 Hallradius

Der Hallradius bezeichnet denjenigen Abstand r_H von der Schallquelle, bei dem die Schalldruckpegel von direktem und diffusem Schall gleich groß sind.

Hallradius r_H (m) in Abhängigkeit vom Raumvolumen V (m^3) und dessen Nachhallzeit T (s):

Abbildung 37: aus Dickreiter 1997

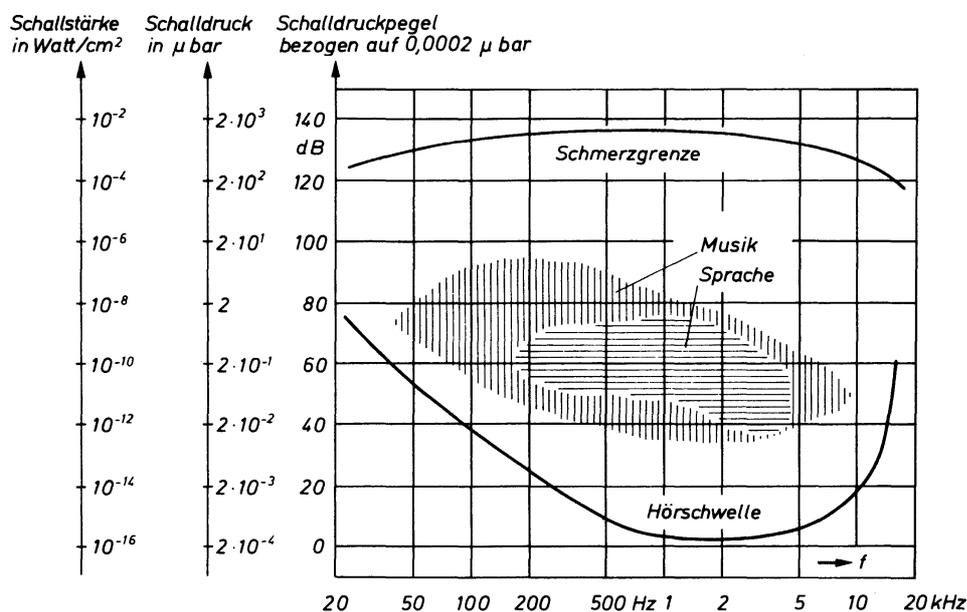


4 Schallwahrnehmung

4.1 DIE HÖRFLÄCHE

Das menschliche Ohr kann Schwingungen in einem Bereich von etwa 16 Hz bis etwa 20.000 Hz als Schall wahrnehmen. Die Schallempfindlichkeit ist in einem großen Maß von der Frequenz abhängig. Bei einer Frequenz von 1.000 Hz bis 2.000 Hz genügt ein Schalldruck von nur $0,0002\text{ }\mu\text{bar}$, um eine Schallempfindung auszulösen. Bei einer noch ausgeprägteren Schallempfindlichkeit würde die Eigenbewegung der Luftmoleküle, die *Brownsche Molekularbewegung*, bereits als störendes Rauschen in Erscheinung treten. Bei tiefen Frequenzen nimmt die Schallempfindlichkeit sehr stark ab, bei 20 Hz liegt sie in etwa nur mehr bei einem Wert von $1\text{ }\mu\text{bar}$. Nach oben hin kommt es ebenfalls zu einer starken Beeinträchtigung der Schallempfindlichkeit. Für die Erkennung einer Frequenz von 15.000 Hz ist ein Schalldruck von ungefähr $0,1\text{ }\mu\text{bar}$ notwendig. Wird die Abhängigkeit der Schallempfindlichkeit von der Frequenz in einem Diagramm dargestellt, so erhält man eine Kurve, die *Hörschwellenkurve* oder *Hörschwelle* genannt wird. Bei Steigerung des Schalldruckes stellt sich allmählich eine Schmerzempfindung ein, diese wird als *Schmerzschwelle* bezeichnet und ist ebenfalls von der Frequenz abhängig. Der Bereich zwischen Hör- und Schmerzschwelle wird als *Hörfläche* bezeichnet. Die für Musik und Sprache relevanten Schalldruckwerte nehmen nur einen kleinen Teil der Hörfläche ein.

Abbildung 38: aus Borucki 1989

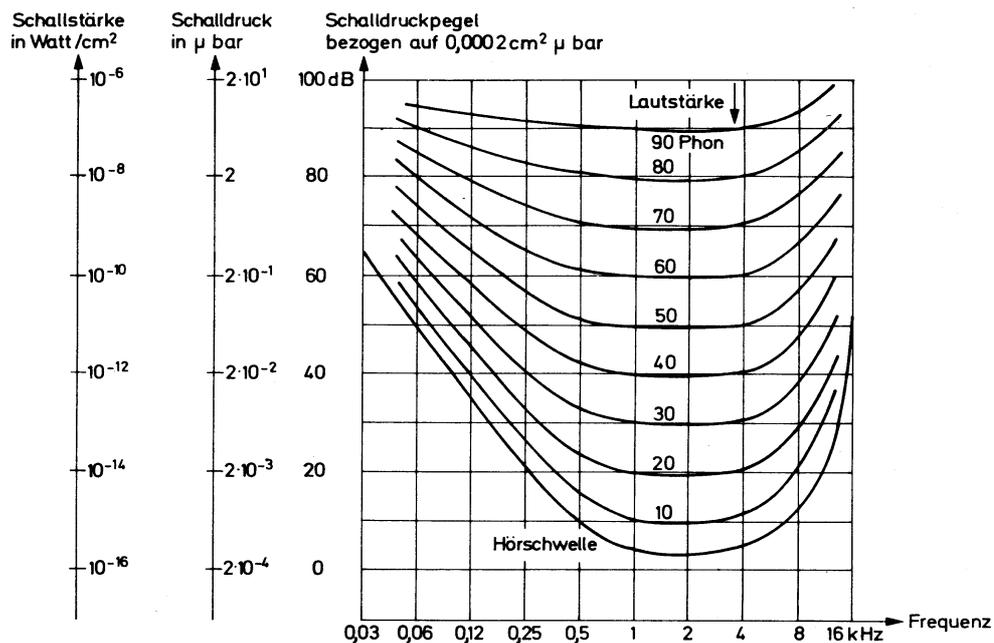


4.2 DIE LAUTSTÄRKE

Da die Hörschwelle eine frequenzabhängige Größe ist, reicht für die Angabe der *Lautstärke* eines Tones die reine Schalldruckangabe nicht aus. Ein Ton mit einer Frequenz von 1.000 Hz und einem Schalldruckpegel von 60 dB besitzt zum Beispiel eine verhältnismäßig hohe Lautstärke, während ein Ton einer Frequenz von 50 Hz bei gleichem Schalldruckpegel nur leise wahrgenommen wird. Aus diesem Grund wird zur Angabe der Lautstärke eine Skala benutzt, die sich auf den Schalldruckpegel eines 1.000 Hz -Tones bezieht. Es wird bei diesem Bezugston ein Verhältnis festgesetzt, das den Werten

0, 20, 40, 60 eines Schalldruckpegels (dB) die Werte 0, 20, 40, 60 eines Lautstärkepegels (Phon) zuordnet. Im Fall des Bezugstones von 1.000 Hz ist die Schalldruckskala gleich der Lautstärkekala. Zur Ermittlung der Lautstärke von Tönen anderer Frequenzen werden sie in Relation zu der des 1.000 Hz-Tones ermittelt. Ein Ton von zum Beispiel 200 Hz hat dann eine Lautstärke von 60 Phon, wenn er genauso laut erscheint wie ein 1.000 Hz-Ton mit einem Schalldruckpegel von 60 dB. Durch diese Vergleichsmessungen erhält man die in folgender Abbildung dargestellten Kurven gleicher Lautstärke:

Abbildung 38: aus Borucki 1989



Veranschaulichung der Phon-Skala anhand von einigen bekannten Geräuschen.
(nach: Borucki 1989)

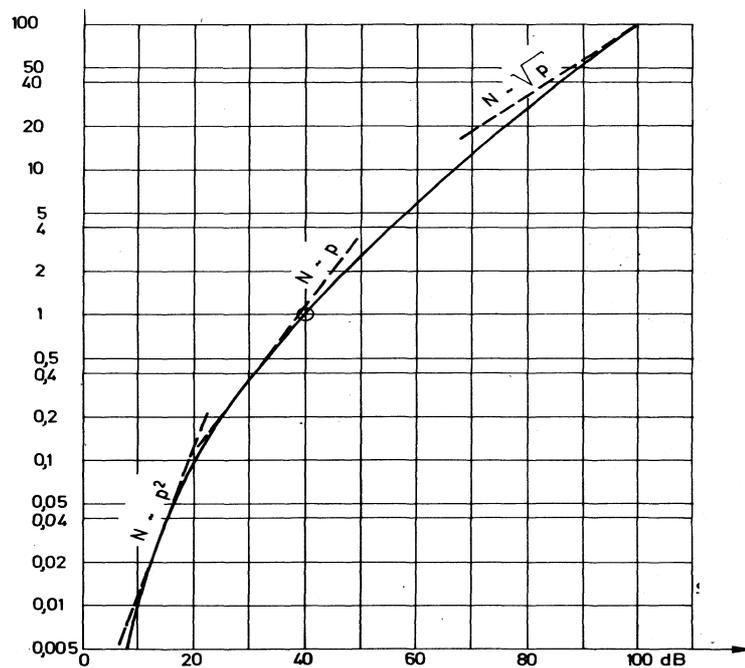
0 Phon	Hörschwelle
10 Phon	Blättersäuseln
20 Phon	Flüstern
30 Phon	Leise Unterhaltung
40 Phon	Gedämpfte Unterhaltung
50 Phon	Straßenlärm durchschnittlicher Lautstärke
60 Phon	Lautes Sprechen
70 Phon	Straßenlärm, laut
80 Phon	Schreien
90 Phon	Laute Hupe
100 Phon	Motorengeräusch
110 Phon	Schmiede
120 Phon	Flugzeug in geringem Abstand
130 Phon	Schmerzgrenze

4.3 DIE LAUTHEIT

Die *Lautheit* bezeichnet die subjektiv empfundene Lautstärke und wird in *sone* angegeben. Ein *1.000 Hz*-Ton mit *40 dB* wird der Lautheit von *1 sone* zugeordnet. Durch subjektive Beobachtung ermittelt man denjenigen Schalldruckpegel, der einer Verdoppelung der subjektiv empfundenen Lautstärke entspricht. Dieser Ton erhält den Wert von *2 Sone* und entspricht in etwa einer Erhöhung des Schalldruckpegels um *8 dB*. Die Grafik zeigt den Zusammenhang zwischen Schalldruckpegel und Lautheit für einen *1.000 Hz*-Ton. Die Lautheit wird in einem logarithmischen Maßstab aufgetragen. Durch die unterschiedlich starke Krümmung der Kurve in Abbildung 40 ist ersichtlich, daß Schalldruckpegel und Lautheit nicht im gleichen Verhältnis zu- bzw. abnehmen. Bis zu etwa *40 dB* entspricht die Lautheitsempfindung ungefähr dem Quadrat des Schalldrucks, zwischen *40 dB* und *80 dB* sind die beiden Werte annähernd direkt proportional, bei einer noch stärkeren Erhöhung des Schalldrucks ist die empfundene Lautheit ungefähr der Quadratwurzel des Schalldrucks proportional.

Verhältnis von Lautstärke und Schalldruckpegel

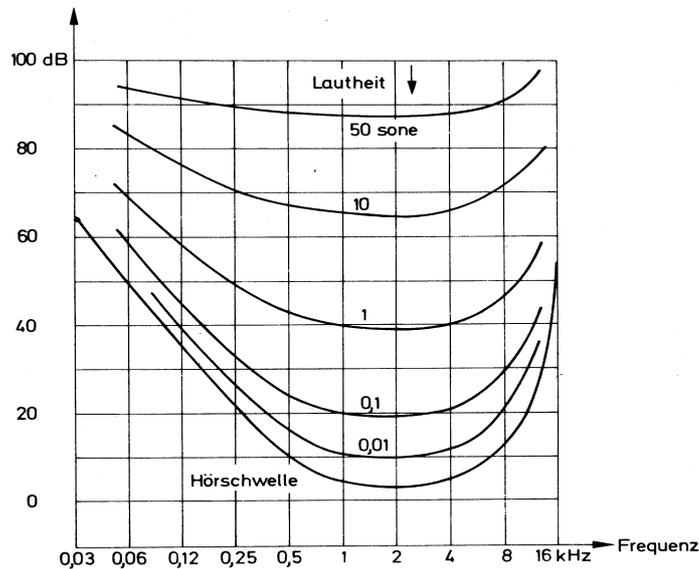
Abbildung 40: aus Borucki 1989



Die Lautheit von Tönen anderer Frequenz erhält man, indem man den Kurven gleicher Lautstärke die Lautheit des entsprechenden 1.000 Hz -Tones zuordnet.

Kurven gleicher Lautheit:

Abbildung 41: aus Borucki 1989



4.4 AUFLÖSUNGSFÄHIGKEIT DES MENSCHLICHEN GEHÖRS

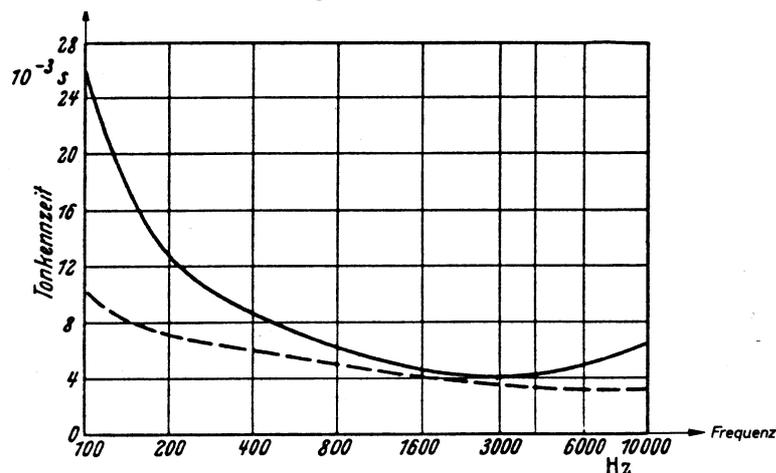
4.4.1 Physiologische Einschwingzeit des Ohres

Es werden zwei Töne mit einer fortlaufenden Verringerung des zeitlichen Abstandes hintereinander eingeschaltet, bis die beiden Töne als ein Ton wahrgenommen werden. Der Grenzwert, der kurz vor dem Verschmelzen der beiden Töne zu einem Hörereignis auftritt, wird als *physiologische Einschwingzeit* bezeichnet und liegt bei einer Frequenz von 50 bis 10.000 Hz bei ca. $0,25\text{ ms}$. (Nach dieser Zeit stimmt die erzwungene Schwingung der *Gehörknöchelkette* mit der erregenden Schwingung des Trommelfells überein.)

4.4.2 Tonkennzeit

Die *Tonkennzeit* gibt diejenige Zeit an, die das menschliche Ohr für die Erkennung der Höhe eines Tones benötigt. Die Tonkennzeit ist von der Frequenz des zu erkennenden Tones abhängig. Im Diagramm ist die Tonkennzeit in ms in Abhängigkeit von der Frequenz dargestellt:

Abbildung 42: aus Borucki 1989



Im günstigsten Fall kann die Tonhöhe eines 100 Hz Tones bereits nach 11 ms erkannt werden.

4.4.3 Tonhöhenunterscheidungsvermögen

Das *Tonhöhenunterscheidungsvermögen* bezieht sich auf die Fähigkeit des menschlichen Gehörs, geringe Frequenzveränderungen eines Tones wahrzunehmen. Im Optimalfall reicht bereits eine Frequenzveränderung um ca. ein Fünfhundertstel aus, um eine Tonhöhenveränderung wahrzunehmen. Für das Verhältnis von Frequenzänderung Δf zur ursprünglichen Frequenz f für einen 1.000 Hz -Ton gilt:

$$\frac{\Delta f}{f} = \frac{1}{500} = 0,002$$

In diesem Fall kann zum Beispiel bereits eine Tonhöhenveränderung von ungefähr 2 Hz registriert werden.

4.4.4 Unterscheidung von Dynamikveränderungen einer Schallquelle

Die Unterscheidung von Dynamikveränderungen ist von mehreren Faktoren abhängig. Je nach Frequenz, ursprünglicher Dynamik, sowie Geschwindigkeit der Schalldruckveränderung des Ausgangssignals lassen sich Dynamikveränderungen ab einem Wert von ca. $1,3\text{ dB}$ bis $3,6\text{ dB}$ wahrnehmen.

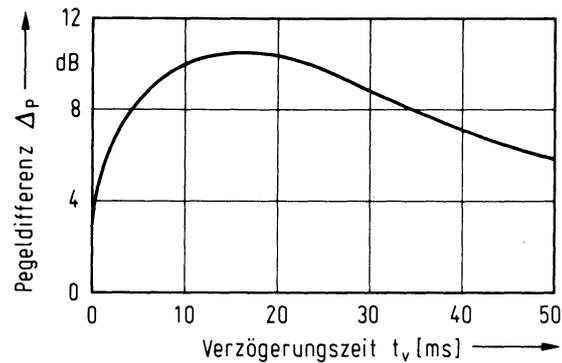
4.4.5 Verwischungsschwelle

Bei der Reflexion eines Tones in einem Raum kommt es zu einer zeitlichen Trennung zwischen direktem und reflektiertem Schall. Die Verzögerungszeit bei der gerade noch keine Trennung zwischen direktem und reflektiertem Schall wahrgenommen wird, nennt man *Verwischungsschwelle*. Sie schwankt je nach Nachhallzeit sowie Intensitätsverhältnis des reflektierten zum direkten Schall und der Klangfarbe des reflektierten Schalles in einem Bereich zwischen 50 ms und 100 ms . Eine größere Zeitverzögerung wird als Echo wahrgenommen.

4.4.6 Der Precedence-Effekt

Der *Precedence-Effekt* (auch *Haas-Effekt* oder *Gesetz der ersten Wellenfront* genannt) bezeichnet die Auflösungsfähigkeit des menschlichen Gehörs in bezug auf eine örtliche Bestimmung einer Schallquelle, wenn die gleiche Schallquelle zeitlich versetzt an einem anderen Ort erklingt. Die räumliche und zeitliche Verzögerung kann durch Reflexion oder \rightarrow *elektroakustische Wiedergabe* einer Schallquelle geschehen. Bei Verzögerungszeiten von 10 ms bis 30 ms wird der zuerst einfallende Schall für die örtliche Bestimmung der Schallquelle benutzt. Der Pegel des Sekundärsignals kann bei dieser Verzögerungszeit bis zu 10 dB über dem des Primärsignals liegen, ohne daß es zu einer räumlichen Fehlortung kommt. Ab einem Wert von ungefähr 50 ms empfindet man das Primärsignal gegenüber dem verzögerten Signal bereits als räumlich getrennt oder zeitlich verzögert. Das Diagramm in Abbildung 43 zeigt die zulässigen Pegeldifferenzen Δ_p zwischen Primär- und Sekundärsignal bei subjektiver Lautstärkegleichheit in Abhängigkeit der Verzögerungszeit t_v .

Abbildung 43: aus Webers 1989

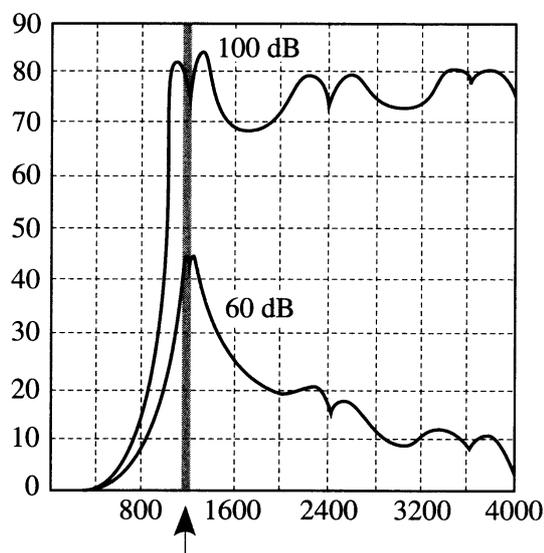


4.4.7 Verdeckungseffekt

Die Hörschwelle und die Kurven gleicher Lautstärke gelten nur für Sinustöne, die als Einzelereignisse wahrgenommen werden. Wenn hingegen zwei Töne gleichzeitig erklingen, so kann aufgrund der Lautstärke des einen Tones, der andere nur mehr schwer oder gar nicht wahrgenommen werden, obwohl der Schallpegel des überlagerten Tones über der Hörschwelle liegt. Man spricht in diesem Fall von einem *Verdeckungs-* oder *Maskierungseffekt*.

Als Beispiel für den Verdeckungseffekt siehe Abbildung 44. In diesem Diagramm ist ein Störton mit einer Frequenz von 1.200 Hz für eine Dynamik von 60 dB und 100 dB dargestellt. Die beiden Kurven geben den Dynamikverlauf und die Frequenz der Testtöne wieder. Die Kurven zeigen diejenige Dynamikzunahme der Testtöne, die notwendig ist, um trotz des gleichzeitig vorhandenen Störtones wahrgenommen werden zu können. Diese Kurven werden als *Mithörschwellen* bezeichnet. Daß es zu Unregelmäßigkeiten der Kurven bei ganzzahligen Vielfachen Frequenzen der Störtonfrequenz kommt, hat den Grund, daß bei eng benachbarten Frequenzen Schwebungen oder Differenztöne zwischen Stör- und Testton auftreten, die eine genaue Messung beeinträchtigen.

Abbildung 44: aus Hugonnet 1998



4.4.8 Der Cocktailparty-Effekt

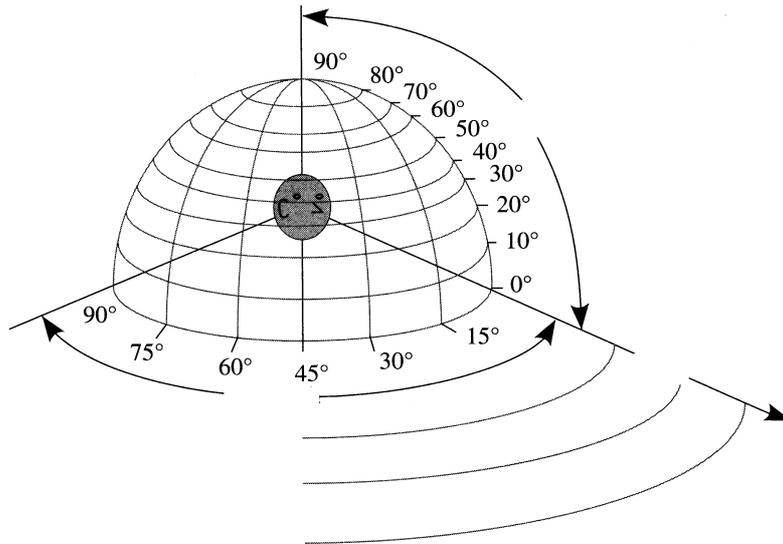
Eine besondere selektive Fähigkeit des menschlichen Gehörs kann anhand der Situation einer Cocktail-Party erklärt werden. Der Gast wird permanent mit einer Fülle von Geräuschinformationen konfrontiert, sobald er sich aber für eine bestimmte Schallquelle interessiert (zum Beispiel die Stimme einer bekannten Person), setzt ein Selektionsprozeß der Hörwahrnehmung ein. Aufgrund der Struktur der gewählten Schallquelle wird diese stärker wahrgenommen als die anderen Geräuschinformationen, obwohl es rein physikalisch zu keiner Pegeländerung gekommen ist. Man könnte diesen Effekt als „konzentrationsabhängige Keulencharakteristik“ des menschlichen Gehörs bezeichnen. Dieser Effekt kann den oben behandelten Verdeckungseffekt zum Teil kompensieren und zeigt die komplexen Zusammenhänge menschlicher Gehörwahrnehmung. Dieser Selektionsvorgang verlangt außerdem die konkrete räumliche Hörsituation und läßt sich bei elektroakustischer Wiedergabe interessanterweise kaum mehr reproduzieren. Zur Erklärung des *Cocktailparty-Effektes* wird auch das → *Assoziationsmodell von Theile* verwendet.

5 Räumliches Hören

5.1 RÄUMLICHES HÖREN BEI EINER NATÜRLICHEN SCHALLQUELLE

Das menschliche Gehör ist in der Lage, ein Schallereignis aus den verschiedensten Richtungen zu lokalisieren. Eine gerichtete Schallwahrnehmung setzt sich aus einer horizontalen, vertikalen und tiefenräumlichen Ortung zusammen. Für die räumliche Darstellung der Schalleinfallrichtungen wird ein kopfbezogenes Koordinatensystem verwendet.

Abbildung 45: aus Hugonnet 1998

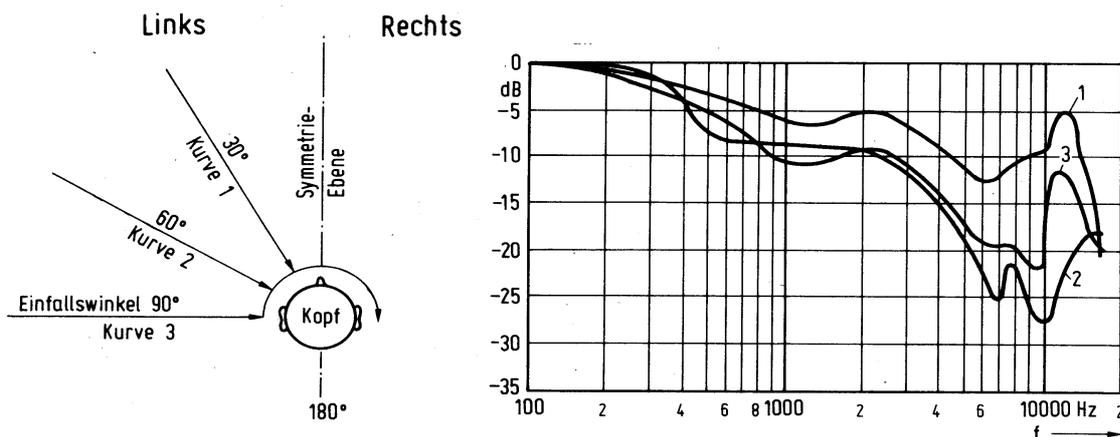


5.1.1 Räumliches Hören in der Horizontalebene

5.1.1.1 Lokalisierung durch Intensitätsunterschiede

Durch Stauung und Abschattung der von einer bestimmten Richtung kommenden Schallereignisse entsteht an den Ohren ein Intensitätsunterschied der Schallwahrnehmung. Dieser wird unter anderem für eine Richtungsinterpretation verwendet. Bedingt durch die menschliche Kopfform entsteht eine Abschattungswirkung für höherfrequente Schallanteile ungefähr ab einer Frequenz von ungefähr 300 Hz . Untersucht man nun die Intensität des an einem Ohr auftreffenden Schallanteils in Abhängigkeit von Frequenz und Einfallswinkel, ergibt sich folgendes Verhältnis:

Abbildung 46: aus Jecklin 1980



5.1.1.1.1 Einfluß von Klangfarbenunterschieden auf die Richtungsinterpretation

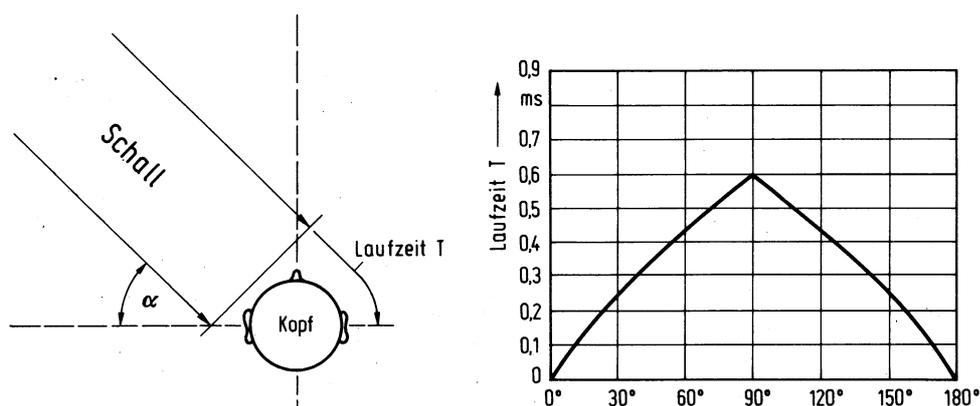
Durch die starke Frequenzabhängigkeit der Intensitätsunterschiede lassen sich bei bekannten Klängen Richtungsinformationen auch schon aufgrund der unterschiedlichen Klangfarbe feststellen. Außerdem kann es durch die Art der wahrgenommenen Schallereignisse auch zu Lokalisationsunschärfen kommen. Nachfolgend sind einige Signale aufgelistet, sowie die bei ihnen versuchsweise festgestellten Lokalisationsunschärfen in bezug auf die Horizontalebene. (Nach: Blauert 1974)

Signalart	Lokalisationsunschärfe in Grad
Klicks	0,75° - 2°
Klickfolge	1,6°
Dauertöne	4,4°
Schmalbandiges Rauschen	1,4° - 2,8°
Sprache	0,9° - 1,5°
Tonimpulse unterschiedlicher Flankensteilheit und Frequenz	1,8° - 11,8°
Breitbandiges Rauschen	3,2°

5.1.1.2 Lokalisierung durch Laufzeitdifferenzen

Da ein Schallereignis nicht gleichzeitig bei beiden Ohren eintrifft, kommt es zu Laufzeitunterschieden. Die Größe des Laufzeitunterschiedes wird ebenfalls zur räumlichen Lokalisierung in der Horizontalebene verwendet. Die Abbildung zeigt die unterschiedlichen Laufzeitdifferenzen, die durch den Einfall eines Schallereignisses aus verschiedenen Richtungen entstehen:

Abbildung 47: aus Jecklin 1980



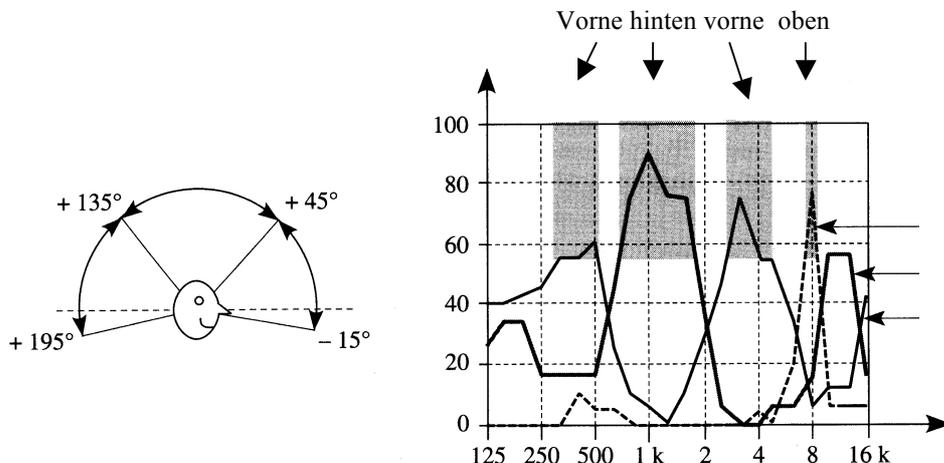
5.1.2 Räumliches Hören in der Vertikalebene

Die Intensitätsunterschiede in der Vertikalebene ergeben sich nur durch eine Reihe von asymmetrischen Ausprägungen des menschlichen Körpers und im speziellen durch die Gestalt der Ohrmuscheln. Versuche haben jedoch einen starken Einfluß des Frequenzverlaufes der zu lokalisierenden Schallquelle gezeigt. Signale im Bereich von 8 kHz scheinen von oben zu kommen, Signale in einem Bereich von 1 kHz werden als von

hinten kommend gedeutet, Signale um 3 kHz, sowie sehr tiefe Frequenzen nimmt man von vorne wahr.

Oben
Hinten
Vorne

Abbildung 48: aus Hugonnet 1998

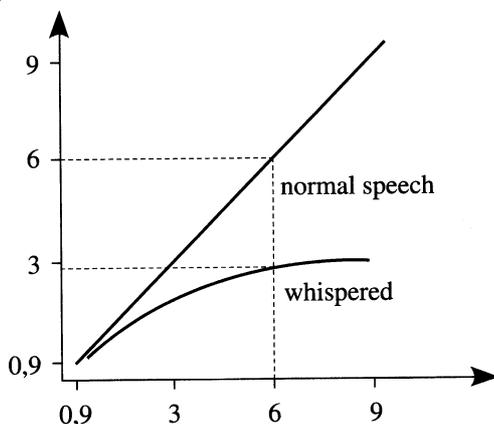


5.1.3 Tiefenräumliche Schallwahrnehmung

Die Abschätzung der Entfernung einer Schallquelle wird entweder durch Intensitätsunterschiede, das Verhältnis von Direkt- und Diffusschallanteil oder durch spezielle klangliche Eigenschaften des Schalls ermöglicht. Bei Fortbewegung einer Schallquelle nimmt ihre Intensität bei jeder Verdoppelung der Entfernung um jeweils 6 dB ab. Dies ermöglicht eine tiefenräumliche Einschätzung von sich bewegenden Schallquellen, wobei aber die Genauigkeit der Entfernungswahrnehmung sehr von der Bekanntheit des wahrgenommenen Klanges abhängt. Bei Bewegung einer Schallquelle in einem Raum kommt es zu einer Veränderung des Direkt- und Diffusschallanteils, die eine Entfernungsbestimmung ermöglicht. Experimente im freien Schallfeld haben gezeigt, daß Schallereignisse mit einer Frequenz unter 2 kHz weiter entfernt scheinen als solche mit höherer Frequenz. Dies läßt sich auch anhand der Entfernungseinschätzung von geflüsterter oder normal gesprochener Sprache demonstrieren. Die Grafik zeigt tatsächliche und geschätzte Entfernung von normaler und geflüsterter Sprache im freien Schallfeld:

Abbildung 49: aus Hugonnet 1998

Geschätzte Entfernung (m)



Tatsächliche Entfernung (m)

5.2 RÄUMLICHES HÖREN BEI ELEKTROAKUSTISCHER WIEDERGABE

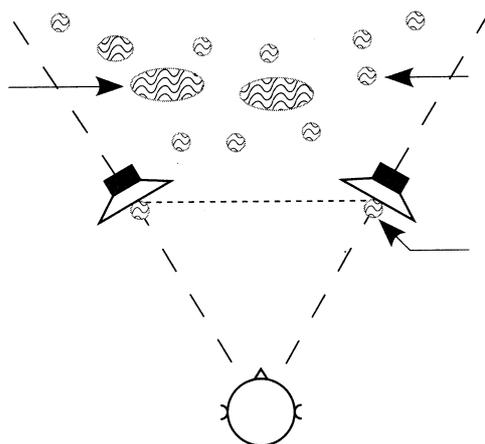
Bei stereophoner Wiedergabe über Kopfhörer oder Lautsprecher werden Richtungsinformationen ebenfalls aus Intensitäts- und Laufzeitunterschieden gebildet.

5.2.1 Lautsprecherwiedergabe

Beim räumlichen Hören bei Lautsprecherwiedergabe kommt es im Bereich zwischen den beiden Lautsprechern zu einer Bildung von sogenannten *Phantomschallquellen*. Bei unterschiedlichen Laufzeit- und/oder Intensitätsinformationen verändern die Phantomschallquellen ihre räumliche Position, bis sie an einem der beiden Lautsprecher anliegen. Üblicherweise bilden die beiden Lautsprecher im Verhältnis zum Zuhörer einen Winkel von 60° . Das Gebiet, in dem sich der Zuhörer seitlich der Mittelachse zu den Lautsprechern bewegen kann, wird *Stereo-Hörfläche* genannt. Innerhalb dieses Bereiches ist eine gute Ortung der Phantomschallquellen möglich.

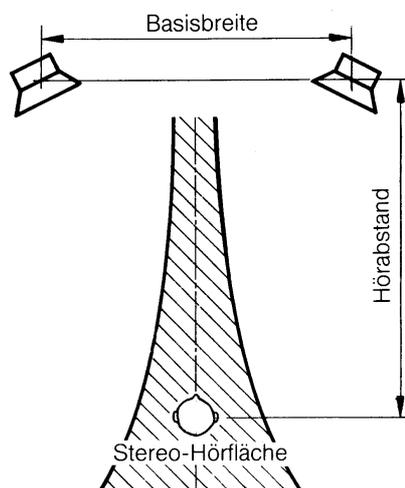
Phantomschallquellen:

Abbildung 50: aus Hugonnet 1998



Stereo-Hörfläche:

Abbildung 51: aus Dickreiter 1995

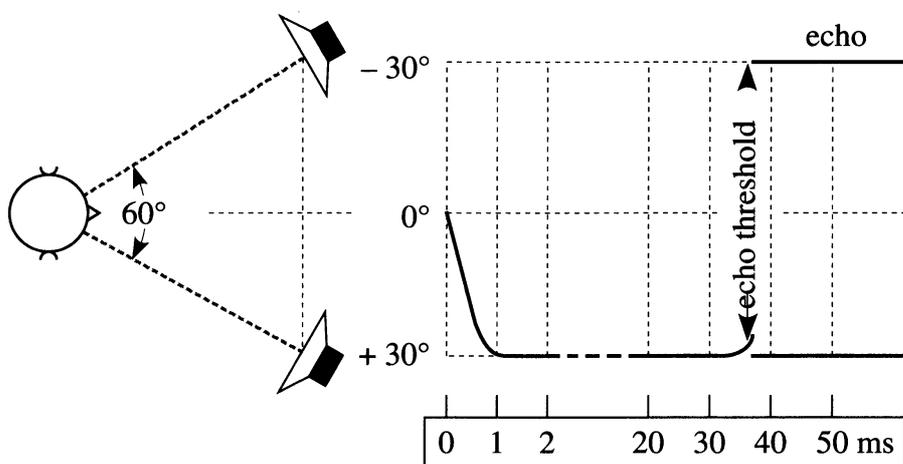


5.2.1.1 Lokalisation durch Laufzeitunterschiede

Bei Lokalisation der Phantomschallquellen durch Laufzeitunterschiede sind bei Lautsprecherwiedergabe Laufzeitdifferenzen bis zu $1,4\text{ ms}$ maßgeblich. Ab einer Laufzeitdifferenz von $0,8\text{ ms}$ nimmt man das Schallereignis bereits auf einer Seite der Stereobasis wahr. Laufzeitdifferenzen bis zu etwa 30 ms verändern die Schallquelle nicht mehr in ihrer scheinbaren Position, zwischen 30 ms und 40 ms wird die Phantomschallquelle immer noch auf einer Seite der Stereobasis lokalisiert, jedoch beginnt man, klangfarbliche Veränderungen und eine Streuwirkung in Richtung der anderen Seite wahrzunehmen. Bei höheren zeitlichen Unterschieden stellt sich die Empfindung eines Echos ein.

Abhängigkeit der Lokalisierung eines Schallereignisses von verschiedenen Laufzeitverzögerungen:

Abbildung 52: aus Hugonnet 1998



5.2.1.2 Lokalisation durch Intensitätsunterschiede

Bei der Lokalisation einer Schallquelle durch Intensitätsunterschiede wird die Phantomschallquelle ab einem Intensitätsunterschied von 15 dB bis 17 dB einer Seite der Stereobasis zugeordnet. Laufzeit und Intensitätsunterschiede können sich in gewissem Maße indirekt kompensieren. Meist werden jedoch Intensitäts- und Laufzeitunterschiede gemeinsam für die Ortung der Phantomschallquellen benutzt.

5.2.1.3 Einfluß der verschiedenen Aufnahmeverfahren auf die Lautsprecherwiedergabe

Bei Lautsprecherwiedergabe kommt es am Ort des Hörers zu einer verdoppelten Rauminformation. Durch die Mikrofonaufnahme wird die Rauminformation einer Schallquelle aufgezeichnet, bei Lautsprecherwiedergabe prägen sich dem Schallsignal zusätzliche Informationen des Wiedergaberaums auf. Dieser Effekt wird auch als *Serienschaltung der Raumübertragungsfunktion* bezeichnet. Dieser Effekt kann sich störend auf das Klangbild auswirken, er hängt jedoch stark von der Art des verwendeten Aufnahmeverfahrens ab.

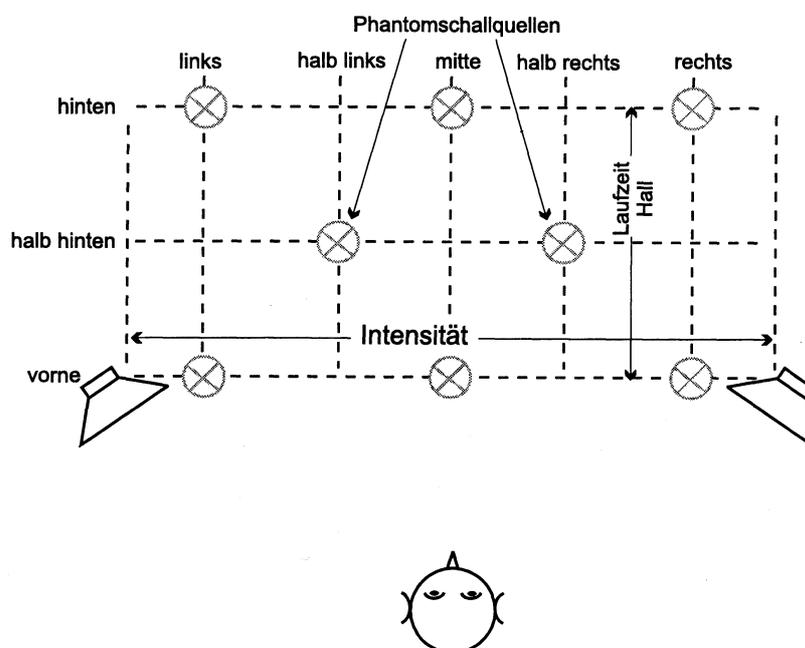
5.2.1.3.1 Auswirkung reiner Intensitätsinformationen

Bei reiner Intensitätsstereophonie werden die Phantomschallquellen wie auf einer gedachten Linie zwischen den Lautsprechern wahrgenommen. Die Rechts-/Links-Ortung ist präzise, die räumliche Tiefenabbildung durch das Fehlen von Laufzeitinformationen jedoch mangelhaft. Aus diesen Gründen kommt es bei Lautsprecherwiedergabe von Aufnahmen, die ausschließlich mit dem Intensitätsprinzip arbeiten, zu keiner Beeinträchtigung des Höreindrucks durch die verdoppelte Rauminformation.

5.2.1.3.2 Auswirkung von Laufzeitinformationen

Bei Schallquellen, die Laufzeitinformationen beinhalten, die aber meist auch über Intensitätsunterschiede verfügen, kommt es bei Lautsprecherwiedergabe zu einer besseren tiefenräumlichen Abbildung des Klangkörpers.

Abbildung 53: aus Graber 1997



Bei sehr großen Laufzeitdifferenzen kann sich die doppelte Rauminformation negativ auf das Hörereignis auswirken. Der Klang wird dann zum Beispiel als „stumpf“ oder „verwaschen“ empfunden.

5.2.1.3.3 Auswirkung von Aufnahmen, die mit Trennkörpern durchgeführt wurden

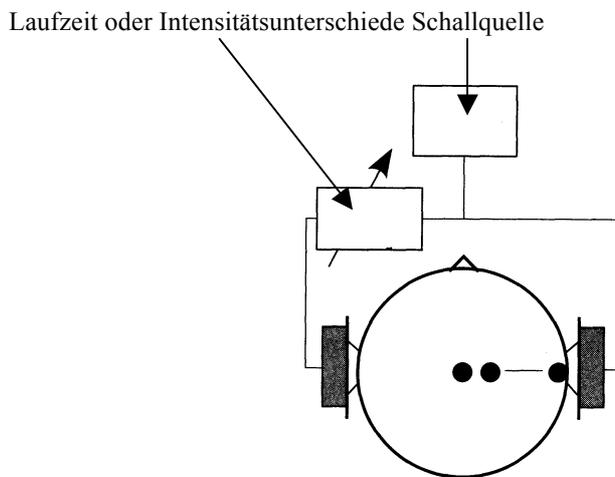
Bei Aufnahmen mit → *Trennkörpern* werden die durch Beugungserscheinungen verursachten frequenzabhängigen Intensitätsunterschiede ebenfalls zur Gestaltung des Klangsignals benutzt. Besonders stark ausgeprägt ist dieses Prinzip beim sogenannten *Kunstkopf*, der durch Annäherung der Bauform an einen menschlichen Kopf eine besonders genaue Simulierung des natürlichen Hörvorganges versucht. Die Serienschaltung der Raumübertragungsfunktionen wirken sich besonders bei diesem System nachteilig auf das Klangbild aus. Aus diesem Grund werden sie mit einigen Einschränkungen, die später noch behandelt werden, für Lautsprecherwiedergabe kaum verwendet.

5.2.2 Kopfhörerwiedergabe

Bei Kopfhörerwiedergabe werden die Phantomschallquellen zumeist auf einer gedachten Linie zwischen den Ohren wahrgenommen (*Lateralisation*). Für die räumliche Zuordnung der Schallereignisse kommen ebenfalls Laufzeit- und Intensitätsunterschiede in Betracht.

Die Abbildung zeigt die Wahrnehmung der Phantomschallquellen bei Kopfhörerwiedergabe entlang einer gedachten Linie durch Laufzeit- oder Intensitätsunterschiede der anliegenden Signale:

Abbildung 54: aus Hugonnet 1998



Bei Kopfhörerwiedergabe ist bei der Lokalisierung durch Laufzeitunterschiede eine maximale Auslenkung der Phantomschallquelle bereits ab einem Wert von $0,7\text{ ms}$ erreicht. Bei der Richtungsdeutung durch Intensitätsunterschiede wird ab einem Unterschied von 8 dB bis 10 dB die Phantomschallquelle bereits deutlich an einem Ort der Stereobasis lokalisiert. Bei Kopfhörerwiedergabe wird wie bei Lautsprecherwiedergabe die räumliche Abbildung der Schallquelle zumeist mit einer Kombination von Laufzeit- und Intensitätsdifferenzen realisiert.

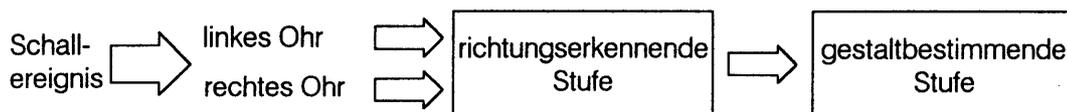
5.2.2.1 Einfluß der Aufnahmeverfahren bei Kopfhörerwiedergabe

Je mehr sich das Aufnahmeverfahren dem natürlichen Hören einer Schallquelle nähert, desto mehr ist bei Kopfhörerwiedergabe auch ein natürlicher Klangeindruck möglich. Die Wahrnehmung von Phantomschallquellen entlang einer im Kopf gedachten Linie entspricht nicht den natürlichen Gegebenheiten des Hörvorgangs und führt zu Ermüdungserscheinungen. Bei Kopfhörerwiedergabe kann es aber auch zu einer virtuellen Abbildung der Phantomschallquellen außerhalb des Kopfes kommen. Dieser Effekt wird „*Außer-Kopf-Lokalisation*“ genannt. Diese Form der Klangwahrnehmung muß allerdings erlernt werden und stellt sich nur ein, wenn neben Intensitätsunterschieden zumindest auch Laufzeitinformationen im Schallsignal enthalten sind. Bei Aufnahmen mit Trennkörpern, vor allem mit Kunstköpfen, läßt sich die Außer-Kopf-Lokalisation am besten erreichen. Durch die klangliche Abschirmung der am Kopfhörer anliegenden Signale vom umgebenden Raum kommt es zu keiner Beeinträchtigung der Klangwahrnehmung durch doppelte Rauminformation.

5.2.3 Assoziationsmodell von Theile

Die elektroakustische Wiedergabe einer Schallquelle unterscheidet sich in wesentlichen Punkten von einer natürlichen Hörsituation: Phantomschallquellen entsprechen zum Beispiel keinen natürlichen Schallereignisorten, sondern werden durch den Vergleich zweier Ersatzschallquellen (Lautsprecher) gebildet. Das Assoziationsmodell von Theile versucht eine Erklärung der Vorgänge im natürlichen und stereophonen Schallfeld.

Abbildung 56: aus Dickreiter 1995

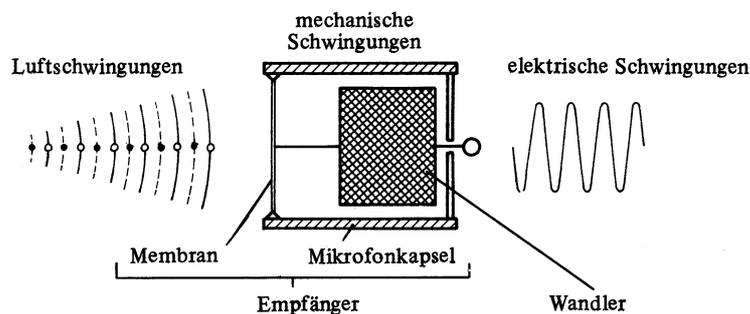


Nach diesem Modell werden zunächst die an den beiden Ohren anliegenden Signale verglichen und aus ihnen eine Richtungsinformation gebildet. Richtungsabhängige Klangfärbungen sowie Kammfiltereffekte werden dabei aus dem Signal herausgefiltert. Diesen Vorgang nennt man die ortsbestimmende Stufe. Aufgrund von Hörerfahrungen werden zusammengehörige Komponenten eines Klanges von denen eines anderen Klanges getrennt und zu einzelnen Klangkörpern zusammengefügt wie zum Beispiel das gleichzeitige Entstehen von verschiedenen Instrumentalklängen eines Ensembles im Bewußtsein eines Hörers. Diesen Vorgang nennt man die gestaltbestimmende Stufe. Auch der bereits erwähnte Cocktailparty-Effekt wird zum Teil mit diesem Modell erklärt.

6 Mikrofone – Funktionsprinzip, Eigenschaften

Durch Mikrofone werden Schallschwingungen in elektrische Wechselspannungen umgewandelt. Zunächst wird eine Membran als Schallempfänger von den Schallwellen zu einer Schwingung angeregt. Die mechanische Schwingung wird durch das jeweilige Wandler-System des Mikrofons in eine elektrische Schwingung umgewandelt. Die Umwandlung von akustischen Schwingungen in mechanische nennt man das *Empfängerprinzip* des Mikrofons. Die Umwandlung von mechanischen Schwingungen in elektrische Schwingungen nennt man das *Wandlerprinzip* des Mikrofons.

Abbildung 57: aus Dickreiter 1997



Das Empfängerprinzip wird durch die Art der Konstruktion der *Mikrofonkapsel* bestimmt. Diese bedingt auch die \rightarrow *Richtcharakteristik* sowie auch einige andere wesentliche Eigenschaften des Mikrofons.

6.1 EINIGE KENNDATEN VON MIKROFONEN

Zur Beurteilung der Verwendbarkeit und der Qualität des Mikrofons spielen einige technischen Angaben oder auch *Kenndaten* eine wesentliche Rolle.

6.1.1 Frequenz- oder Übertragungsbereich

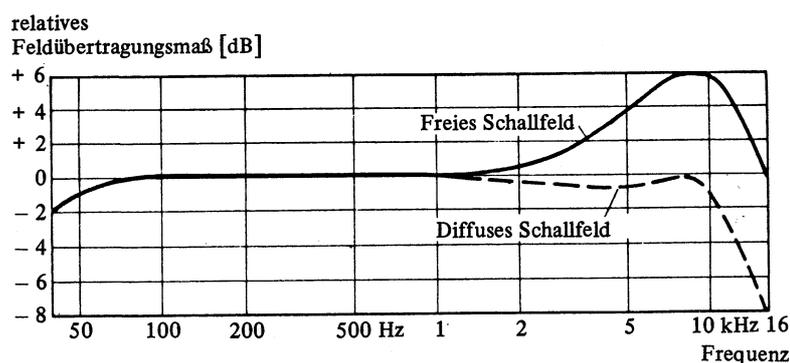
Dieser Kennwert bestimmt, innerhalb welcher Frequenzgrenzen das Mikrofon Schall aufnehmen und in elektrische Spannungen umwandeln kann.

6.1.2 Frequenzgang

Der Frequenzgang bezeichnet, wie genau die Form der elektrischen Schwingung die Form der natürlichen Schallschwingung wiedergeben kann. Zumeist wird der Frequenzgang in einem Diagramm dargestellt, in dem auf der horizontalen Achse die Frequenz, auf der vertikalen Achse die Empfindlichkeit des Mikrofons dargestellt wird.

Im Idealfall verläuft eine Frequenzkurve parallel zur horizontalen Frequenzachse. Man spricht in diesem Fall auch vom linearen Frequenzgang eines Mikrofons. Je nachdem, ob sich das Mikrofon im Nahbereich der Schallquelle oder im Diffusfeld befindet, kann daraus ein großer Unterschied zwischen den Frequenzgängen resultieren. Die Abbildung zeigt Frequenzgänge im Direkt- und Diffusfeld eines \rightarrow *Druckempfängers*.

Abbildung 58: Dickreiter 1997



6.1.3 Geräuschspannungsabstand

Der *Geräuschspannungsabstand* eines Mikrofons gibt die Differenz zwischen dem Pegel, den das Mikrofon bei einem Schalldruck von 1 Pa und einer Frequenz von 1.000 Hz wiedergibt, sowie dem Pegel, der durch Störspannungen im Mikrofon verursacht wird. Ein Schalldruck von 1 Pa entspricht einem Schalldruckpegel von 94 dB .

6.1.4 Dynamikbereich

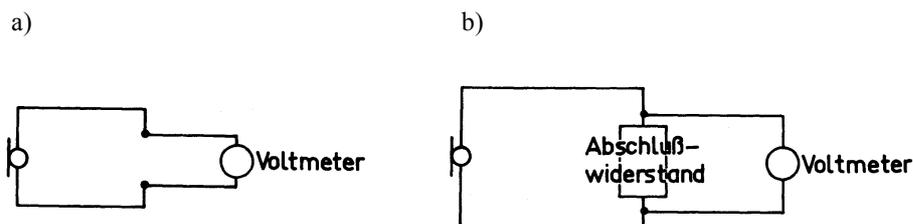
Der *Dynamikbereich* oder die *Dynamik* eines Mikrofons gibt an, welcher Schallstärkebereich ohne wesentliche \rightarrow *Verzerrung* übertragen werden kann. J_{\max} bezeichnet die größte, J_{\min} die kleinste übertragene Schallstärke. Der Dynamikbereich des Mikrofons ist der Quotient von J_{\max} und J_{\min} , er wird in dB angegeben.

6.1.5 Empfindlichkeit eines Mikrofons - der Feld-Übertragungsfaktor

Der *Feld-Übertragungsfaktor* eines Mikrofons ergibt sich als die Wechselspannung, die am Mikrofonausgang anliegt und durch einen Schalldruck von 1 Pa erzeugt wird. Die Empfindlichkeit wird in mV pro Pa angegeben. Die Angabe erfolgte früher auch oft in $\text{mV pro } \mu\text{bar}$ ($1 \mu\text{bar} = 0,1 \text{ Pa}$).

Wenn die Spannung direkt am Mikrofon gemessen wird, spricht man vom *Leerlaufübertragungsfaktor* (Abbildung 59 a). Wird die Spannung an den Enden eines betriebmäßig üblichen Widerstandes, der *Nennabschlußimpedanz*, gemessen, so ergibt sich dadurch der *Betriebsübertragungsfaktor* (Abbildung 59 b). Übliche Werte für die Nennabschlußimpedanz (Widerstandswert, Einheit *Ohm*: Ω) liegen zwischen 200Ω und 1.000Ω .

Abbildung 59: aus Borucki 1989



6.1.6 Grenzschalldruckpegel eines Mikrofons

Der *Grenzschalldruck* eines Mikrofons bezeichnet denjenigen Schalldruck oder Schalldruckpegel, unterhalb dessen der Hersteller die Einhaltung eines gewissen \rightarrow *Klirrfaktors* (zumeist 0,5%) garantiert.

6.1.7 Verzerrungen

Da durch ein Mikrofon Schallschwingungen nie identisch in elektrische Schwingungen umgewandelt werden können, treten immer sogenannte *Verzerrungen* auf. Eine *lineare Verzerrung* bedeutet, daß im Originalschall vorhandene Klangkomponenten entweder hervorgehoben oder unterdrückt werden. Eine *nichtlineare Verzerrung* erzeugt durch die elektrische Schwingung Teilfrequenzen, die im Originalschall überhaupt nicht enthalten sind.

6.1.8 Klirrfaktor

Der *Klirrfaktor* gibt das Verhältnis aller Effektivwerte der durch die nichtlineare Verzerrung hervorgerufenen Obertöne zum Effektivwert des allein vorhandenen Grundtones bei fehlender nichtlinearer Verzerrung wieder. Der Klirrfaktor wird in Prozent angegeben. Für Musikaufzeichnungen beginnt sich der Klirrfaktor ab etwa 5% störend auf die Schallübertragung auszuwirken. Ab einem Klirrfaktor von 50% ist nicht einmal mehr eine verständliche Sprachübertragung möglich.

7 Mikrofontypen – Wandlerprinzipien

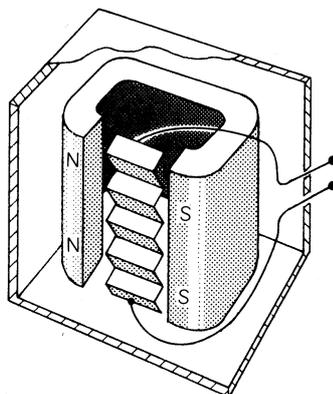
7.1 DYNAMISCHE WANDLER

Wird ein Leiter in einem Magnetfeld bewegt, so entsteht an seinen Enden eine elektrische Spannung. Diese nennt man *Induktionsspannung*. Auf dem Prinzip der *elektromagnetischen Induktion* beruhen folgende Mikrofontypen:

7.1.1 Das Bändchenmikrofon

In einem *Bändchenmikrofon* befindet sich zwischen den Polen eines Magneten ein sehr dünnes, leicht drehbar gelagertes Aluminiumbändchen. Wenn eine Schallwelle auf dieses Bändchen trifft, so beginnt es sich zu bewegen und erzeugt dabei eine der Geschwindigkeit der Bewegung und somit auch der Schallstärke proportionale Induktionsspannung. Bändchenmikrofone sind *Schallschnelle-Empfänger*.

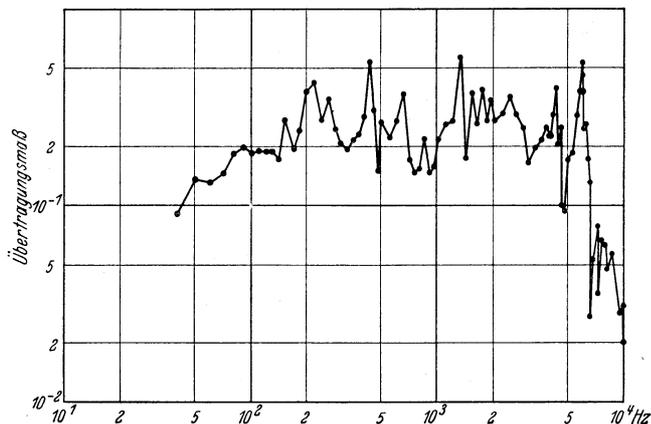
Abbildung 60: aus Hall 1991



Die Empfindlichkeit dieses Mikrofontyps bei 200Ω Abschlußwiderstand schwankt zwischen 1 mV/Pa und 2 mV/Pa . Es können Frequenzen im ungefähren Bereich von 80 Hz bis 9.000 Hz übertragen werden. die Dynamik liegt bei etwa 50 dB .

Frequenzkurve eines Bändchenmikrofons:

Abbildung 61: aus Trendelenburg 1961

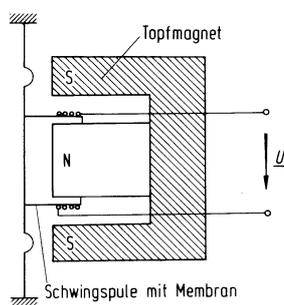


7.1.2 Tauchspulenmikrofon

Das *Tauchspulenmikrofon* funktioniert ebenfalls auf dem Prinzip der elektromagnetischen Induktion. Auf einer Membran ist eine Spule befestigt, die sich um einen Permanentmagneten bewegt. Durch die Bewegungen der Membran entstehen an den Enden der Spule elektrische Wechselspannungen. Die Empfindlichkeit eines Tauchspulenmikrofons liegt bei etwa 1 mV/Pa bei $200 \ \Omega$ Abschlußwiderstand, die Dynamik ungefähr bei 60 dB , der Klirrfaktor bei ca. 1% . Es können Frequenzen im Bereich von ungefähr 40 Hz bis 10.000 Hz übertragen werden.

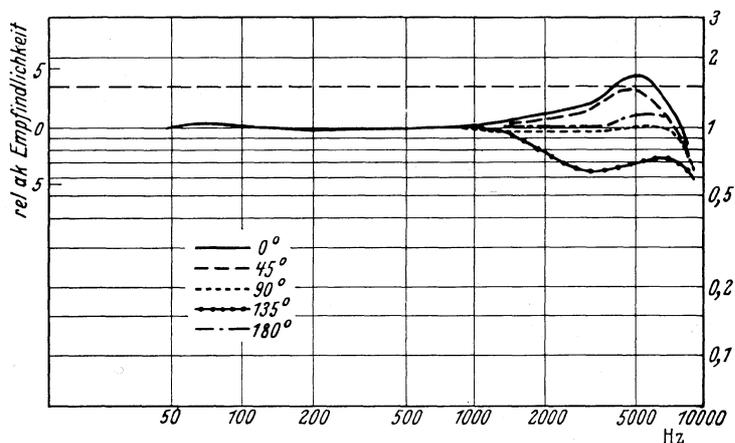
Schema eines Tauchspulenmikrofons:

Abbildung 62: aus Zwicker, Zollner 1993



Frequenzkurve eines Tauchspulenmikrofons:

Abbildung 63: aus Trendelenburg 1961

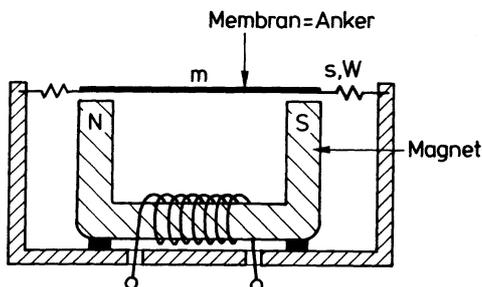


7.2 MAGNETISCHE WANDLER

Im Gegensatz zu einem dynamischen Wandler, bei dem ein Leiter in einem Magnetfeld bewegt wird, ist der Leiter bei einem *magnetischen Wandler* in Ruhe. Durch eine Metallmembran, die mit einem magnetisch leitfähigen starren Anker fest verbunden ist, kommt es zu Magnetfeldänderungen, die in Wechselspannungen am Ende der Spule resultieren.

Schema eines magnetischen Wandlers

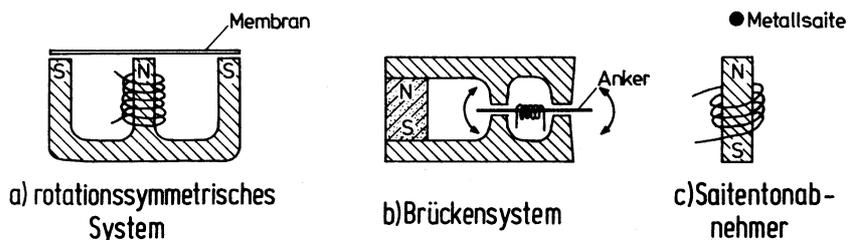
Abbildung 64: aus Zwicker, Zollner 1993



Dieses Wandlerprinzip wird hauptsächlich in Telefonhörern benutzt.

Weitere Arten von magnetischen Wandlern:

Abbildung 65: aus Zwicker, Zollner 1993



- System für Kopf- und Telefonhörer
- System für Miniaturmikrofone und Schallplattenabtastern
- System für die Abtastung von Metallsaitenschwingungen

7.3 AKTIVE, IRREVERSIBLE WANDLER

Die bis jetzt geschilderten Wandlertypen erlauben eine Umkehr des Energieflusses. Das heißt, daß aus elektrischer Energie mechanische Energie entstehen kann und umgekehrt. Es gibt aber auch Wandler, die nicht umkehrbar funktionieren. Sie werden als *aktive Wandler* bezeichnet. Es entsteht also kein Schall, wenn an den Ausgangsklemmen eines aktiven Schallempfängers eine Wechselspannung angelegt wird. Ein *umkehrbarer Wandler* entzieht dem Schallfeld Energie und wandelt sie in elektrische Spannung um. Ein aktiver, nicht umkehrbarer Wandler benötigt jedoch eine zusätzliche Spannung für die Schallübertragung.

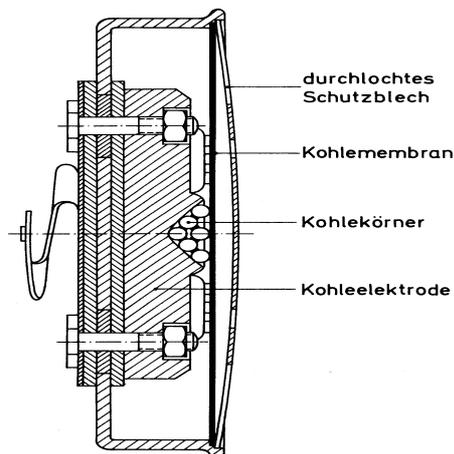
7.3.1 Kohlemikrofon

In einem *Kohlemikrofon* befindet sich eine mit Kohlekörnern gefüllte Kapsel. Diese bilden einen druckabhängigen elektrischen Widerstand. Die Vorderseite der Kapsel wird durch eine dünne Membran abgeschlossen. Wird durch eine Schallwelle mechanischer Druck auf die Membran ausgeübt, so werden die Kohlekörner zusammengepreßt, die Kontaktfläche zwischen den Körnern nimmt zu, dadurch sinkt der elektrische Widerstand und die Stromstärke steigt an. Der Wechselspannungsanteil, welcher durch diese Stromschwankungen entsteht, wird durch einen Übertrager abgetrennt. Die Herstellungskosten für ein Kohlemikrofon sind sehr niedrig, sie werden vorwiegend in der Fernsprechtechnik, zum Beispiel für Telefone, verwendet. Das Kohlemikrofon arbeitet

in einem Frequenzbereich zwischen 200 Hz und 4.000 Hz , es hat eine Empfindlichkeit von etwa 900 mV/Pa ($200\ \Omega$ Abschlußwiderstand). Bei diesem Mikrontyp kommt es zu starken nichtlinearen Verzerrungen, die zu einem Klirrfaktor von bis zu etwa 50% führen können.

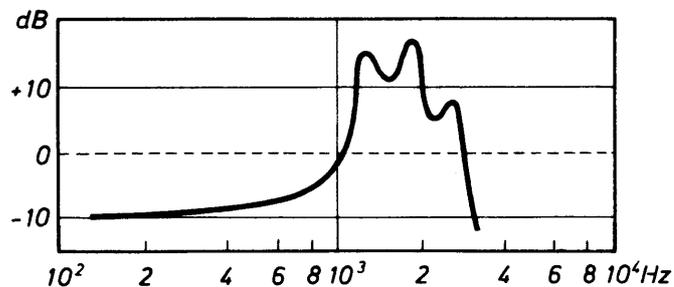
Kapsel eines Kohlemikrofons

Abbildung 66: aus Rielländer 1982



Frequenzgang eines Kohlemikrofons

Abbildung 67: aus Borucki 1989

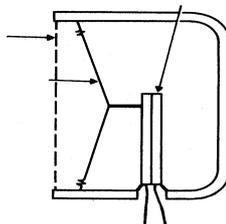


7.3.2 Piezowandler

Wird auf die Begrenzungsflächen bestimmter Kristalle, meist Seignettesalz, Druck ausgeübt, so entstehen elektrische Spannungen. Diese Eigenschaft bezeichnet man auch als den *piezoelektrischen Effekt*. Man nennt Mikrofone, die nach diesem Wandlerprinzip arbeiten, auch *Piezo-* oder *Kristallmikrofone*.

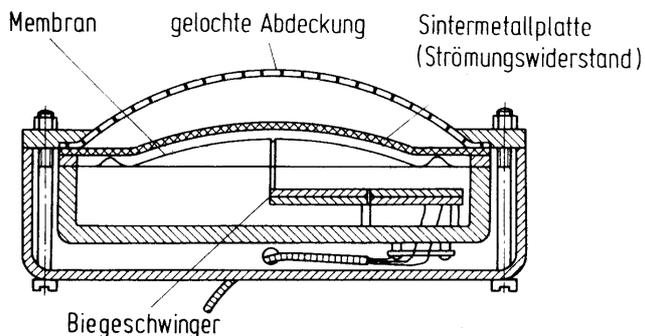
Prinzip eines Kristallmikrofons:

Abbildung 68: aus Rossing 1983



Kapsel eines Kristallmikrofons:

Abbildung 69: aus Heckl, Müller 1994



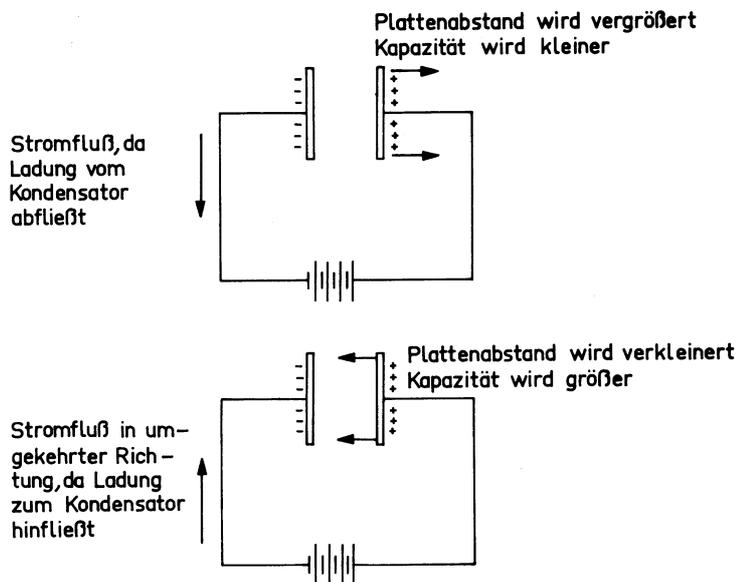
Kristallmikrofone verfügen über einen Frequenzgang zwischen ungefähr 40 Hz und 10.000 Hz . Die Empfindlichkeit liegt bei 10 mV/Pa .

7.3.3 Kondensatormikrofone

Ein *Kondensator* wird durch zwei einander gegenüberstehenden voneinander isolierten Metallplatten gebildet. Wird eine elektrische Gleichspannung an die Platten angelegt, so laden sie sich elektrisch auf. Die Kapazität des Kondensators wird bestimmt durch die elektrische Ladung, die an den Platten entsteht, wenn eine Gleichspannung von 1 V angelegt wird. Die Kapazität wird in *Colomb pro Volt (C/V)* angegeben. Ein Colomb pro Volt ist gleich einem *Farrad (F)*.

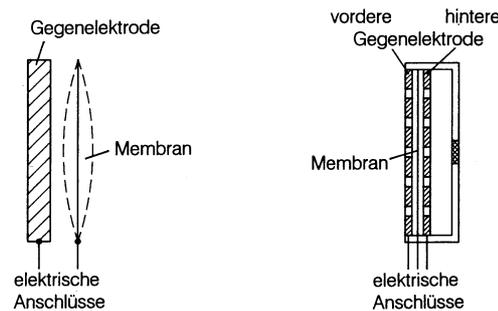
Arbeitsweise eines Kondensators

Abbildung 70: aus Borucki 1989



Im Prinzip kann ein *Kondensatormikrofon* auf zwei verschiedene Arten gebaut werden. Entweder bildet die Mikrofonmembran eine Elektrode des Kondensators, und die zweite Elektrode wird durch eine feste Platte gebildet, oder es schwingt eine Membran zwischen zwei akustisch unwirksamen feststehenden Gegenelektroden. Die Kapazität eines Kondensators ändert sich mit dem Abstand der beiden Platten bzw. durch die Schwingung der Membran zwischen den beiden Elektroden. Diese Schwingungen verursachen gleichfrequente Wechselströme, die bei diesem Wandlertyp zur Schallübertragung genutzt werden.

Abbildung 71: aus Dickreiter 1995



Ein Kondensatormikrofon hat einen ungefähren Frequenzbereich von 20 Hz bis 20.000 Hz , eine Dynamik von mind. 75 dB , die Empfindlichkeit eines hochwertiges Kondensatormikrofons liegt bei ungefähr 20 mV/Pa

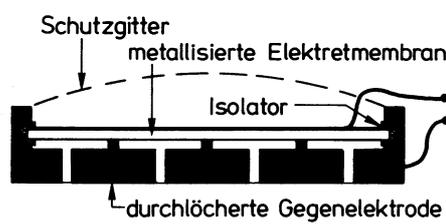
Ein Kondensatormikrofon kann entweder nach dem *Niederfrequenzprinzip (NF)* oder nach dem *Hochfrequenzprinzip (HF)* betrieben werden. Beim Niederfrequenzprinzip wird die Kondensatorkapsel mit einer konstanten Spannung von üblicherweise 48 V gespeist. Die Änderungen der Kapazität des Kondensators führt zu Spannungsschwankungen. Bei einem Kondensatormikrofon in Hochfrequenzschaltung beeinflusst der Kondensator die Frequenz oder Phase einer hochfrequenten Schwingung. Durch Demodulation wird daraus ein niederfrequentes Signal gewonnen. Bei dieser Bauform wird keine Spannung an die Kapsel gelegt, jedoch wird eine Spannungsversorgung für die Hochfrequenzschaltung benötigt.

7.3.3.1 Der Elektretwandler als Unterform des Kondensatormikrofones

Ein Kunststoff wie zum Beispiel Polycarbonat-Folie wird in einem starken elektrischen Feld zum Schmelzen gebracht und bis zur Abkühlung in diesem Feld belassen. Von diesem Material geht nun ein elektrisches Feld aus, das dem magnetischen Feld eines Permanentmagneten ähnelt. Das sogenannte *Elektret* wird durch eine metallische Hülle geschützt, um die gespeicherte Ladung über lange Zeiträume konstant zu halten. Das *Elektretmikrofon* benötigt dadurch keine externe Vorspannung für die Kondensatorkapsel. Zum Betrieb des Elektretmikrofons ist nur noch ein Vorverstärker zur Impedanzwandlung notwendig, der durch einen *integrierten Schaltkreis (IC)* gebildet wird. Die Spannungsversorgung erfolgt durch eine Batterie, die – bedingt durch den geringen Stromverbrauch des IC – eine Betriebsdauer von einigen 100 Stunden ermöglicht.

Kapsel eines Elektretmikrofons

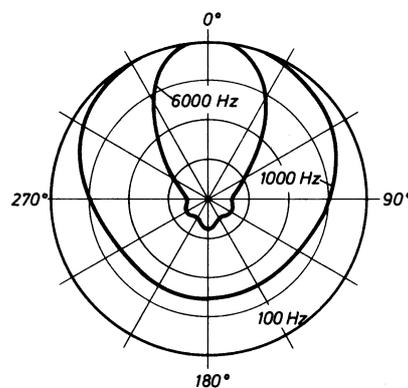
Abbildung 72: aus Zwicker, Zollner 1993



8 Mikrofone - Kapselausführungen und Richtcharakteristiken

Die → *Richtcharakteristik* eines Mikrofons ist hauptsächlich von der Konstruktion des Schallempfängers, der Mikrofonkapsel, abhängig. Es wird zwischen → *Druckempfänger* und → *Druckgradientenempfänger* unterschieden. Die *Richtwirkung* eines Mikrofons wird in einem Richtdiagramm dargestellt. Dazu wird das Mikrofon in einem reflexionsarmen Raum um 360° drehbar vor einem Schallsender aufgestellt. Die Mikrofonempfindlichkeit, abhängig von der jeweiligen Frequenz, wird in einem Abstand vom Mittelpunkt innerhalb von konzentrischen Kreisen aufgetragen. Je weiter die Kurve vom Mittelpunkt des Diagrammes entfernt ist, desto größer ist auch die Mikrofonempfindlichkeit.

Abbildung 73: aus Borucki 1989



Bei diesem Diagramm verläuft die Empfindlichkeitskurve für einen Ton von 100 Hz auf einem Kreis um den Koordinatenmittelpunkt. Bei dieser Frequenz ist die Empfindlichkeit des Mikrofons theoretisch unabhängig von der Schalleinfallrichtung. Bei einem Ton von 1.000 Hz ist die Frequenzkurve auf der Rückseite des Mikrofons bereits wesentlich eingedrückt. In diesem Fall wird der von vorne kommende Schall gegenüber dem von der Rückseite kommenden bevorzugt. Ab einer Frequenz von 6.000 Hz entsteht ein stark gerichteter Schallempfang, das heißt, daß nur die von vorne aus einem ungefähren Winkel von 60° auftreffenden Schallwellen aufgenommen werden, von hinten eintreffender Schall wird kaum mehr registriert.

Ein Frequenzdiagramm wird hauptsächlich durch zwei verschiedene Maße angegeben:

1. Der *Richtungsfaktor*, der das Verhältnis des Feld-Übertragungsfaktors für eine ebene Schallwelle aus einer bestimmten Richtung zu demjenigen aus einer Bezugsrichtung 0° bezeichnet. Dieser Wert ist von Einfallrichtung und Frequenz abhängig und eine dimensionslose Größe.
2. Oft wird allerdings auch das *Richtungsmaß* angegeben, welches den zwanzigfachen Zehnerlogarithmus des Richtungsfaktors angibt. Die Einheit des Richtungsmaßes ist das *dB*.

Nachfolgend werden einige Werte für Richtungsmaß und –faktor einander gegenübergestellt. (nach: Dickreiter 1997)

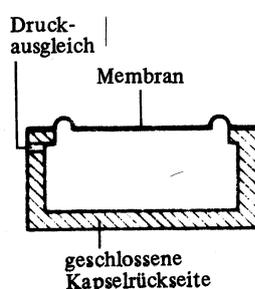
Richtungsmaß in dB	Richtungsfaktor als dimensionslose Größe
0	1
-3	0,7
-6	0,5
-10	0,3
-12	0,25

8.1 DRUCKEMPFÄNGER

Die Kapsel eines *Druckempfängers* wird durch eine Membran vom umgebenden Raum schalldicht abgeschlossen. Es befindet sich nur eine kleine Öffnung für den Druckausgleich in der Kapsel. Durch diese werden jedoch keine Schalldruckschwankungen ausgeglichen. Die Membran der Kapsel wird immer dann bewegt, sobald der Druck vor der Membran einen Unterschied zum Kapselinnendruck ausmacht. Da ein Druckempfänger nur auf Luftdruckschwankungen reagiert, führt auch seitlicher oder von hinten auftretender Schall zu einer Auslenkung der Membran. Dadurch reagiert ein Druckempfänger auf jede Schalleinfallrichtung theoretisch in gleicher Weise.

Schema der Kapsel eines Druckempfängers:

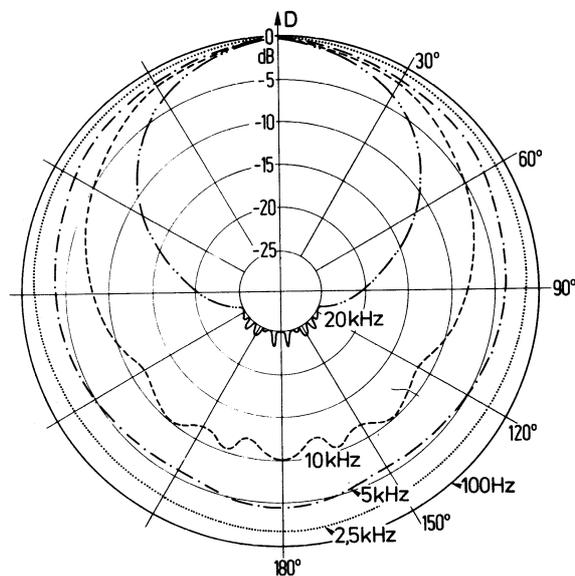
Abbildung 74: aus Dickreiter 1997



Eine Einschränkung der unabhängigen Richtcharakteristik stellt jedoch die physische Größe des Mikrofons dar. Bis zu einer gewissen Frequenz werden, da das Mikrofon klein gegen die Wellenlänge ist, die Schallwellen um das Mikrofongehäuse gebeugt. Wenn jedoch der Mikrofondurchmesser gleich oder größer als die Wellenlänge des einfallenden Schalles ist, so entsteht mit steigender Frequenz ab ca. 10.000 Hz ein stärker werdender Schallschatten vor der Membran der Mikrofonkapsel. Das führt mit ansteigender Frequenz zu einer *Richtcharakteristik* bei einem Schalldruckempfänger.

Frequenzdiagramm eines Mikrofons mit 2 cm Membrandurchmesser:

Abbildung 75: aus Zwicker, Zollner 1993



In diesem Fall muß bereits ab einer Frequenz von 2 kHz mit einer zunehmenden Richtcharakteristik des Mikrofons gerechnet werden.

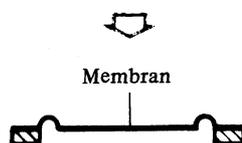
8.2 DRUCKGRADIENTEN ODER SCHNELLEMPFÄNGER

Im Gegensatz zum Druckempfänger wirkt beim *Druckgradientenempfänger* der Schalldruck auf beide Seiten der Membran ein. Der Unterschied dieser Druckdifferenzen ergibt eine Membranauslenkung. Da jeder Schalldruckunterschied im Schallfeld eine Luftbewegung in Richtung des Druckunterschiedes verursacht, ist auch die Spannung, die durch den Druckgradientenempfänger abgegeben wird, der Schallschnelle proportional. Aus diesem Grund werden Druckgradientenempfänger oft auch als *Schnellempfänger* bezeichnet. Bei einem eigentlichen Schnellempfänger bewegt sich jedoch eine sehr leichte Membran als Ganzes im Rhythmus der Luftbewegung. Dieses Prinzip findet beim Bändchenmikrofon seine Verwendung.

8.2.1 Achterrichtcharakteristik

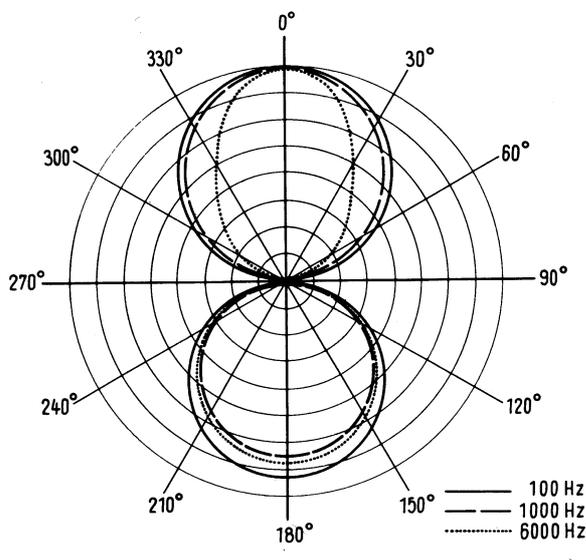
Die Kapsel eines Druckgradientenempfängers besteht in ihrer einfachsten Ausprägung nur aus einer für den Schall beidseitig zugänglichen Membran. Schall, der von vorne oder von hinten auf die Kapsel auftrifft, lenkt die Membran maximal aus, seitlich eintrifftender Schall verursacht keine Druckdifferenzen. Diese Anordnung nennt man einen Druckgradientenempfänger mit *Achterrichtcharakteristik*.

Abbildung 76: aus Dickreiter 1997



Frequenzdiagramm eines Mikrofons mit Achterrichtcharakteristik:

Abbildung 77: aus Webers 1989



Ein Nachteil bei einer Achterrichtcharakteristik ist eine mangelhafte Wiedergabe sehr tiefer Frequenzen ab ca. 200 Hz.

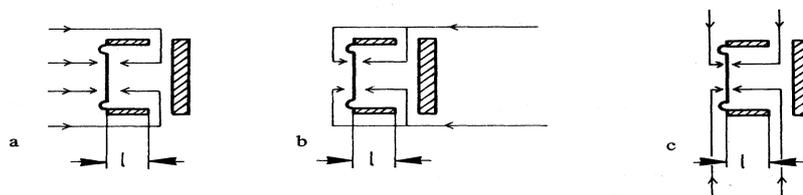
8.2.2 Nieren- oder Cardioidcharakteristik

Bei einer *Nieren- oder Cardioidcharakteristik* handelt es sich ebenfalls um einen Empfänger nach dem Druckgradientenprinzip. Diese Richtcharakteristik kann auf zwei verschiedene Arten realisiert werden:

Im ersten Fall sorgt ein sogenanntes *Laufzeitglied* vor der Membranrückseite für Laufzeitdifferenzen zwischen den beiden Membranseiten. Die Laufzeitdifferenz des eintreffenden Schalles ist für die Membranvorder- und -rückseite von der Einfallsrichtung abhängig. Trifft ein Schall von vorne auf das Mikrofon, entsteht durch das Laufzeitglied in der Kapsel eine Verzögerung jenes Schallanteils, der auf die Rückseite der Membran auftrifft. Dadurch entsteht ein Druckunterschied, der eine Membranauslenkung bewirkt. Trifft jedoch ein Schall von hinten auf das Mikrofon, so sind die Laufzeiten innerhalb der Kapsel für die Vorderseite und Rückseite der Membran in etwa gleich. Da in diesem Fall keine Druckdifferenz entsteht, kommt es auch zu keiner Auslenkung der Membran aus ihrer Ruhelage. Wenn ein Schall aus einer seitlichen Richtung auf das Mikrofon auftrifft, entstehen zwar Laufzeitdifferenzen und damit Druckunterschiede, diese sind jedoch geringer als bei frontal eintreffendem Schall.

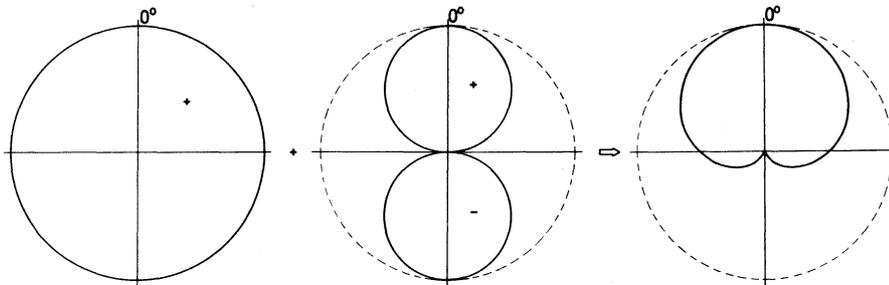
Kapsel eines Druckgradientenempfängers mit einem Laufzeitglied bei verschiedenen Schalleinfallrichtungen:

Abbildung 78: aus Dickreiter 1997



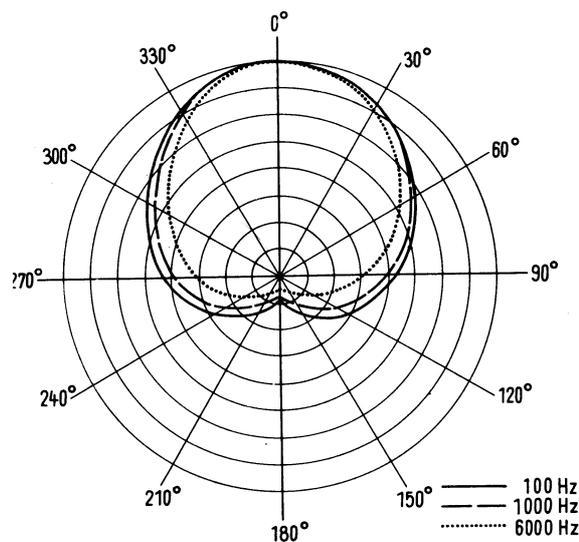
Die zweite Möglichkeit zur Erzeugung einer Nierencharakteristik eines Druckgradientenempfängers besteht in der Überlagerung einer Kugel- und einer Achtercharakteristik. Dies kann dadurch entstehen, daß die Signale eng benachbarter Kugel- und Achtersysteme addiert werden.

Abbildung 79: aus Zwicker, Zollner 1993



Frequenzdiagramm eines Druckgradientenempfängers mit Nierencharakteristik:

Abbildung 80: aus Webers 1989



8.2.2.1 Nierencharakteristik – Unterformen

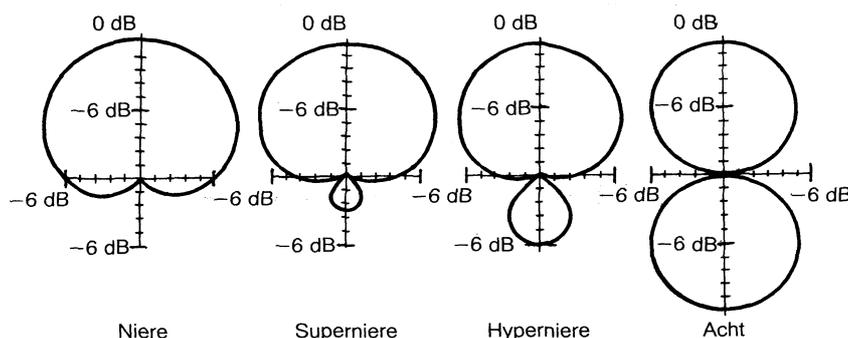
Durch einfache Veränderungen des Konstruktionsprinzips der Mikfonkapsel können andere Zwischenformen der Nierencharakteristik erzeugt werden, die man als *Hypernieren-* oder *Supernierencharakteristik* bezeichnet. Bei Verwendung eines Laufzeitgliedes werden diese Zwischenformen durch Veränderung der Laufzeitdifferenzen erreicht, bei der Überlagerung der Kugel- und Achtercharakteristik erhält letztere einen größeren Anteil.

Bei einer Hyperniere kann der Abstand zur Schallquelle um ca. 20 % gegenüber der Niere vergrößert werden, ohne daß dies zu einer Zunahme des Diffusschallanteiles führt. Die Superniere verfügt nur über eine geringfügig breitere Richtcharakteristik als die Hyperniere, jedoch nimmt sie aus dem Halbraum hinter dem Mikrofon einen wesentlich geringeren Schallteil auf, sie verfügt daher über eine bessere Rückwärts-

dämpfung. Eine noch stärkere Richtwirkung als Hyper- und Supernierencharakteristik hat die sogenannte \rightarrow Keulencharakteristik eines Mikrofons, das nach dem \rightarrow Interferenzprinzip arbeitet.

Empfindlichkeiten von Niere und ihren Zwischenformen im Vergleich zu einer Achtercharakteristik und ihre Abschwächungen bezogen auf eine Schalldruckabnahme von -6 dB bei rückwärtigem Schalleinfall in dB:

Abbildung 81 sowie Werte: aus Dickreiter 1995

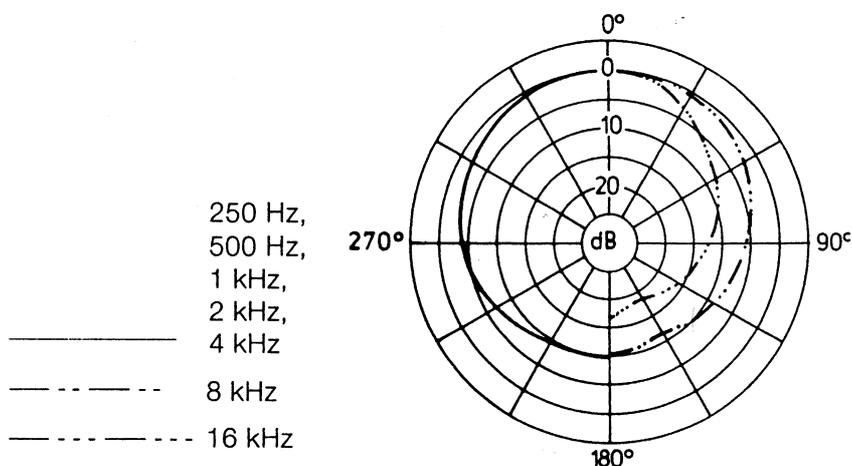


<i>Einfallswinkel</i>	<i>Niere</i>	<i>Superniere</i>	<i>Hypernieren</i>	<i>Acht</i>
90°	-6 dB	-9 dB	-12 dB	$-\infty$ dB
180°	$-\infty$ dB	-12 dB	-6 dB	0 dB

Eine weitere Variante der Nierencharakteristik stellt die sogenannte *Breite Kugel* dar. Sie wird auch oft als *Breite Niere* bezeichnet. Die Richtcharakteristik liegt zwischen der einer Kugel und der einer Niere. Die Wiedergabe tiefer Frequenzen ist besser als die einer Niere, es kommt auch zu einer weniger starken Ausprägung des \rightarrow Nahbesprechungseffektes.

Frequenzkurve einer Breiten Kugel:

Abbildung 82: aus Dickreiter 1997

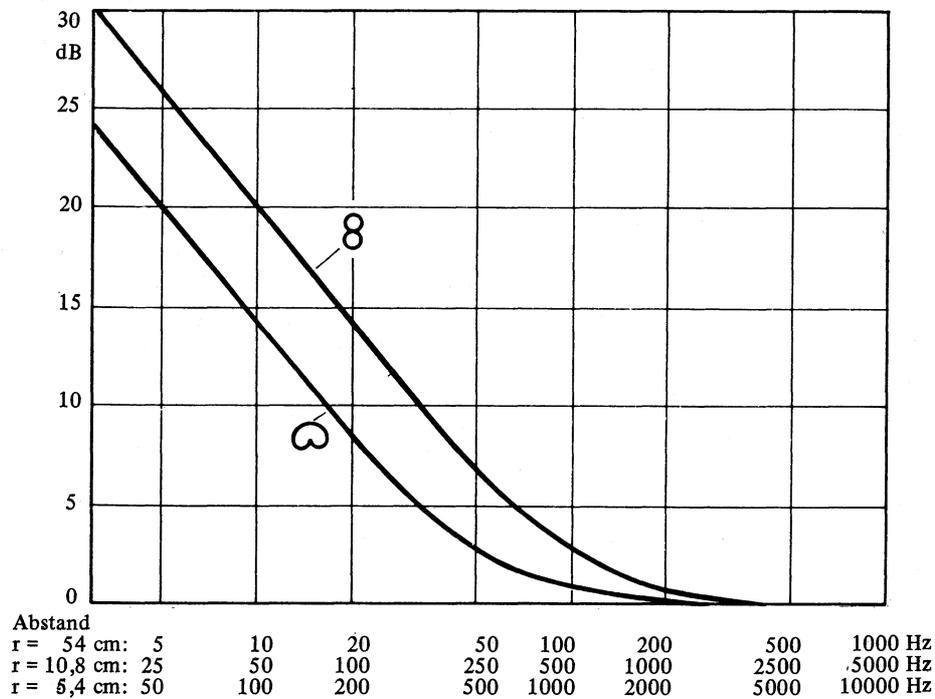


8.2.3 Nahbesprechungseffekt

Beim *Nahbesprechungseffekt* handelt es sich um eine klangfarbliche Veränderung des übertragenen Schalles, wenn sich das Mikrofon im Nahbereich einer Schallquelle befindet. Der Nahbesprechungseffekt tritt bei allen Mikrofonen mit Richtcharakteristik auf, gleichgültig ob sie als Schnelle- oder Druckgradientenempfänger arbeiten. Sobald der Mikrofonabstand kleiner als die Wellenlänge ist, kommt es zu einer Anhebung im tiefen Frequenzbereich. Mikrofone mit Achterrichtcharakteristiken haben einen im Durchschnitt um 6 dB höheren Nahbesprechungseffekt als Nierenmikrofone. Der Nahbesprechungseffekt tritt aber nur bis zu einer Distanz von ca. 50 cm von der Schallquelle auf.

Nahbesprechungseffekt bei Nieren- und Achtercharakteristik:

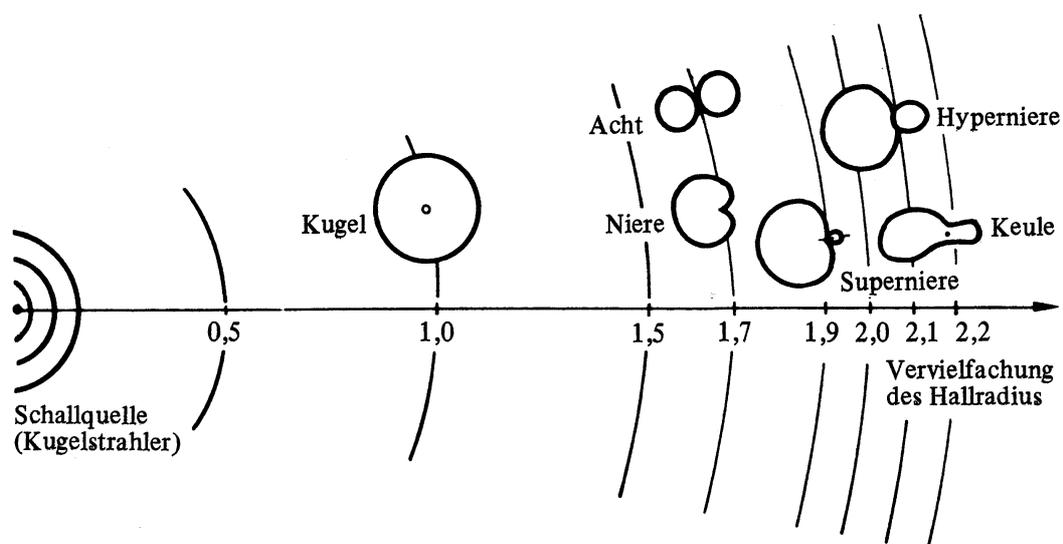
Abbildung 83: aus Dickreiter 1997



8.3 VERGRÖßERUNGSFAKTOREN VERSCHIEDENER RICHTCHARAKTERISTIKEN

Je nach der Richtcharakteristik kann auch das Mikrofon in unterschiedlich weitem Abstand von der Schallquelle positioniert werden. Nachstehende Grafik zeigt das Verhältnis von gleichem Direkt- zu Diffusschall bei unterschiedlichen Mikrofonabständen und ihren Richtcharakteristiken:

Abbildung 84: aus Dickreiter 1997



Die Zahlen von 0,5 bis 2,2 bezeichnen den *Vergrößerungsfaktor* der verschiedenen Richtcharakteristiken im Vergleich zu dem der Kugel.

9 Mikrofone - Erweiterte Bauformen

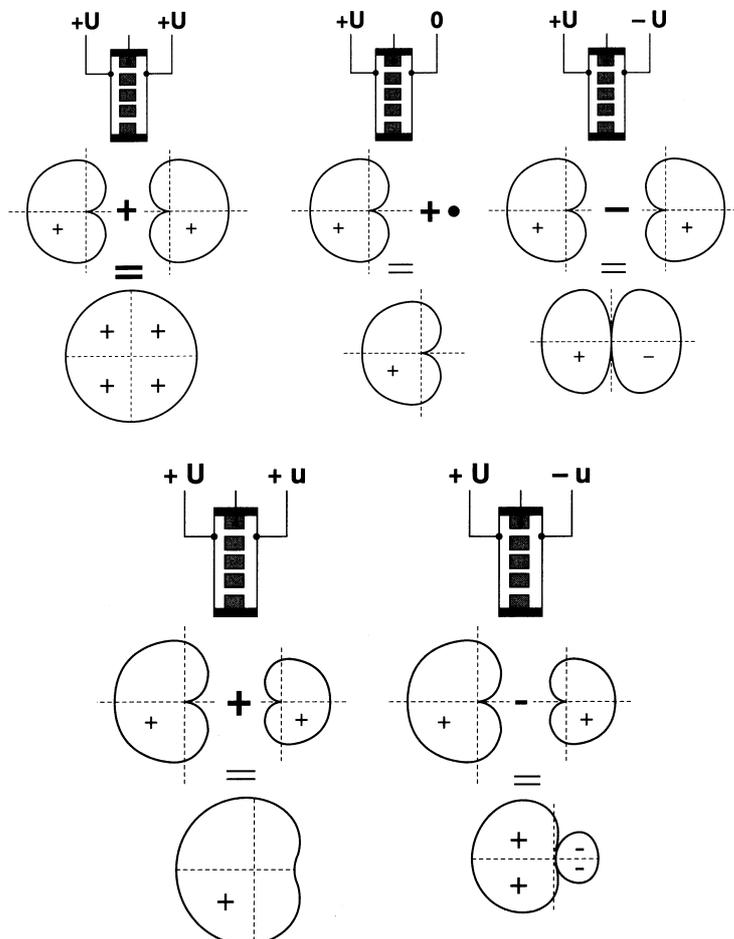
Durch bauliche Erweiterungen oben genannter Prinzipien werden noch variabelere Anwendungsmöglichkeiten oder Richtwirkungen erzielt.

9.1 KONDENSATORMIKROFON MIT UMSCHALTBARER RICHTCHARAKTERISTIK

Ein Mikrofon mit umschaltbarer Richtcharakteristik kann Kugel-, Nieren- oder Achtercharakteristik erhalten, des weiteren ist auch die Erzeugung von Zwischenformen wie Hyper- oder Superniere möglich. Dies kann durch rein mechanisch wirkende Elemente erzielt werden, oder es wird eine Ausführung dieses Mikrofontyps als *Doppelmembranmikrofon* bevorzugt. Je nach elektrischer Wirksamkeit und Polarität der beiden zusammengeschalteten Membrane entstehen die verschiedensten Charakteristiken. Werden zum Beispiel beide Membrane mit gleichen Spannungen und gleicher Polarität belegt, so resultieren daraus zwei einander entgegengesetzt ausgerichtete Nierencharakteristiken, die eine Kugelcharakteristik ergeben. Eine achterförmige Richtcharakteristik entsteht durch Addition gleich großer Spannungen, jedoch mit entgegengesetzter Polarität. Wird nur eine Membran mit einer Spannung belegt, so ergibt sich eine Nierencharakteristik, bei unterschiedlicher Spannungsbelegung entstehen Zwischenformen wie Hypernieren- und Supernierencharakteristik.

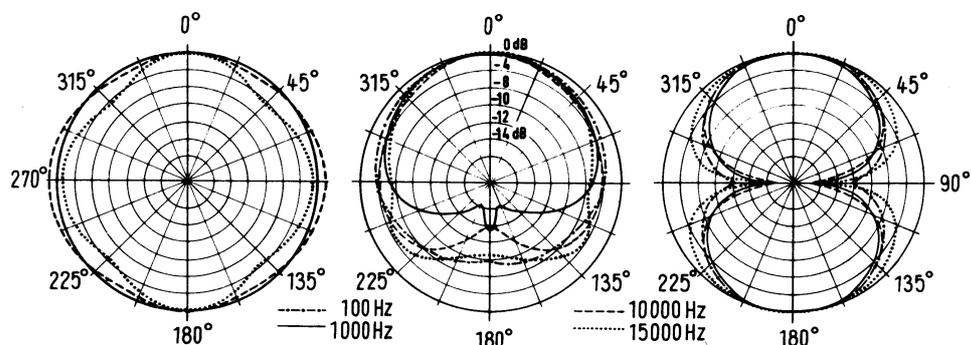
Einige mögliche Richtcharakteristiken durch Überlagerung zweier Nieren:

Abbildung 85: aus Hugonnet 1998



Frequenzgänge eines Mikrofons der Type Neumann KM 88i mit umschaltbarer Richtcharakteristik:

Abbildung 86: aus Webers 1989



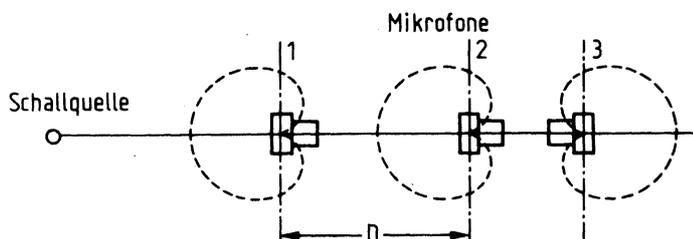
9.2 ZOOM-MIKROFON

Das *Zoom-Mikrofon* wird durch drei nierenförmige Mikrofonsysteme gebildet, die in einem gemeinsamen Mikrofongehäuse untergebracht sind. Je nach Zusammenschaltung der Ausgangssignale kann die Richtcharakteristik des Mikrofons kontinuierlich verändert werden. Addiert man die Signale der Mikrofone 2 und 3, entsteht eine kugelförmige Charakteristik. Wird der Signalanteil des Mikrofons 3 verringert, so entsteht eine nach vorn zunehmende Richtwirkung. Wird jetzt zusätzlich das Mikrofon 1 zugeschaltet, so wird die Richtwirkung noch weiter verstärkt.

Dieser Mikrofontyp hat sich bei Musikaufnahmen nicht durchgesetzt, er wird hauptsächlich im Film- und Fernsehbereich in Zusammenhang mit einem Zoom-Objektiv verwendet. Für Bewegungen in einem Klangkörper bei Musikaufnahmen wird auf die Verfahren der \rightarrow *Polymikrofonie* zurückgegriffen.

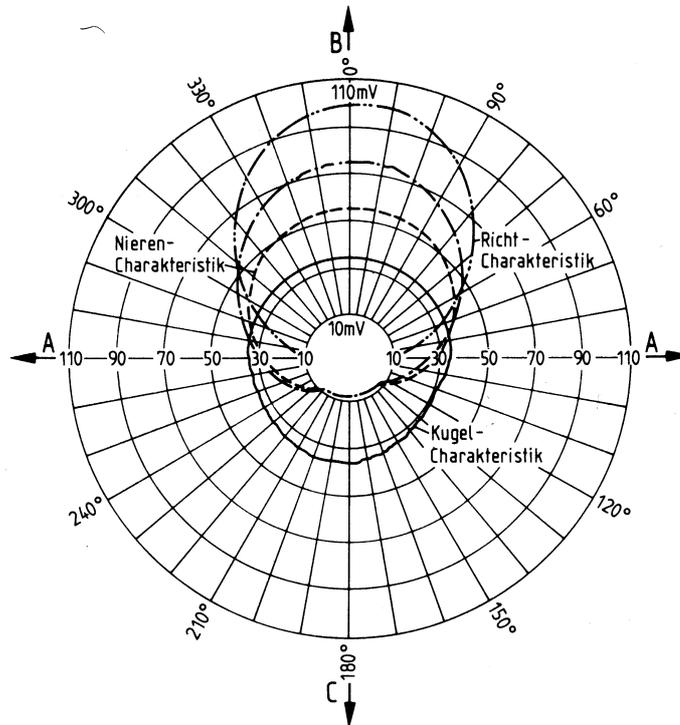
Anordnung der Mikrofonsysteme eines Zoom-Mikrofons:

Abbildung 87: aus Webers 1989



Frequenzdiagramm der veränderlichen Richtcharakteristiken des Zoom-Mikrofons:

Abbildung 88: aus Webers 1989



9.3 GRENZFLÄCHENMIKROFON

Beim *Grenzflächenmikrofon* oder auch *PZM (Pressure Zone Microphone)* wird die Mikrofonkapsel direkt in einer ebenen Fläche untergebracht. Grenzflächenmikrofone werden nicht frei im Raum aufgestellt, sondern entweder auf einem schallreflektierenden Boden gelegt oder an einer Wand befestigt. Der große Vorteil dieses Mikrontyps ist seine halbkugelförmige und theoretisch frequenzunabhängige Richtcharakteristik. Dadurch ergeben sich auch bei bewegten Schallquellen oder Schallquellen aus unterschiedlichen Richtungen kaum Klangfarbenunterschiede.

Prinzip des Grenzflächenmikrofons:

Abbildung 89: aus Dickreiter 1995



Das Grenzflächenmikrofon hat sowohl im Direkt- als auch im Diffusfeld einer Schallquelle den gleichen Frequenzgang. Durch die Unterbringung in einer ebenen Fläche entfallen störende Reflexionen, die zum Beispiel zu Kammfiltereffekten führen können. Grenzflächenmikrofone werden als Einzelmikrofon, als Stereomikrofon durch das Prinzip des Laufzeitunterschiedes oder auch zusammen mit einem Achtermikrofon als \rightarrow *MS-System* verwendet. Die Flächen des Grenzflächenmikrofons müssen jedoch zumindest einen Durchmesser von einer Wellenlänge der am tiefsten zu übertragenden Fre-

quenz haben. Bei tieferen Frequenzen ergibt sich ein Abfall um 6 dB bei einem unregelmäßigen Frequenzgang.

Zusammenhang von Grenzfrequenz und notwendigem Durchmesser der Grenzfläche.
(aus: Dickreiter 1995)

<i>Grenzfrequenz</i>	<i>Grenzflächendurchmesser</i>
30 Hz	10 m
15 Hz	6 m
100 Hz	3 m
200 Hz	1,5 m
500 Hz	0,6 m
1.000 Hz	0,3 m

9.4 INTERFERENZEMPFÄNGER MIT KEULENCHARAKTERISTIK:

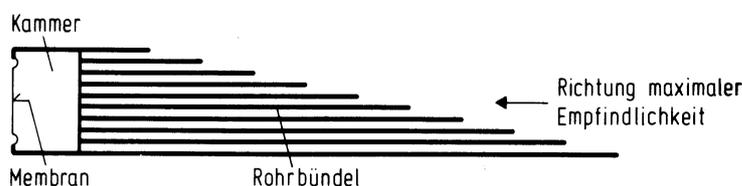
Bei diesem Mikrofontyp entsteht durch die Anwendung von Interferenzerscheinungen in Zusammenwirkung mit einem Druckgradientenempfänger ein sehr stark gerichteter Schallempfang. Vor der Membran der Mikrofonkapsel befindet sich ein Richtelement, das in zwei verschiedenen Bauweisen ausgeführt sein kann.

Beim *Röhrenmikrofon* wird vor die Membran der Mikrofonkapsel, die in einer kleinen Kammer untergebracht ist, eine Anzahl verschieden langer paralleler Rohre angebracht. Bei Schalleinfall in Richtung der Rohrachse erreichen die einzelnen Wellen die Kammer vor der Membran trotz der verschiedenen Rohrlängen gleichphasig, trifft jedoch der Schall seitlich auf das Richtelement, so entstehen Laufzeitdifferenzen zwischen frontal und seitlich einfallendem Schall, die zu Phasenverschiebungen und damit zur Auslöschung seitlich einfallender Schallanteile führen.

Beim *Rohrschlitzmikrofon* werden die parallelen Rohre durch ein seitlich geschlitztes oder gelochtes, vorne offenes Rohr ersetzt. Dieses Richtelement funktioniert analog dem des Röhrenmikrofons.

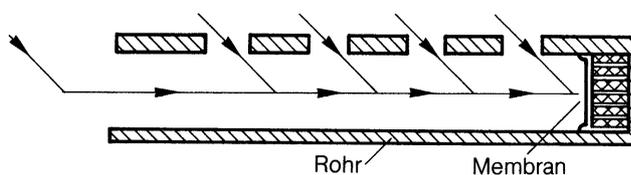
Röhrenmikrofon:

Abbildung 90: aus Webers 1989



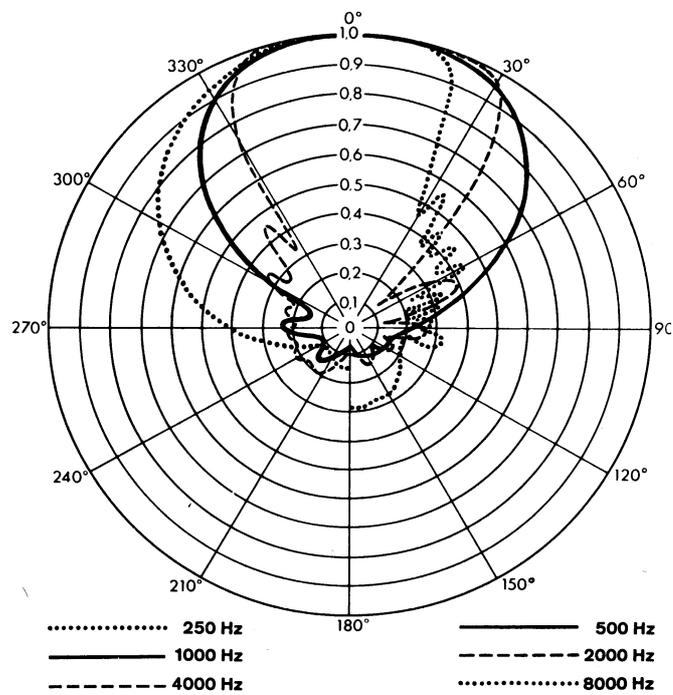
Rohrschlitzmikrofon:

Abbildung 91: aus Dickreiter 1995



Frequenzdiagramm eines Rohrschlitzmikrofons:

Abbildung 92: aus Webers 1989



Sehr starke Richtwirkungen lassen sich auch durch Bündelung des Schalls mittels *Parabolspiegeln* oder *akustischer Sammellinsen* erreichen. Aufgrund des engen Aufnahmebereichs und der großen Frequenzabhängigkeit starker Richtcharakteristiken werden alle diese Mikrofontypen für Musikaufnahmen kaum eingesetzt.

10 Aufnahmeverfahren

Für die Aufnahme eines Klangkörpers stehen grundsätzlich drei verschiedene Verfahren der Mikrofonierung zur Auswahl:

10.1 HAUPTMIKROFONIE

Bei der *Hauptmikrofonie* wird mit Hilfe eines gewählten Aufnahmeverfahrens das gesamte Klangbild aufgenommen, ohne das einzelne Bereiche des Klangkörpers durch zusätzliche Mikrofone verstärkt werden. Als Aufnahmeverfahren stehen reine Intensitäts-, Laufzeit- sowie gemischte Verfahren zur Verfügung, die sowohl mit Pegeldifferenzen als auch mit Laufzeitinformationen arbeiten. Jedes dieser Verfahren bringt unterschiedliche klangliche Resultate hervor und wird, da die Hauptmikrofonie Thema dieser Arbeit ist, im folgenden noch genauer erläutert. Es soll jedoch vorher noch kurz auf die beiden anderen Möglichkeiten der Mikrofonierung eingegangen werden.

10.2 HAUPT-STÜTZMIKROFONIE

Bei der *Haupt-Stützmikrofonie* werden zusätzlich zum Hauptmikrofonverfahren eine Reihe von *Stützmikrofonen* verwendet, um bestimmte Bereiche des Klangkörpers besser manipulieren zu können. Zumeist dienen Stützmikrofone zur Verstärkung einer Schallquelle.

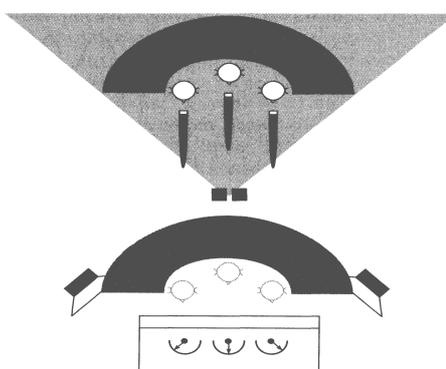
Die anliegenden Signale können aber auch verhallt, gefiltert oder in der Stereobasis bewegt werden, um zum Beispiel die räumliche Bewegung einer Schallquelle (Sänger, Instrument etc.) auf einer fiktiven Bühne darzustellen. Bei Verwendung einer großen Anzahl von Stützmikrofonen ist auch eine virtuelle Bewegung durch ein großes Ensemble möglich, um zum Beispiel den optischen Signalen einer Kamerabewegung eine akustische Entsprechung zu geben. Es besteht aber auch die Möglichkeit, mehrere Stereosysteme räumlich hintereinander anzuordnen, um zum Beispiel unerwünschte Raumtiefenstaffelung von Schallquellen zu verhindern.

Bei mehrkanaliger Aufnahme ergibt sich bei der Haupt-Stützmikrofonie außerdem die Möglichkeit einer nachträglichen Bearbeitung. Einige Punkte müssen jedoch bei diesem Aufnahmeverfahren beachtet werden:

10.2.1 Position der Phantomschallquelle

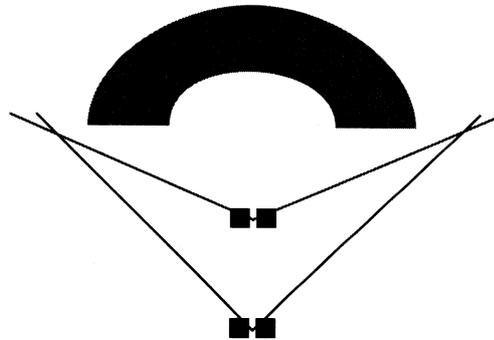
Da durch ein Hauptmikrofonverfahren diese Klangbereiche eines Klangkörpers bereits räumlich lokalisiert abgebildet werden, muß bei gestützten Klangquellen darauf geachtet werden, daß diesen der gleiche Ort auf der Stereobasis zugeordnet wird.

Abbildung 93: aus Hugonnet 1998



Bei Verwendung von mehreren zusätzlichen Stereostützen muß darauf geachtet werden, daß die jeweiligen Aufnahmewinkel der Systeme untereinander übereinstimmen.

Abbildung 94: aus Hugonnet 1998



10.2.2 Kammfiltereffekte

Bei der Verwendung mehrerer Stützmikrofone kann es durch laufzeitbedingte Phasenverschiebung identer Signale zu Kammfiltereffekten kommen.

10.2.3 Laufzeitdifferenzen

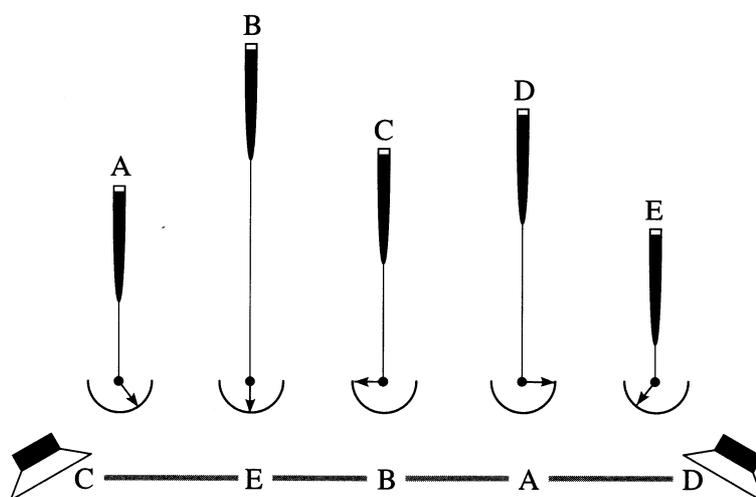
Durch die unterschiedliche räumliche Positionierung der verwendeten Mikrofonsysteme kommt es zu Laufzeitdifferenzen der einzelnen Signale. Bei konventioneller Stützmikrofontechnik treffen die Signale der Stützen, die in erster Linie Direktschall liefern, früher am Mischpult ein als die Signale des Hauptmikrofons. Aus diesem Grund dominieren die Intensitätsinformationen, die Phantomschallquellen scheinen „auf einer Schnur aufgereiht“. Wird aber das Signal des Stützmikrofons durch eine Zeitverzögerung nach den Direktschall des Hauptmikrofons gesetzt und somit wie eine erste Reflexion behandelt, so entsteht dadurch eine weitaus bessere tiefenräumliche Darstellung des Klangkörpers. Die Verzögerung in bezug zum Hauptmikrofon sollte ungefähr *20 ms* bis *30 ms* betragen. Es muß allerdings mit einem leichten Verlust von präziser Ortbarkeit der Schallquellen gerechnet werden. Man nennt dieses Mikrofonverfahren „*Raumbezogene Stützmikrofontechnik*“ nach Theile.

10.3 EINZELMIKROFONVERFAHREN

Beim *Einzelmikrofonverfahren* oder der *Polymikrofonie* stehen eine Reihe von nachträglichen Bearbeitungsmöglichkeiten zur Verfügung. Voraussetzung ist jedoch eine akustische Trennung (*Übersprechsdämpfung*) der aufgenommenen Kanäle. Diese muß umso stärker sein, je nachdem wie weit das resultierende Signal vom aufzunehmenden Signal zum Beispiel in der Panoramalage abweichen soll. Bei Wiedergabe einer annähernd ähnlichen räumlichen Situation wird eine Übersprechsdämpfung von *10 dB* bis *15 dB* als ausreichend angesehen. Sollen die Signale jedoch in ihrer räumlichen Lage stark verändert abgebildet werden, so ist eine vollkommene akustische Trennung der einzelnen Aufnahmebereiche ,zum Beispiel durch schalldichte Räume, notwendig.

Veränderung der räumlichen Position bei Polymikrofonie:

Abbildung 95: aus Hugonnet 1998



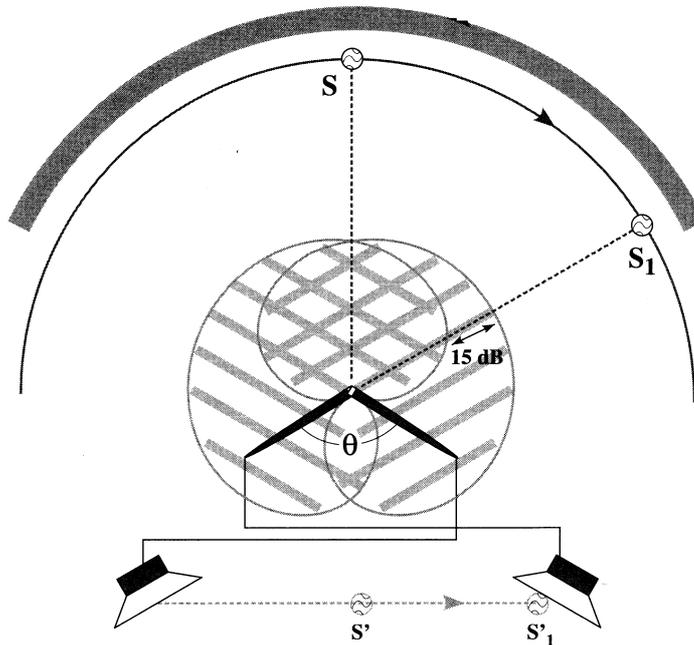
11 Die Verfahren der Hauptmikrofonie

11.1 KOINZIDENZMIKROFONIE

Bei der *Koinzidenzmikrofonie* werden nur Intensitätsunterschiede für eine Abbildung von Phantomschallquellen benutzt. Als Beispiel für dieses Verfahren wird eine Anordnung mit zwei Nierenmikrofonen gezeigt, deren Mikrofonkapseln so übereinander angeordnet sind, daß sich unter ihnen keine Laufzeitdifferenzen ergeben.

Schema einer Koinzidenzmikrofonanordnung:

Abbildung 96: aus Hugonnet 1998

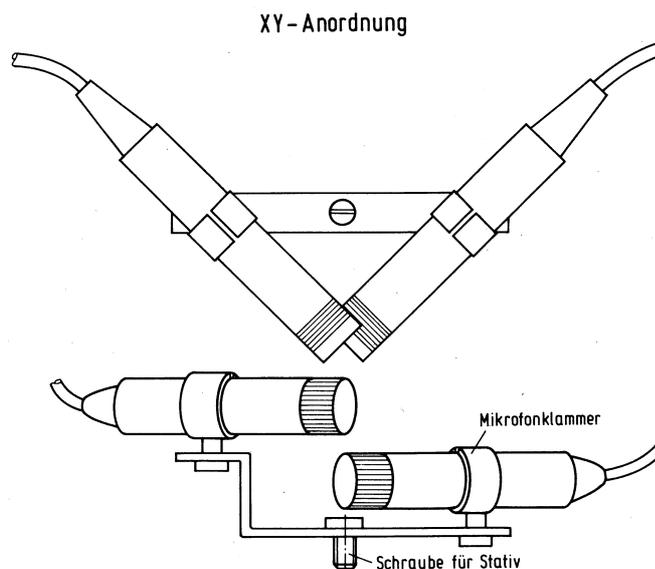


Bewegt sich eine Schallquelle entlang des Kreissegmentes nach rechts, so nimmt der von den Mikrofonen registrierte Intensitätsunterschied immer weiter zu, es kommt zu einer Bewegung der entsprechenden Phantomschallquelle in Richtung des rechten Lautsprechers. Bei einem Schallpegelunterschied von ungefähr 15 dB wird die äußerst rechte Abbildung der Phantomschallquelle erreicht. Bei den Verfahren der Intensitätsstereophonie unterscheidet man prinzipiell zwischen *XY-* und *MS-Anordnungen*.

11.1.1 XY-Verfahren

Beim *XY-Verfahren* werden zwei Mikrofonkapseln übereinander positioniert, wobei durch Veränderung des Öffnungswinkels verschiedene Aufnahmewinkel erzielt werden. Aufnahmewinkel und Versatzwinkel der Mikrofone verlaufen entgegengesetzt. Der Aufnahmebereich vergrößert sich mit kleiner werdendem Winkel zwischen den Mikrofonen. Dieses Verfahren kann mit Nieren-, Achter- aber auch mit Kugelmikrofonen realisiert werden. Man verwendet dafür meist eine wie abgebildete Halterung.

Abbildung 97: aus Jecklin 1980

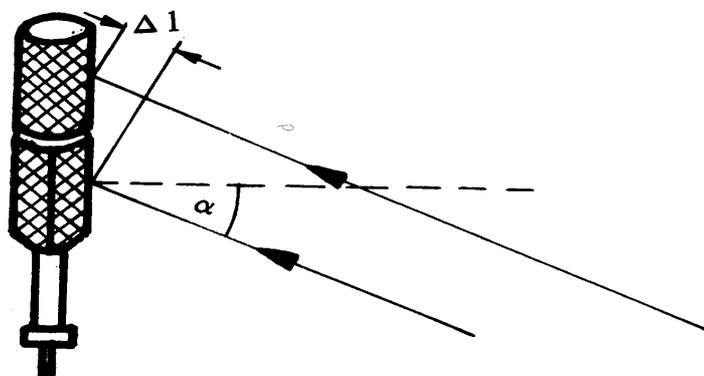


Das XY-Verfahren bietet eine gute Lokalisierbarkeit der Phantomschallquellen, allerdings eine mangelhafte Raamtiefenabbildung bedingt durch das Fehlen von Laufzeitinformationen. XY-Signale sind monokompatibel, da sich die Intensitätsdifferenzen der beiden Signale bei Überlagerung gegenseitig ausgleichen.

11.1.1.1 XY-Verfahren durch zwei Mikrofone mit Nierencharakteristik

Für dieses Verfahren wird entweder eine wie oben gezeigte Halterung oder ein vorgefertigtes Stereomikrofon verwendet. Um die verschiedensten Aufnahmewinkel zu ermöglichen, läßt sich die obere Kapsel um 90° gegen die untere verdrehen. Aus Abbildung 98 ist ersichtlich, daß es bei schrägem Schalleinfall, je nach Abstand der Mikrofonkapseln zu verschiedenen großen Laufzeitdifferenzen kommen kann.

Abbildung 98: aus Dickreiter 1997

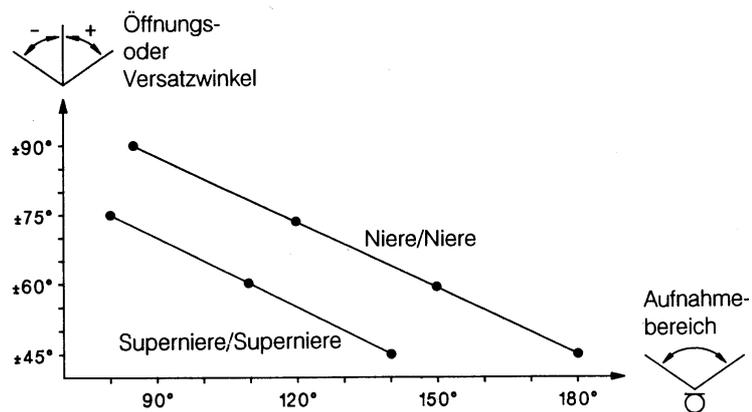


Öffnungswinkel von Mikrofonen in Relation zum Aufnahmewinkel:
(nach: Hugonnet 1998)

Öffnungswinkel	Aufnahmewinkel
80°	180°
90°	170°
100°	160°
110°	150°
120°	140°
130°	130°

Statt Nierenkapseln können auch solche mit Supernierencharakteristik verwendet werden. Die Grafik zeigt den Unterschied der beiden Mikrofontypen, in diesem Fall wird der halbe Öffnungswinkel der Mikrofone angegeben.

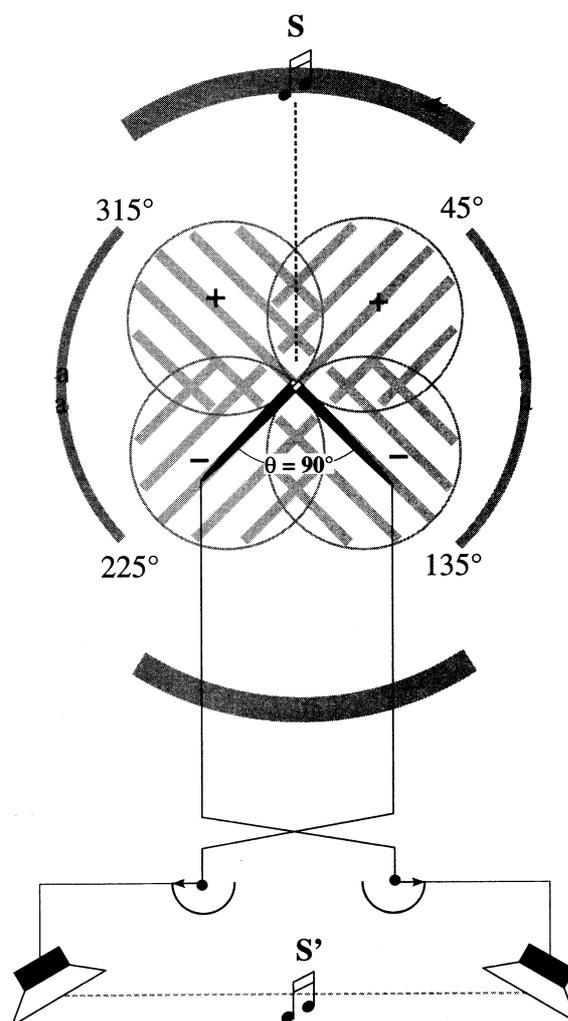
Abbildung 99 : aus Dickreiter 1995



11.1.1.2 XY-Verfahren durch zwei Mikrofone mit Achtercharakteristik

Dieses Verfahren wird *Stereosonic-System* oder auch *Verfahren nach Blumlein* genannt. Da bei einer Achterrichtcharakteristik bei einem Winkel von 70° eine Pegeldifferenz von 15 dB auftritt und somit die maximale Auslenkung der Phantomschallquelle erreicht wird, ergibt sich dadurch ein Aufnahmewinkel von 70°, der einem Öffnungswinkel von 90° entspricht.

Abbildung 100: aus Hugonnet 1998



Bei der Bewegung einer Schallquelle um das Mikrofonsystem um 360° kommt es zu unterschiedlichen Erscheinungsformen der Phantomschallquelle.

Verhalten der Phantomschallquelle in Abhängigkeit vom Schalleinfallswinkel:
(nach Hugonnet 1998)

$315^\circ - 45^\circ$	Die Signale der beiden Mikrofone sind in Phase – Bewegung der Phantomschallquelle von links nach rechts
$45^\circ - 135^\circ$	Gegenphasigkeit der Mikrofonsignale - Auslöschung
$135^\circ - 225^\circ$	Die Signale der beiden Mikrofone sind in Phase – Bewegung der Phantomschallquelle von links nach rechts
$225^\circ - 315^\circ$	Gegenphasigkeit der Mikrofonsignale - Auslöschung

Da die Summe der beiden Signale identisch ist, besitzt die Phantomschallquelle bei ihrer peripheren Bewegung eine konstante Lautstärke. Außerdem ergeben sich bei der Aufnahme kaum Frequenzverfärbungen bedingt durch die Charakteristik eines Achtermikrofons. Die Nachteile dieser Technik bestehen in einem nichtveränderbaren Aufnahmewinkel, bauartbedingt kommt es zu einer schlechteren Wiedergabe von tiefen Frequenzen ab einer Frequenz von etwa 200 Hz , Probleme können sich weiters durch die verschiedenen räumlichen Richtungen der Phantomschallquelle ergeben.

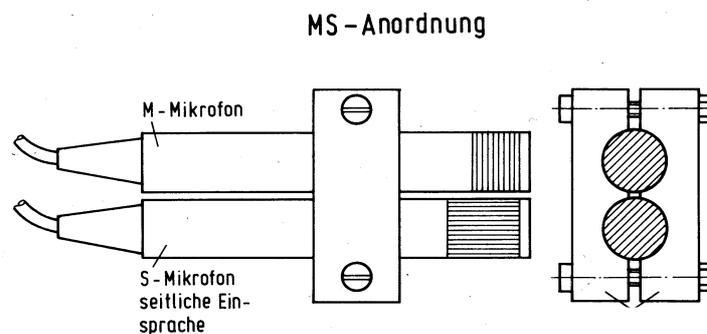
11.1.1.3 XY- Verfahren durch zwei Mikrofone mit Kugelcharakteristik

Zwei Kugelkapseln werden übereinander so angebracht, daß sie zueinander einen Winkel von 90° bilden. Durch die frequenzabhängige Richtcharakteristik eines Druckempfängers kann dieses System ebenfalls für Stereoaufzeichnung verwendet werden. Die Vorteile liegen in einer sehr ausgeglichenen Abbildung der Schallquelle über den gesamten Frequenzbereich, sowie im Fehlen des Nahbesprechungseffektes, wie er nur bei Druckgradientenempfängern auftritt. Nachteilig wirkt sich jedoch die relativ matte räumliche Abbildung des Klangkörpers aus.

11.1.2 MS-System

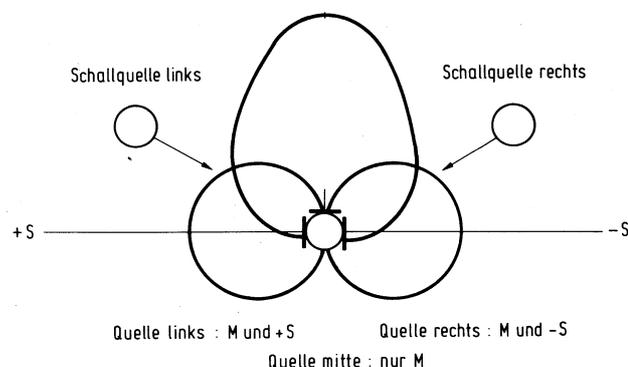
Das *MS-System* arbeitet ebenfalls nach dem Koinzidenzprinzip und setzt sich aus einem Mikrofon mit beliebiger Richtcharakteristik sowie einem zweiten Mikrofon mit Achterrichtcharakteristik zusammen. Man verwendet dazu entweder vorgefertigte MS-Mikrofone oder eine wie abgebildete Halterung:

Abbildung 101: aus Jecklin 1980



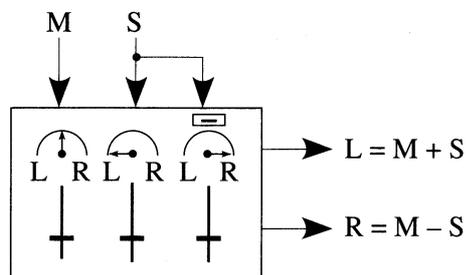
Bei der XY-Anordnung wird der Aufnahmewinkel durch den Versatzwinkel der Mikrofone bestimmt, beim MS-System geschieht dies durch Veränderung des Pegelanteiles des S (Seiten-Signals) im Verhältnis zum M (Mitten-Signal).

Abbildung 102: aus Jecklin 1980



Für die Aufzeichnung eines MS-Signals werden drei Monokanäle benötigt.

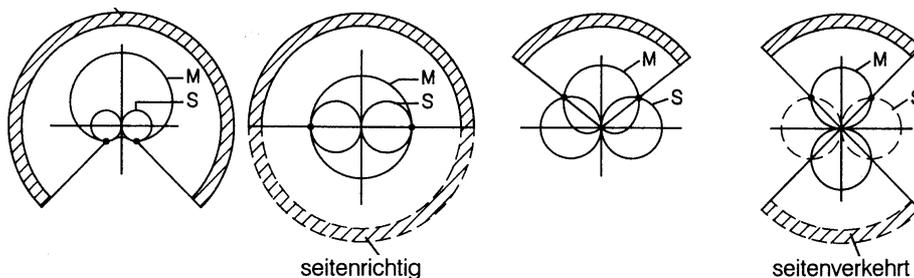
Abbildung 103: aus Hugonnet 1998



Der erste Kanal nimmt das Mittensignal auf, die beiden anderen Kanäle das Seitensignal, jedoch einmal phasenrichtig und einmal phasenverkehrt. Aus Summen- und Differenzbildung von Mitten- und Seitensignal werden die Signale links und rechts gewonnen.

Um den Aufnahmewinkel des MS-Systems einzustellen, wird das Seitensignal üblicherweise in einer Relation von -6 dB bis $+3\text{ dB}$ zum Mittensignal variiert. Je nach verwendeter Richtcharakteristik für das Mittensignal ergeben sich auch die maximal möglichen Aufnahmewinkel dieses Systems. Der maximale Aufnahmebereich läßt sich durch die Schnittpunkte der Richtcharakteristiken von M- und S-Signal darstellen.

Abbildung 104 : aus Dickreiter 1995



Die Niere als Mittensignal ergibt einen maximalen Aufnahmewinkel von 270° , eine Kugel einen Winkel von 180° , bei Verwendung einer Acht als Mittensignal beträgt der maximale Aufnahmewinkel 90° .

11.1.2.1 Vorteile des MS-Systems:

Die Veränderung des Aufnahmewinkels ist ohne lokale Ortsveränderung der Mikrofone vom Mischpult aus möglich. Bei mehrkanaliger Aufnahme läßt sich der Aufnahmebereich nachträglich variieren. Bedingt durch die Eigenschaften einer Achtercharakteristik ergibt sich ein einigermaßen linearer Frequenzgang bei der Übertragung. Das Monosignal ergibt sich direkt aus dem Mittensignal.

11.1.2.2 Nachteile des MS-Systems:

Durch die Achterrichtcharakteristik kommt es zu einer bauartbedingten Beeinträchtigung bei der Wiedergabe sehr tiefer Frequenzen. Signale außerhalb des Aufnahmebereiches sind bei der Wiedergabe delokalisiert. Bei Verwendung einer Mikrofonanordnung ist oft ein externer Wandler für das S-Signal nötig, da die meisten Mischpulte nicht über die Möglichkeit einer Phasenumkehr eines Eingangssignales verfügen.

11.1.3 Groß AB(C)-Technik in einem nahen Abstand zum Klangkörper

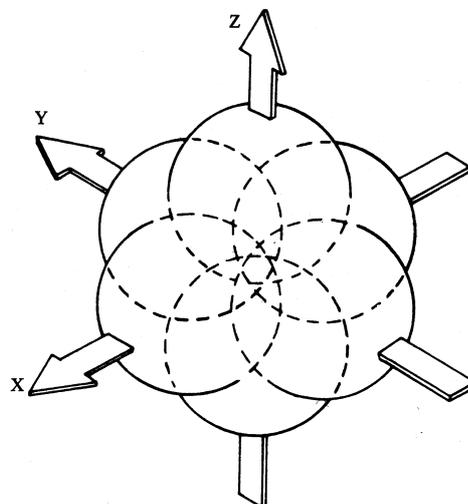
Es werden zwei Mikrofone (A, B), zumeist mit Kugelrichtcharakteristik, in einem sehr großen Abstand voneinander vor einem Klangkörper aufgestellt. Ein drittes Mikrofon (C) kann als Stützmikrofon in der Mitte des Klangkörpers aufgestellt werden, um einem „Loch“ in der Stereobasis vorzubeugen. Durch die großen Laufzeit- und Pegelunterschiede zwischen den Mikrofonensystemen ergeben die Laufzeitdifferenzen keine Richtungsinterpretation, daher erfolgt die Schallquellenortung nur aufgrund von Pegelunterschieden. Aus diesem Grund wird dieses Verfahren der Intensitätsstereophonie zugeordnet.

11.1.4 Spezialanordnungen für Intensitätsstereophonie

Eine weitere Bauform eines Koinzidenzmikrofons ist das *Soundfield-Mikrofon*. Es besteht aus drei Mikrofonen mit Achterrichtcharakteristik, diese werden in den drei Raumkoordinaten angeordnet. Die unterschiedlichen Pegelanteile und Phasendifferenzen der drei Mikrofonensysteme können zu einem einzigen Signal zusammengeschaltet werden, welches verschiedenste Richtcharakteristiken wie Kugel, Acht und Niere, sowie die verschiedensten Zwischenformen ermöglicht. Eine räumliche Ausrichtung ist ebenfalls durch unterschiedliche Pegelanteile der einzelnen Signale möglich.

Ausrichtung der Achterrichtcharakteristiken bei einem Soundfield-Mikrofon:

Abbildung 105: aus Dickreiter 1997



Bei der *Quadromikrofonie* werden durch zwei übereinandergelagerte Stereosysteme Klanginformationen aus vier Raumkoordinaten übertragen.

Das *Orthophonieverfahren* verwendet eine Anordnung von vier Mikrofonen, eine Kugel und drei Achter, um den Raum in allen Richtungen abzutasten. Die Wiedergabe erfolgt mit einer Anzahl horizontaler und vertikaler Lautsprecher.

Beim *Eidophonieverfahren* wird durch eine Schaltung ein rotierendes Mikrofonsystem simuliert, das den Raum in allen Richtungen abtastet. Die Rotationsfrequenz muß dabei mindestens doppelt so hoch sein wie die höchste im Signal vorkommende Frequenz.

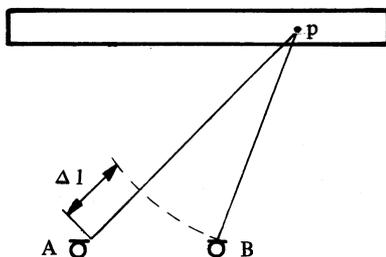
Da diese Verfahren mit einem sehr hohen technischen Aufwand verbunden sind, werden sie eher nur für experimentelle Zwecke eingesetzt.

11.2 LAUFZEITSTEREOPHONIE

Zwei Mikrofone werden in einem bestimmten Abstand voneinander aufgestellt. Die Richtungslokalisierung der resultierenden Phantomschallquellen erfolgt durch die zwischen den Mikrofonen auftretenden Laufzeitdifferenzen.

Darstellung der Laufzeitdifferenz eines Signals zweier Mikrofone:

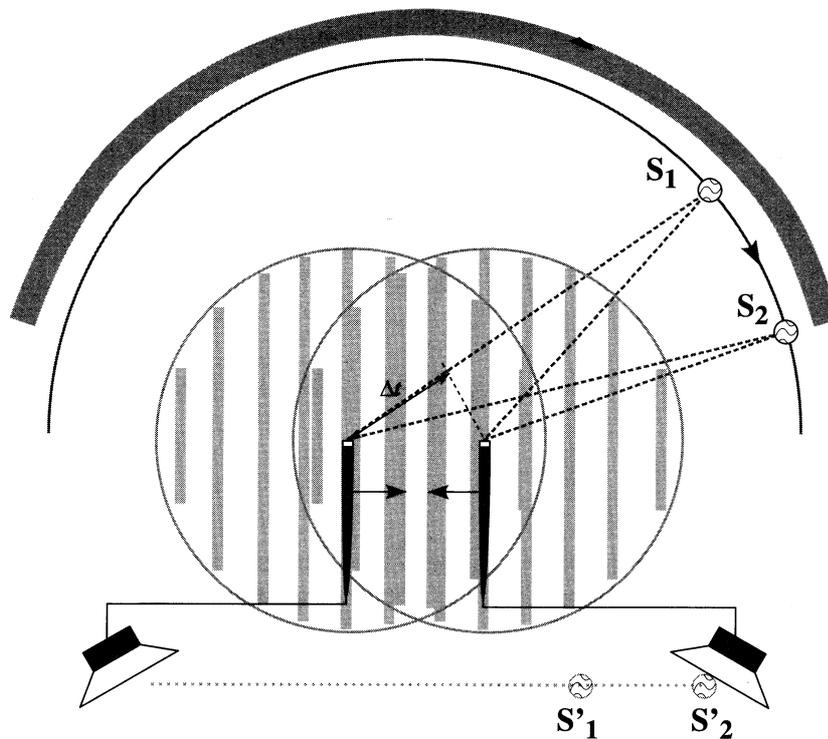
Abbildung 106: aus Dickreiter 1997



11.2.1 Klein AB-Verfahren

Beim *Klein AB-Verfahren*, oft auch nur als *AB-Verfahren* bezeichnet, werden zwei Druckempfänger in einem größeren Abstand vor einem Klangkörper aufgestellt. Der Abstand zwischen den Mikrofonen variiert zwischen *25 cm* und *50 cm*. Bei Verkleinerung des Mikrofonabstandes vergrößert sich der Aufnahmewinkel.

Abbildung 107: aus Hugonnet 1998



Zusammenhänge zwischen Mikrofonabstand und Aufnahmewinkel:
(nach: Hugonnet 1998)

<i>Abstand zwischen den Mikrofonen</i>	<i>Resultierender Aufnahmewinkel</i>
<i>50 cm</i>	<i>130°</i>
<i>45 cm</i>	<i>140°</i>
<i>40 cm</i>	<i>150°</i>
<i>35 cm</i>	<i>160°</i>
<i>30 cm</i>	<i>170°</i>
<i>25 cm</i>	<i>180°</i>

Das Klein AB-System verfügt über eine große Abbildungsbreite, eine gute Raumtiefenwiedergabe und eine durch die Verwendung von Druckempfängern bedingte große Linearität der Frequenzwiedergabe. Nachteilig wirkt sich die ungenauere Links-/Rechts-Zuordnung im Vergleich zum Koinzidenzverfahren aus. Die Mikrofonanordnung wird im allgemeinen im Diffusfeld aufgestellt, daher kommt es kaum zu Kammfiltereffekten. Diese treten aber auf, wenn das Signal als Summe von linkem und rechtem Kanal gebildet wird, daher ist das Verfahren nicht monokompatibel.

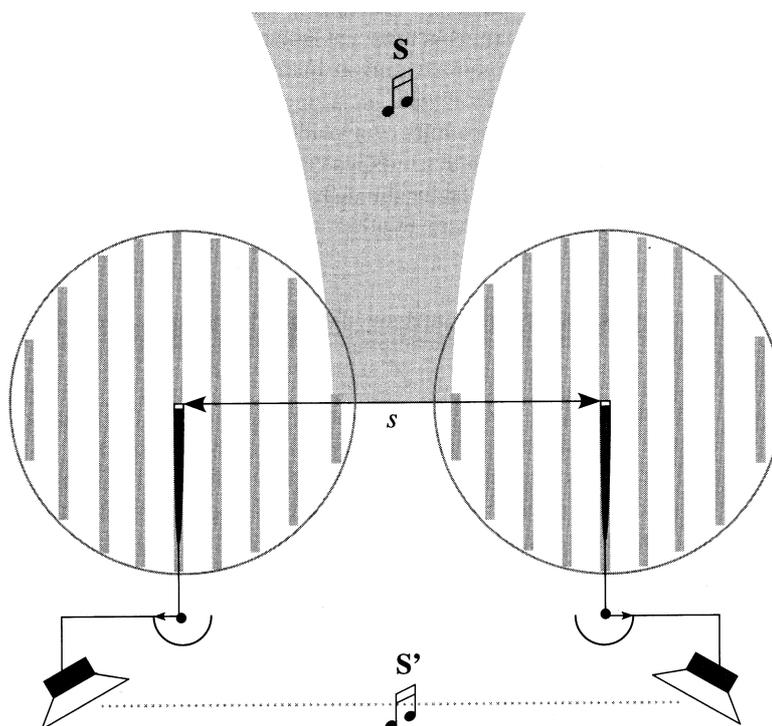
11.2.2 Klein ABC-Verfahren

Bei den praktischen Versuchen zu dieser Arbeit wurde auch eine Mikrofonanordnung verwendet, die aus drei Mikrofonen mit Kugelrichtcharakteristik besteht. Die Mikrofone bildeten ein gleichseitiges Dreieck und hatten voneinander einen Abstand von 50 cm . Dieses Verfahren arbeitet im Prinzip mit der Übertragung von Laufzeitdifferenzen, jedoch wird durch die dritte Mikrofonkapsel noch eine zusätzliche Intensitätsinformation in Richtung der verlängerten vorderen Schenkel des Dreiecks hinzugefügt. Aufgrund der Anordnung der Mikrofone wurde dieses Verfahren als Klein ABC-Verfahren bezeichnet. Da dabei sowohl Laufzeit- als auch Intensitätsunterschiede eine Rolle spielen, kann es auch als eine Mischform zwischen Koinzidenz- und Laufzeitstereophonie bezeichnet werden.

11.2.3 Groß AB-Verfahren für einen schmalen Aufnahmebereich

Zwei Druckempfänger werden in einem großen Abstand voneinander vor einem Klangkörper aufgestellt. Da für eine Richtungsinformation Laufzeitunterschiede nur innerhalb bestimmter Grenzen maßgeblich sind, ergibt sich bei diesem Verfahren ein relativ schmaler Aufnahmebereich für eine korrekte tiefenräumliche Klangabbildung.

Abbildung 108: aus Hugonnet 1998



Das *Groß AB-Verfahren* eignet sich vor allem für weit entfernte Klangkörper oder auch für eine besonders ausgeprägte tiefenräumliche Wiedergabe einer Schallquelle. Da bei dieser Aufstellung der Mikrofone auch Intensitätsunterschiede auftreten, kann man es als eine Mischform von Laufzeit- und Intensitätsverfahren ansehen.

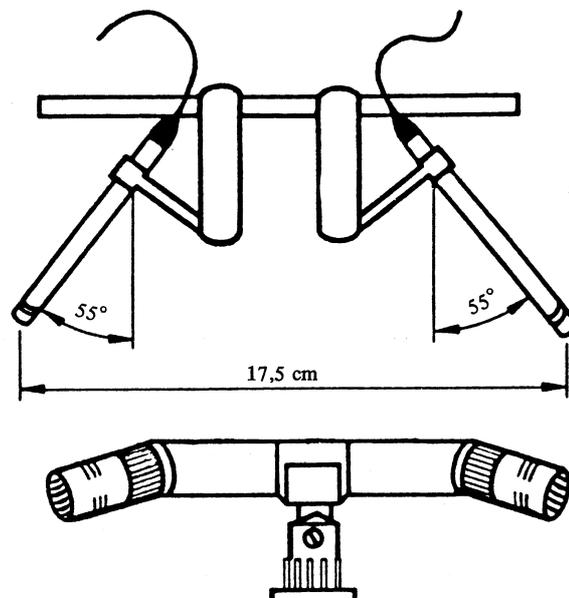
11.3 NAH-KOINZIDENZMIKROFONIE

Anordnungen für *Nah-Koinzidenzmikrofonie* bestehen aus zwei Mikrofonen in einem bestimmten Abstand, die zueinander einen variablen Öffnungswinkel einnehmen. Aus dieser Anordnung ergeben sich Intensitäts- und Laufzeitunterschiede, die zusammen die Richtungsinformation bei elektroakustischer Wiedergabe ausmachen. Für Nah-Koinzidenzmikrofonie können Mikrofone mit Cardioid-, Hypercardioid- oder Infracardioidkapseln verwendet werden.

11.3.1 Nah-Koinzidenzmikrofonie mit Cardioidkapseln

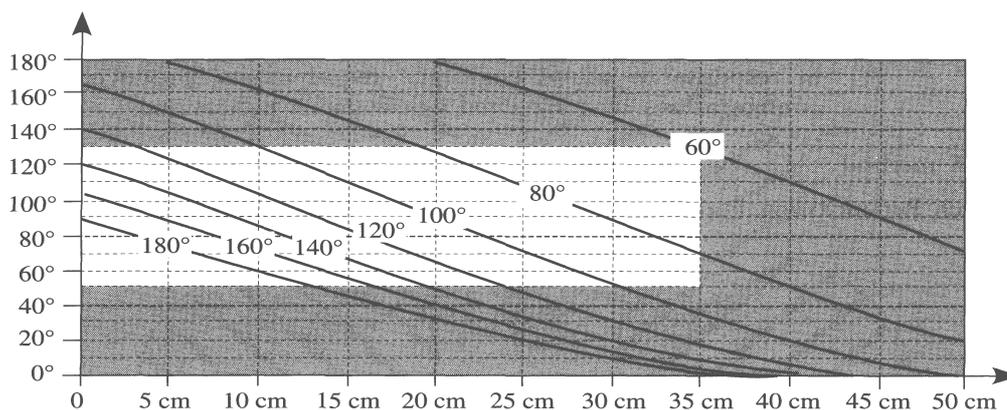
Bei Verwendung von Mikrofonen mit Nierencharakteristik werden Öffnungswinkel zwischen 50° bis 130° sowie Distanzen der Mikrofonensysteme bis 35 cm verwendet. Die bekannteste Technik der Nah-Koinzidenzmikrofonie ist das sogenannte *ORTF-Verfahren*.

Abbildung 109: aus Dickreiter 1997



Den Zusammenhang zwischen Öffnungswinkel θ , Abstand der Mikrofonkapseln in Relation zum Aufnahmewinkel zeigt folgende Grafik nach Mike Williams:

Abbildung 110: aus Hugonnet 1998



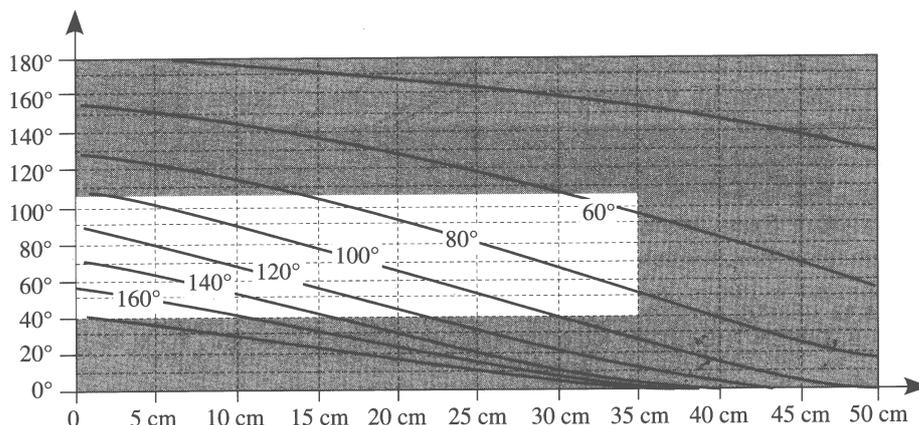
Einige international gängige Verfahren mit Öffnungswinkel und Mikrofonabstand:
(nach Hugonnet 1998)

Bezeichnung	Herkunft	Mikrofonabstand	Öffnungswinkel
NOS	Holländischer Rundfunk	30 cm	80°
OLSON	Herkunft nicht angegeben	20 cm	135°
ORTF	Französischer Rundfunk	17,5 cm	110°
RAI	Italienischer Rundfunk	21 cm	90°
DIN	Vorschlag für einen deutschen Standard	20 cm	90°

11.3.2 Nahkoinzidenzmikrofonie mit Hypercardioidkapseln

Das Nahkoinzidenzmikrofonverfahren läßt sich auch mit zwei Mikrofonen in Hypercardioid-Richtcharakteristik realisieren. Es wird ein Öffnungswinkel im Bereich von 40° bis 105° und ein Abstand von max. 35 cm verwendet. Die Grafik nach Williams zeigt den Zusammenhang von Abstand, Öffnungswinkel und resultierendem Aufnahmewinkel. (nach: Hugonnet 1998)

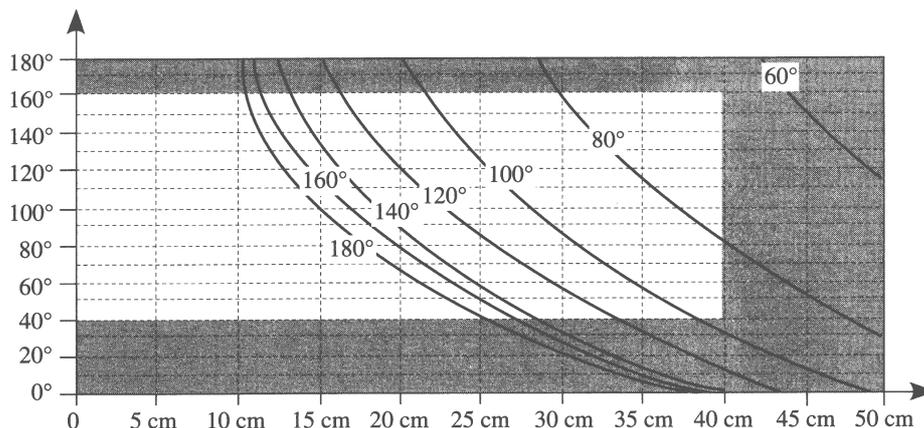
Abbildung 111: aus Hugonnet 1998



11.3.3 Nahkoinzidenzmikrofonie mit Infracardioidcharakteristiken

Bei diesen Mikrofontypen wird ein Öffnungswinkel zwischen 40° und 160° sowie ein Maximalabstand der Kapseln von 40 cm verwendet. Grafik nach Williams für die verschiedenen Werte:

Abbildung 112: aus Hugonnet 1998



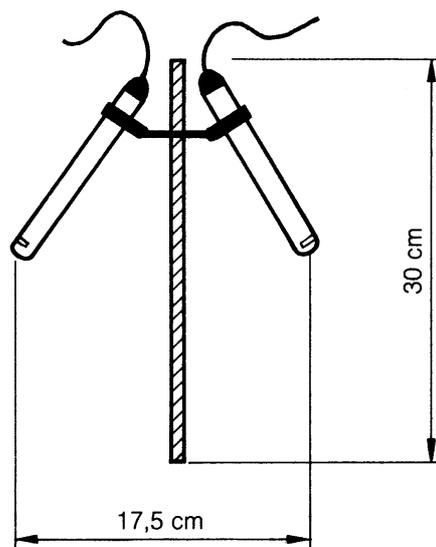
11.4 TRENNKÖRPERSTEREOPHONIE

Zwischen zwei Druckempfängern in einem Abstand von 17 cm bis 20 cm , ungefähr dem menschlichen Ohrabstand entsprechend, befindet sich ein Trennkörper. Dieses Hindernis verursacht frequenzabhängige Beugungserscheinungen des auftreffenden Schalls. Dieser Trennkörper kann aus verschiedenen Materialien bestehen, seine Bauweise kann von einer einfachen Scheibe bis zur exakten Nachbildung eines menschlichen Kopfes reichen. Als Beispiel für eine progressive Annäherung der Ausformungen von Trennkörpern an die menschliche Kopfform werden drei gängige Typen beschrieben: Die Jecklin-Scheibe, das Kugelflächenmikrofon sowie das Kunstkopfsystem.

11.4.1 Jecklin-Scheibe oder OSS-System

Die *OSS-Scheibe* (*Optimales Stereo-Signal*) oder *Jecklin-Scheibe* hat 30 cm Durchmesser und besteht aus einem beidseitig mit Schaumstoff belegten harten Material. An den Seiten der Scheibe sind, leicht nach außen geneigte, Kugelmikrofone angebracht, die voneinander einen Abstand von $17,5\text{ cm}$ haben. Die Mikrofonkapseln liegen dabei auf einer gedachten Achse, die durch den Mittelpunkt der Scheibe verläuft.

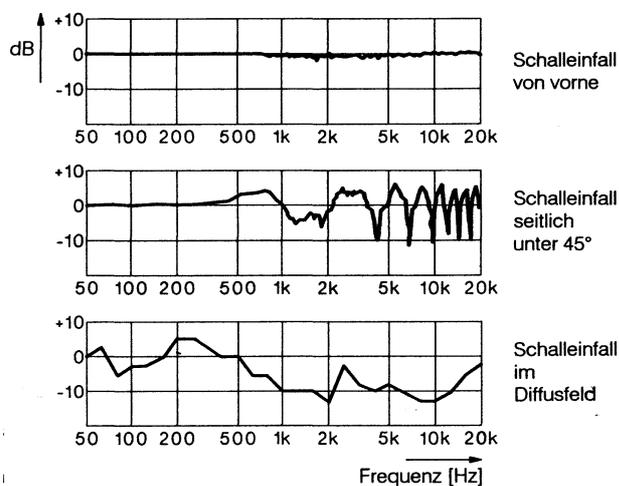
Abbildung 113: aus Dickreiter 1995



Bei seitlich einfallendem Schall kommt es zu kammfilterartigen Klangverfärbungen, da der auftreffende Schall durch die harte Scheibe trotz einer dämmenden Schaumstoffauflage reflektiert wird. Der Frequenzgang im Diffusfeld ist aber einigermaßen verfärbungsfrei. Da die Jecklin-Scheibe zumeist als Hauptmikrofonverfahren in einem größeren Abstand von der Schallquelle verwendet wird, resultiert daraus auch ein großer Diffusschallanteil, durch den die störenden Kammfiltereffekte kaum in Erscheinung treten.

Frequenzkurven der OSS-Scheibe bei unterschiedlichem Schalleinfall:

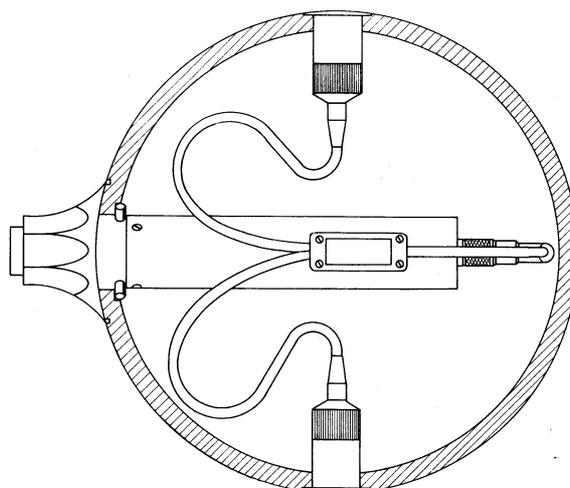
Abbildung 114: aus Dickreiter 1995



11.4.2 Das KFM- oder Kugelflächenmikrofon

Das bekannteste *Kugelflächenmikrofon* wird von der Firma *Schoeps* erzeugt und besteht aus einer reflektierenden Kunststoffkugel mit 20 cm Durchmesser. In der Kugel befinden sich zwei gegenüberliegende Druckempfänger, deren Membrane genau mit der Oberfläche der Kugel abschließen. Dazwischen ist eine Leuchtdiode angebracht, um die Ausrichtung des Mikrofons zu erleichtern.

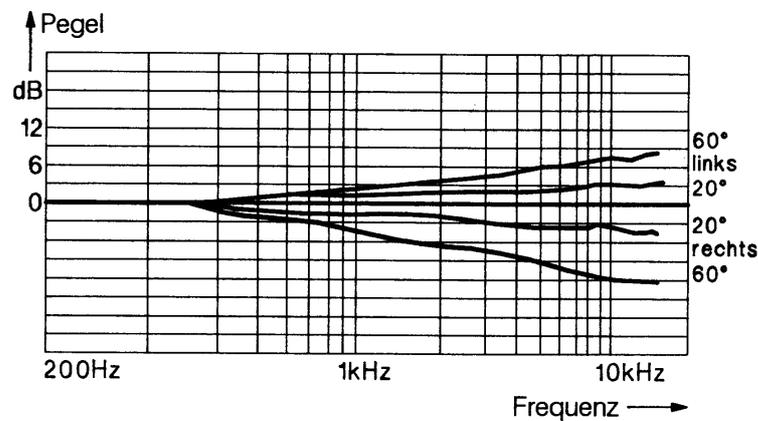
Abbildung 115: aus Dickreiter 1995



Das Kugelflächenmikrofon ergibt eine gute räumliche Abbildung der Schallquelle bei annähernd linearem Frequenzgang.

Frequenzgänge des KFM bei seitlichem Schalleinfall:

Abbildung 116: aus Dickreiter 1995



11.4.3 Kunstkopfsystem

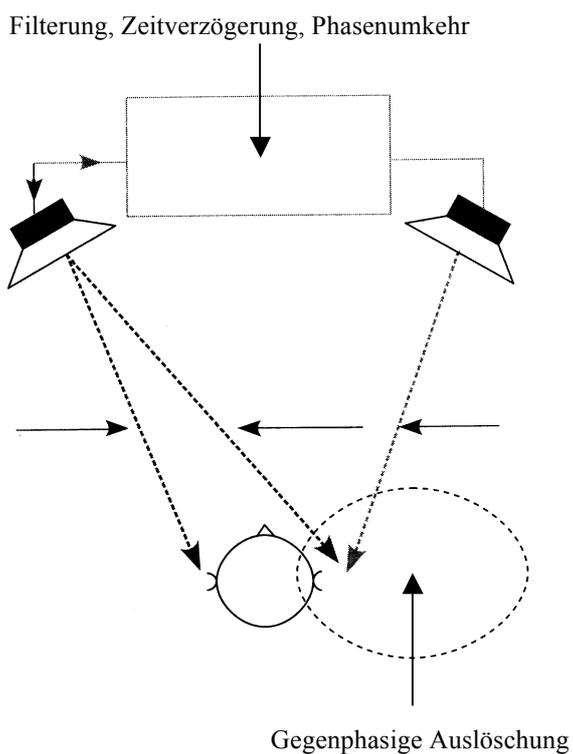
Bei Versuchen wurden Personen Miniaturmikrofone in die Gehörgänge eingesetzt. Die Wiedergabe dieser Signale mit Kopfhörer ergab bei denselben Testpersonen eine ausgesprochen realistische Abbildung der Schallquellen, ähnlich einem natürlichen Hörvorgang. Aufgrund dieser Erfahrungen wurde ein Trennkörper entwickelt, der die Form eines menschlichen Kopfes besitzt.

In den meisten Fällen ist der Klangeindruck eines *Kunstkopfsystems* unbefriedigend. Zum einen bereitet die Konstruktion eines für die verschiedensten Kopfformen einheitlich angepaßten Systems große Schwierigkeiten, zum anderen können Kunstkopfaufnahmen normalerweise nur mit Kopfhörer abgehört werden. Aus diesen Gründen haben sich Kunstkopfaufnahmen für Musikaufnahmen noch nicht durchsetzen können.

11.5 Übersprechkompensation

Stereoinformationen, die für Kopfhörerwiedergabe ausgelegt sind, können nicht adäquat durch ein Lautsprechersystem übertragen werden. Probleme ergeben sich durch die bereits erwähnte Serienschaltung der Raumübertragungsfunktionen sowie die durch Lautsprecher verursachte Übersprechung. (Signale, die nur für das linke Ohr bestimmt sind, gelangen durch den linken Lautsprecher auch an das rechte Ohr und umgekehrt.) Es wurden Verfahren der *Übersprechkompensation* entwickelt, die mittels Interferenzerscheinungen eine Auslöschung des unerwünschten Schallanteiles versuchen. Das am „falschen Ohr“ ankommende Signal hat, bedingt durch die menschliche Kopfform, eine längere Wegstrecke zurückzulegen als das am „richtigen Ohr“ eintreffende Signal. Die sich aus diesen Gründen ergebenden unterschiedlichen Laufzeitdifferenzen und Pegelunterschiede (abschattende Wirkung des Kopfes) ermöglichen eine Unterscheidung der eintreffenden Schallanteile. Nachfolgende Abbildung veranschaulicht das Prinzip: Ein Schallanteil des linken Lautsprechers wird gefiltert, zeitversetzt und mit umgekehrter Phasenlage über den rechten Lautsprecher wiedergegeben. Durch Interferenzerscheinungen löschen sich dieser modifizierte Schallanteil sowie der unerwünschte Schallanteil gegenseitig aus.

Abbildung 117: aus Hugonnet 1998



Dieses Verfahren verlangt sowohl einen gut schallisolierten Raum sowie auch einen präzisen Ort für die Hörwahrnehmung und hat sich, bedingt auch durch den höheren technischen Aufwand, nicht als eine gängige Wiedergabetechnik etablieren können.

12 Dokumentation

Zur Veranschaulichung der verschiedenen Hauptmikrofonverfahren ist der Arbeit eine CD mit Hörbeispielen beigelegt. Es wurden Aufnahmen eines kurzen Orchestersatzes mit verschiedenen Mikrofonverfahren und unterschiedlichen Trennkörpern hergestellt.

12.1 Musikstück:

Anton Webern: Sechs Stücke für Orchester, op. 6 (Fassung für Kammerorchester),
2. Satz

12.2 Ausführende:

Ensemble für Neue Musik der Abteilung 1 an der Universität für Musik u. darst. Kunst
in Graz

Dirigent: Edo Mii

12.3 Ort, Datum:

Aula der Kunstuniversität am 7. Mai 1999

12.4 Aufnahmetechnik:

Gerhard Nierhaus, Wolfgang Gaggl

12.5 Aufnahmeverfahren, Trennkörpersysteme:

Klein AB
Klein ABC
Groß AB
Groß ABC
XY
ORTF
3 Trennkörperverfahren
Kugelflächenmikrofon
2 Kunstkopfsysteme

12.6 Mikrofone, Trennkörper, Kunstkopfsysteme

Klein AB, Klein ABC, Groß AB, Groß ABC:

Mikrofontypen: AKG C 480 mit Kugelkapsel CK 62-ULS

XY, ORTF:

Mikrofontypen: AKG C 480 mit Nierenkapsel CK 61-ULS

Trennkörper:

Schaumstoffscheibe als OSS-System, linearer Keil, logarithmischer Keil: entwickelt von Dipl.-Ing. Franz Graf

Mikrofontypen: AKG C 480 mit Kugelkapsel CK 62-ULS

Kugelflächenmikrofon:

Schoeps-Kugel

Mikrofontypen: Firmeneigen

Kunstkopfsysteme:

Neumann:

Mikrofontypen: Firmeneigen

Head 2:

Mikrofontypen: Firmeneigen

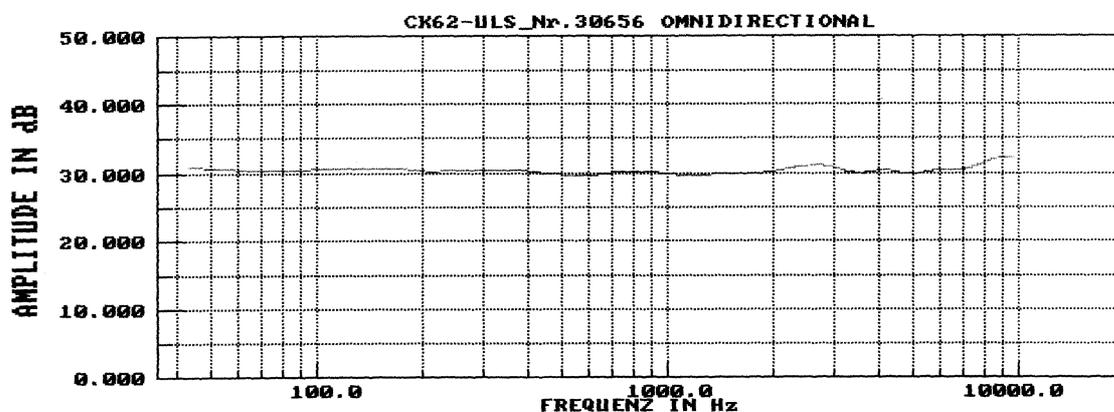
12.6.1 Kenndaten des Kondensatormikrofons AKG C 480

Die Werte beziehen sich auf die Position 0 dB des Eingangswahlschalters

Übertragungsbereich	20 Hz – 20.000 Hz
Leerlaufübertragungsfaktor bei 1.000 Hz	20 mV / Pa
Geräuschpegelabstand bez. auf 1 Pa	83 dB
Grenzschalldruckpegel für $k = 0,5 \%$	140 dB
Dynamikbereich	129 dB

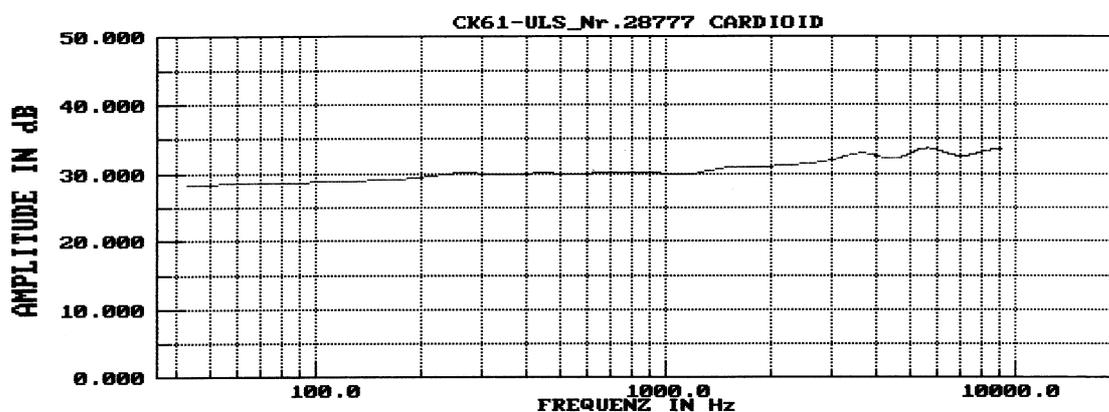
12.6.1.1 Frequenzdiagramm einer zufällig ausgewählten Kugelkapsel CK 62:

Abbildung 118



12.6.1.2 Frequenzdiagramm einer zufällig ausgewählten Nierenkapsel CK 61:

Abbildung 119

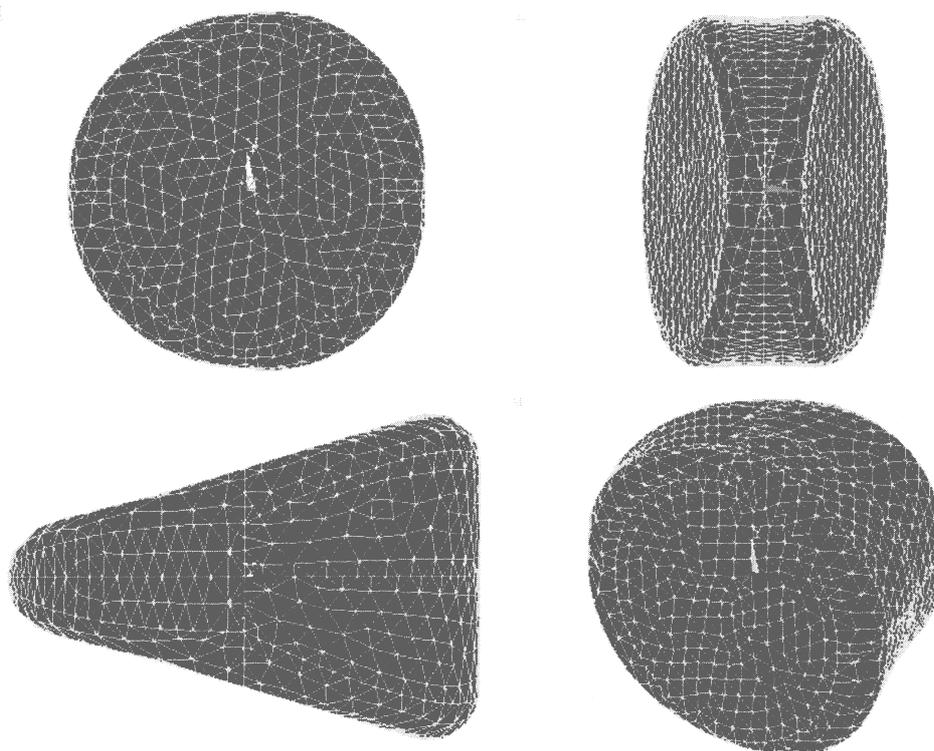


12.6.2 verwendete Trennkörper

Diese Trennkörper wurden von Dipl.-Ing. Franz Graf für Schallmessungen im Fahrzeuginnenraum entwickelt und für die Musikaufnahmen freundlicherweise zur Verfügung gestellt.

Linearer Keil aus mehreren Perspektiven:

Abbildung 120: Quelle: Dipl.-Ing. Franz Graf



Logarithmischer Keil:

Gleiche Bauweise wie der lineare Keil, jedoch verlaufen die Seitenflächen (von der schmalen zur breiten Seite) in einer logarithmische Linie.

Scheibe, als OSS System:

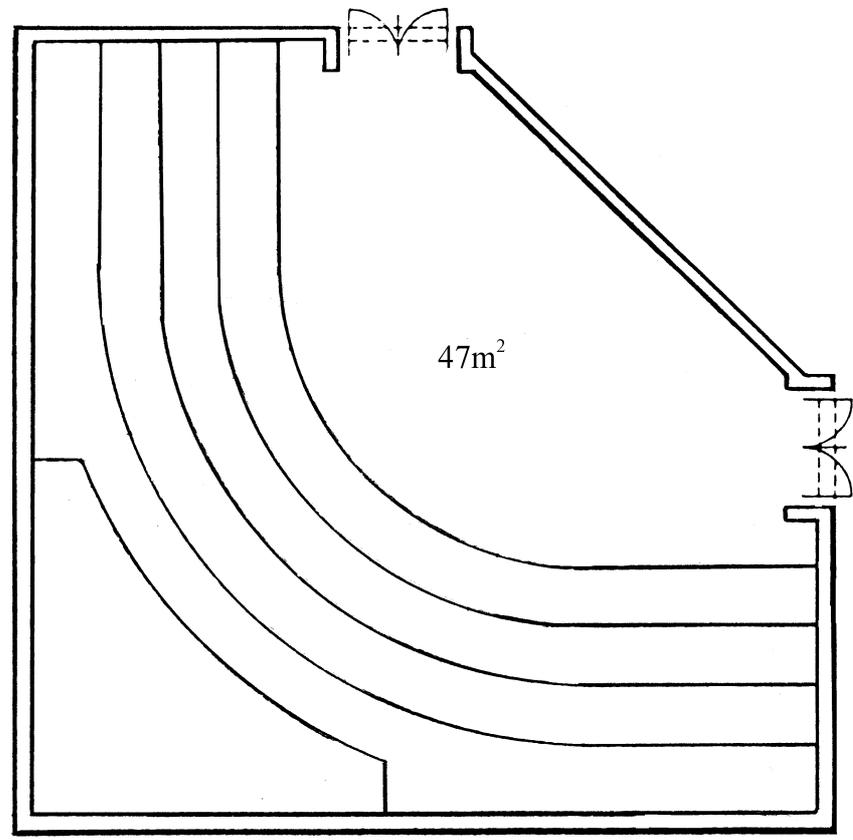
Schaumstoffscheibe mit 30 cm Durchmesser. Die Trennscheibe wurde im Gegensatz zur üblichen OSS-Scheibe ganz aus Schaumstoff gefertigt, um Kammfiltereffekte zu vermeiden.

R
2 GEIGE
90

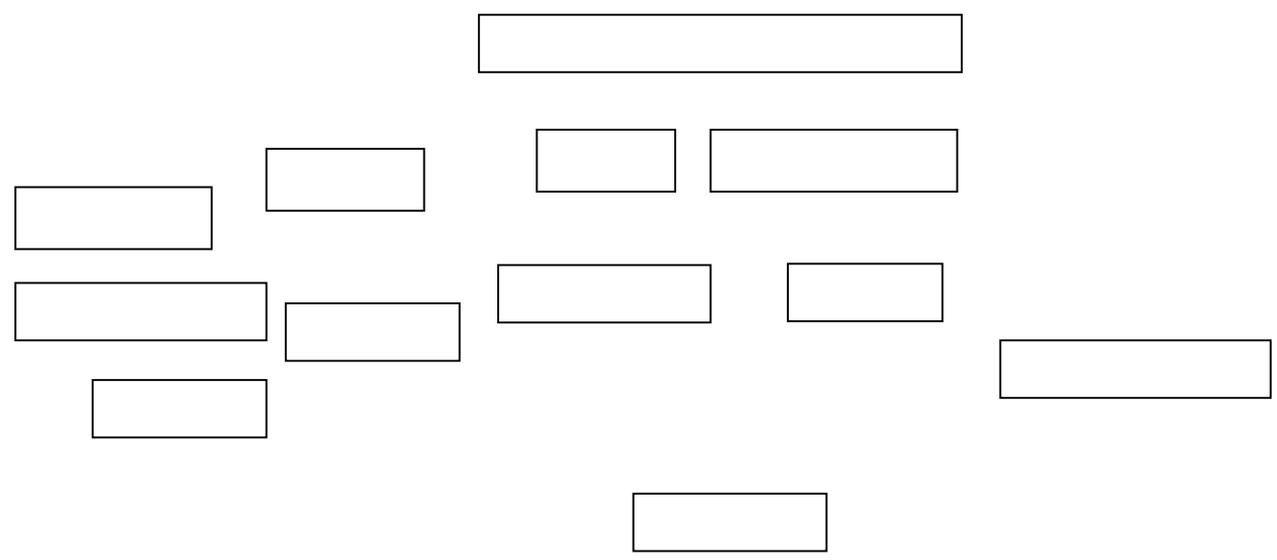
FLOIE BRATSCHEN HOBE SCHLAGWERK
OBOE KLARINETTE

KONTRABASS

12.7 Grundriss: Aufnahmeaum - Aula der Musikuniversität Graz
DIRIGENT



12.8 Positionen der Instrumentalgruppen und Mikronanordnungen



Die Musiker befanden sich zwischen den beiden Eingangstüren auf dem untersten Niveau der Aula. Durch die unvermeidliche Positionierung des Ensembles kann sich beim Abhören der Aufnahmen ein Eindruck leichter Linkslastigkeit ergeben.

Abstand zwischen Klavier und Kontrabass: 7,50 m.

Abstand zwischen Schlagzeug und den vordersten Streichern: 4 m.

Abstand zwischen Rückwand (Position der Schlagzeuge) und erster Stufe: 5,60 m

Höhe jeder Stufe: 18 cm

Tiefe jeder Stufe: 1,20 m

Die Mikrofone und Trennkörper, ausgenommen Groß AB, befanden sich unmittelbar hinter dem Dirigenten auf der ersten und zweiten Stufe. Die Höhe der Aufnahmepositionen betrug ,vom Niveau der jeweiligen Stufe aus gesehen, für die einzelnen Techniken:

Von Stufe 1:

Shöps-Kugel, Keile und OSS-Scheibe: ca 2,00 m.

Von Stufe 2:

Kunstkopf (Neumann): ca. 1,70 m

Kunstkopf (Head 2): ca 1,40 m

ORTF, XY, Klein AB, Klein ABC: ca. 1,50 m

This musical score page contains several systems of staves. The top system features two treble clef staves with complex rhythmic patterns, including triplets and sixteenth notes. The first staff has a dynamic marking of *f* and *ppp cresc.*, while the second staff has *ppp cresc.*. Above the first staff, there are markings for triplets and an *accel.* instruction. Below the first staff, measure numbers 40, 41, and 42 are indicated. The second system consists of three empty staves. The third system is a grand staff (treble and bass clefs) with a *ppp* marking in the treble clef. The fourth system is another grand staff with a *mf* marking in the treble clef and *ppp cresc.* in the bass clef. The fifth system is a grand staff with *ppp* markings in both the treble and bass clefs, and *ppp cresc.* in the bass clef. The sixth system is a grand staff with *pizz.* markings in both the treble and bass clefs, and *ppp cresc.* in the bass clef. The seventh system is a grand staff with *ppp cresc.* markings in both the treble and bass clefs.

4 Rascher (♩ = 184) rit. molto Tempo I (♩ = 160) 5

nimmt Piccolo *
nimmt Es-Klarinette
Es-Klar.

The musical score consists of several systems. The first system shows the Piccolo and Es-Klarinette parts. The Piccolo part starts with a dynamic of *f* and changes to *pp*. The Es-Klarinette part starts with *mf* and changes to *pp*. The second system shows the strings, with dynamics of *sfp* and *fff*. The third system shows the Piccolo and Es-Klarinette parts again, with dynamics of *f*, *pp*, and *sfff*. The fourth system shows the strings, with dynamics of *pp*, *fff*, and *sfff*. The score includes performance instructions such as *col legno* and *arco*. The tempo changes from *Rascher* (♩ = 184) to *Tempo I* (♩ = 160). The score is marked with a *rit.* and *molto* marking. The key signature is one flat (B-flat). The time signature is 3/4. The score is numbered 4 and 5. A note indicates that the Piccolo is added later in the original score.

* Piccolo in der Original - Stimme später hinzugefügt

d. $d_2 = d.$ **6** *accel.*

ff *mf* *p* *f* *ff* *fff*

col legno *col legno* *col legno* *col legno*

fff *fff* *fff* *fff*

pizz. *pizz.* *fff* *fff*

17 18 19 20

rit. 7 Schnell (♩ = 80) Piccolo

The score is divided into four measures: 21, 22, 23, and 24. Measure 21 features a Piccolo part with triplets of eighth notes and a dynamic of *fff*. The strings play a rhythmic pattern of eighth notes with a dynamic of *f*. The piano part has a complex texture with triplets and a dynamic of *fff*. Measure 22 continues the Piccolo and piano parts, with the strings playing a similar pattern. Measure 23 introduces a woodwind part with a dynamic of *pp* and a piano part with a dynamic of *p*. Measure 24 concludes the section with a Piccolo part, a woodwind part with a dynamic of *fff*, and a piano part with a dynamic of *fff*. The score includes various articulations such as *pizz.* and *tr.* (trill).

8

25 26 27

8

Detailed description of the musical score: The score is divided into two systems. The first system covers measures 25, 26, and 27. It features five staves. The top three staves are in treble clef, and the bottom two are in bass clef. Measure 25 has dynamics *ffffp* and *fff*. Measure 26 has dynamics *fff* and *ppp*. Measure 27 has dynamics *fff* and *ppp*. Trills are marked with *tr(h)*. The second system also covers measures 25, 26, and 27. It features five staves. The top two staves are in treble clef, and the bottom three are in bass clef. Measure 25 has dynamics *f* and *fff*. Measure 26 has dynamics *ppp* and *pp*. Measure 27 has dynamics *fff* and *ppp*. The score includes various musical notations such as slurs, trills, and dynamic hairpins.

13 Literatur

13.1 Verzeichnis der verwendeten Bücher

Adam, Max:	Raum und Bauakustik. Acoustique architecturale et acoustique des salles. Blauen. Schweitzer Baudokumentation. 1985. ISBN 3-907080-00-9
Blauert, Jens:	Räumliches Hören. Stuttgart. S. Hirzel Verlag. 1974. ISBN 3 7776 0250 7
Borucki, Hans:	Einführung in die Akustik. Mannheim. Wissenschaftsvlg., 3., erweiterte Auflage. 1989. ISBN 3-411-03188-3
Borwick, John (Hrsg.):	Sound Recording Practice. Oxford. Oxford University Press. 4. Auflage. 1996. ISBN 0-19-816608-7 (pbk.)
Cremer, Lothar; Müller, Helmut A.:	Die wissenschaftlichen Grundlagen der Raumakustik. Stuttgart. S. Hirzel Verlag. 2., völlig neubearbeitete Auflage. 1976. ISBN 3-7776-0317-1
Dickreiter, Michael:	Handbuch der Tonstudioteknik. Hrsg. Von der Schule für Rundfunktechnik. München. K.G. Saur Verlag. 6., verbesserte Auflage. 1997. ISBN 3-598-10588-6
Dickreiter, Michael:	Mikrofon-Aufnahmetechnik. Aufnahmeraum, Schallquellen, Mikrofone, Räumliches Hören, Mikrofon-Aufnahme. Stuttgart. S. Hirzel Verlag. 2., neubearbeitete und erweiterte Auflage. 1995. ISBN 3-7776-0529-8
Fasold, Wolfgang; Sonntag, Ernst; Winkler, Helgo:	Bau- und Raumakustik. Berlin. VEB Verlag für Bauwesen. 1987. ISBN 3-345-001-40-3
Fletcher, Neville H.; Rossing, Thomas D.:	The physics of musical instruments. New York. Springer Verlag. 1991. ISBN 0-387-94151-7
Graber, Gerhard:	Tontechnik und interdisziplinäres Sinnen. Eine grundlegende Fragestellung, Graz 1997 (Habilitationsschrift)
Hall, Donald E.:	Musical Acoustics. Belmont. Brooks/Cole Pub. 2. Auflage. 1991. ISBN 0-534-13248-0
Heckl, Manfred; Müller Helmut A. (Hrsg.):	Taschenbuch der Technischen Akustik. Berlin. Springer-Verlag. 2. Auflage 1994. ISBN 3-540-54473-9
Hugonnet, Christian; Walder, Pierre:	Stereophonic Sound Recording. Theory and Practice. Chichester John Wiley Verlag. 1998. ISBN 0 471 97487 0
Jecklin, Jürg:	Musikaufnahmen. Grundlagen – Technik – Praxis. München .Franzis Verlag. 1980. ISBN 3-7723-6701-1

Meyer, Erwin; Neumann, Ernst-Georg:	Physikalische und Technische Akustik. Eine Einführung mit zahlreichen Versuchsbeschreibungen. Braunschweig. Friedrich Vieweg Verlag. 2., berichtigte und erweiterte Auflage 1974. ISBN 3 528 1 8255 5
Meyer, Jürgen:	Akustik und musikalische Aufführungspraxis. Leitfaden für Akustiker, Musiker, Instrumentenbauer und Architekten. Frankfurt. Verlag Das Musikinstrument. 1972. ISBN 3 9201 12 06 7
Österreichischer Arbeitsring für Lärmbe- kämpfung (Hrsg.):	Psychoakustik. Gehörbezogene Lärmbewertung. Tagungsband des internationalen Seminars. 2., unveränderte Auflage. 1994. ISBN 3-901305-4-1
Pierce, John R.:	Klang. Musik mit Ohren der Physik. Heidelberg. Spektrum Verlag. 1985. ISBN 3-922508-72-3
Rieländer, Michael M. (Hrsg):	Reallexikon der Akustik. Frankfurt. Verlag Erwin Bochinsky. 1982. ISBN 3 920 112 84 9
Rossing, Thomas D.:	The Science of Sound. Reading Massachusetts. Addison-Wesley Publications. Neuauflage. 1983. ISBN 0-201-06505-3
Rossing, Thomas D.; Fletcher, Neville H.:	Principles of vibration and sound. New York .Springer Verlag. 1995. ISBN 0-387-94304-8
Trendelenburg, Ferdi- nand:	Akustik. Berlin. Springer-Verlag. 3. Umgearbeitete Auflage. 1961.
Webers, Johannes:	Tonstudioteknik. Schallaufnahme und –wiedergabe bei Rundfunk, Fernsehen, Film und Schallplatte. München. Franzis Verlag. 5., neu bearbeitete und erweiterte Auflage. 1989. ISBN 3-7723-5525-0
Zollner, Manfred; Zwi- cker, Eberhard:	Elektroakustik. Berlin. Springer Verlag. 3., verbesserte und erwei- terte Auflage. 1993. ISBN 3-540-56600-7
Zahlreiche Autoren	Die Physik der Musikinstrumente. Spektrum Akademischer Verlag, Spektrum der Wissenschaft. Deutsche Ausgabe von Scientific Ame- rican.
Zahlreiche Autoren	Physiologie der Sinne. Spektrum Akademischer Verlag, Spektrum der Wissenschaft. Deutsche Ausgabe von Scientific American.

13.2 Artikelsammlung

AES-Preprints

MAPPE 1

1) Early Reflections and Reverberant Field Distribution in Dual Microphone Stereophonic Sound Recording Systems

Michael Williams
Paris, France

Presented at
the 91st Convention
1991 October 4-8
New York

2) Determining the Psychoacoustic Factors of Loudspeaker Reproduction in Listening Rooms

Gerhard Spikofsky, Norbert Wilinsky,
Institut für Rundfunktechnik GmbH., Munich, Germany

Presented at
the 92nd Convention
1992 March 24-27
Vienna

3) Standart Stereo Recording Techniques in Non-Standard Situations

Albert G. Swanson
Location Recording, Seattle, Washington, United States

Presented at
the 92nd Convention
1992 March 24-27
Vienna

4) Improved Possibilities of Binaural Recording and Playback Techniques

K. Genuit, H. W. Gierlich, U. Künzli,
HEAD Acoustics GmbH., Herzogenrath, Germany

Presented at
the 92nd Convention
1992 March 24-27
Vienna

5) The Sound of the Orchestra

Jürgen Meyer
Physikalische-Technische Bundesanstalt, Braunschweig, Germany

Presented at
the 92nd Convention
1992 March 24-27
Vienna

6) Obtaining the Best Performance from Wireless Microphones

J. Edwin Somers
Audio Services Corp., North Hollywood, California, United States

Presented at
the 92nd Convention
1992 March 24-27
Vienna

7) More Advanced Models for Silicon Condenser Microphones

Joseph Maisano
Departement d`electricité, EPFL, Lausanne, Switzerland

Presented at
the 92nd Convention
1992 March 24-27
Vienna

**8) Frequence Dependent Hybrid Microphone
Arrays for Stereophonic Sound Recording**

Williams Michael
Consultant Audio Engineer, Paris, France

Presented at
the 92nd Convention
1992 March 24-27
Vienna

9) Wireless Microphone Systems with a High Channel Density

Stefan Frese
AKG Akustische u. Kino-Geräte GmbH., Vienna, Austria

Presented at
the 92nd Convention
1992 March 24-27
Vienna

10) A Matrix Pressure Triplet for Full Surround Stereophonic Pickup

André L.G. Defossez
Brussels, Belgium

Presented at
the 92nd Convention
1992 March 24-27
Vienna

11) Microphone Arrays Optimized for Music Recording

Wieslaw R. Woszczyk
Faculty of Music, McGill University, Montreal, Canada

Presented at
the 92nd Convention
1992 March 24-27
Vienna

12) Room Impression, Reverberance, and Warmth in Rooms and Halls

David Griesinger
Lexicon
Waltham, MA 02154, USA

Presented at
the 93rd Convention
1992 October 1-4
San Francisco

13) Applications of Blumlein Shuffling to Stereo Microphone Techniques

Michael A. Gerzon
Technical Consultant
Oxford, UK

Presented at
the 93rd Convention

1992 October 1-4
San Francisco

14) Using Interference Tube Microphones in the Reel World

Edwin J. Somers
Audio Services Corporation
North Hollywood, CA 91602, USA

Presented at
the 93rd Convention
1992 October 1-4
San Francisco

15) Microphone Techniques for 3-Channel Stereo

Michael A. Gerzon
Technical Consultant

Presented at
the 93rd Convention
1992 October 1-4
San Francisco

16) New Acoustic Sensors

G. M. Sessler
Technical University Darmstadt
Darmstadt, Germany

Presented at
the 94th Convention
1993 March 16-19
Berlin

17) The Model of a Highly Directional Microphone

Detlev Ruser, Adam Witkowski
Technical University of Gdansk
Gdansk, Poland

Presented at
the 94th Convention
1993 March 16-19
Berlin

18) A Method of Remote-controlling the Polar Pattern of a Condenser Microphone with Standard Phantom Powering

Stephan Peus, Otmar Kern
Georg Neumann GmbH
Berlin, Germany

Presented at
the 94th Convention
1993 March 16-19
Berlin

19) Audio Technology in Berlin to 1943: Microphones

Ernst Weiss
Georg Neumann GmbH
Berlin, Germany

Presented at
the 94th Convention
1993 March 16-19
Berlin

**20) Binaural Based 3-D Audio System:
The Orthostereophonic System (OSS) and Applications**

Temji Kobayashi
Nittobo Acoustic Engineering Co. Ltd.
Sumida-ku, Tokyo 130, Japan

Hareo Hamada and Tanetoshi Miura
Tokyo Denki University
Chiyoda-ku, Tokyo 101, Japan

Presented at
the 95th Convention
1993 October 7-10
New York

21) Some Acoustical Aspects for Sound System Design in Churches

W. Teuber, E.J. Voelker
IAB, Institut für Akustik and Bauphysik
Oberursel, Taunus

Presented at
the 96th Convention
1994 February 26 - March 01
Amsterdam

22) Optical Microphone

Andrzej Dobrucki D.Sc., Piotr Pruchnicki M.Sc.
Institute of Telecommunication and Acoustics
Wroclaw Technical University
Wroclaw, Poland

Presented at
the 96th Convention
1994 February 26 - March 01
Amsterdam

23) Silicon Microphones

Gerhard M. Sessler
Technical University of Darmstadt
D-64283 Darmstadt, Germany

Presented at
the 97th Convention
1994 November 10 -13
San Francisco

24) Characteristics of Musical Signals

Dolby Laboratories
San Francisco, CA 94103-4813, USA

Presented at
Eric Benjamin
the 97th Convention
1994 November 10 -13
San Francisco

**25) Hearing is Believing vs. Believing is Hearing:
Blind vs. Sighted Listening Tests, and Other Interesting Things**

Floyd E. Toole and Sean E. Olive
Harman International Industries, Inc.
Northridge, CA 91329, USA

Presented at
the 97th Convention
1994 November 10 -13
San Francisco

25) Program Material for Listening Tests: A Method for Training Listeners and Selecting Program Material for Listening Tests

Sean E. Olive
Harman International Industries, Inc.
Northridge, CA 91329, USA

Presented at
the 97th Convention
1994 November 10 –13
San Francisco

27) Differential Head-Worn Microphones for Music

Bruce Bartlett
Crown International
Elkhart, IN 46517, USA

Presented at
the 97th Convention
1994 November 10 -13
San Francisco

MAPPE 2

28) Taking the Mystery Out of Microphone Behavior

Jürgen Wahl
Sennheiser Electronic Corporation
Old Lyme, CT 06371, USA

Presented at
the 99th Convention
1995 October 6-9
New York

29) Localization Experiments in Three-Dimensional Sound Reproduction

Bernd Theiß
Audio Physic Gerhard GmbH, Brilon, Germany &
Malcolm O.J. Hawksford
University of Essex, Colchester, United Kingdom

Presented at
the 100th Convention
1996 May 11 -14
Copenhagen

30) Applied Delay on Support-Microphones in Multi-Microphone Recording Technique

Michael Kaaber Harrit
Danmarks Radio, Copenhagen, Denmark

Presented at
the 100th Convention
1996 May 11 -14
Copenhagen

31) Using a Typical Human Subject for Binaural Recording

Henrik Møller, Clemen Boje Jensen, Dorte Hammershøi, Michael Friis Sørensen
Aalborg University, Aalborg, Denmark

Presented at
the 100th Convention
1996 May 11-14
Copenhagen

32) Fundamental Aspects of the Binaural Recording and Synthesis Techniques

Dorte Hammershøi
Aalborg University, Aalborg, Denmark

Presented at
the 100th Convention
1996 May 11-14
Copenhagen

33) The Behaviour of Rooms at Low Frequencies

J. A. S. Angus
University of York
York, Great Britain

Presented at
the 102nd Convention
1997 March 22-25
Munich, Germany

34) Coincident Microphone Techniques For Three Channel Stereophonic Reproduction

Douglas McKinnie, Francis Rumsey
University of Surrey
Guildford, Great Britain

Presented at
the 102nd Convention
1997 March 22-25
Munich, Germany

35) Recording Baroque Organs in Big Churches

Gerald Hali
Clarison Studio
Heemskerk, The Netherlands

Presented at
the 103rd Convention
1997 September 26-29
New York

36) Development of "Ice-Zone Microphone" for Skating Sound Pick-Up

Akira Morita, Masakazu Iwaki and Shin-ichi Chiba
NHK Science and Technical Research Laboratories
157 Tokyo, Japan

Presented at
the 103rd Convention
1997 September 26-29
New York

37) Measurement and Intelligibility Optimization of Directional Microphones for Use in Hearing Aid Devices

Matthew Roberts, Robert Schulein
Eymotic Research
Elk Grove Village, IL 60007, USA

Presented at
the 103rd Convention
1997 September 26-29, New York

38) Psychoacoustic Effects of Ringing in Microphones

Jacquelynn Hebrock, Kelly Statham and Chuck Kraft
Audio-Technica U.S., Inc.
Stow, OH 44224, USA

Presented at
the 103rd Convention
1997 September 26-29, New York

39) Loudness Compensation by Microphone Frequency Response and Microphone Placement

Bruce Bartlett
Crown International
Elkhart, IN 46517, USA

Presented at
the 103rd Convention
1997 September 26-29
New York

40) Measurements on Studio Microphones

Stephan Peus
Georg Neumann GmbH
D-13403 Berlin, Germany

Presented at
the 103rd Convention
1997 September 26-29
New York

41) The KFM 360 Surround - A Purist Approach

Jerry Bruck
Posthorn Recordings
New York, NY 10001-6814, USA

Presented at
the 103rd Convention
1997 September 26-29
New York

42) 5-Channel Microphone Array with Binaural Head for Multichannel Reproduction

John Klepko
McGill University
Montreal, Quebec, Canada H3A 1E3

Presented at
the 103rd Convention
1997 September 26-29
New York

43) Music Recording in the Age of Multi-Channel

James A. Moorer
Sonic Solutions
Novato, CA 94945, USA

Presented at
the 103rd Convention
1997 September 26-29
New York

44) New Techniques for the Production of Multichannel Sound

Ulrich Horbach
STUDER Professional Audio AG
8105 Regensdorf, Switzerland

Presented at
the 103rd Convention
1997 September 26-29
New York

AES-Journals**45) Microphones**

Jon, R. Sank

Journal Audio Engineering Society, Volume 33, Number 7/8, 1985 July/August

46) Basic Stereo Microphone Perspectives – A Review

Ron Streicher, Wes Dooley

Journal Audio Engineering Society, Volume 33, Number 7/8, 1985 July/August

47) A Bibliographie of the Relevant Literature on the Subject of Microphones

Richard Knoppow

Journal Audio Engineering Society, Volume 33, Number 7/8, 1985 July/August

48) Stereo Microphone Techniques – Are the Purists Wrong?

Stanley, P. Lipshitz

Journal Audio Engineering Society, Volume 34, Number 9, 1986 September

49) Design Criteria for Headphones

Henrik Møller, Clemen Boje Jensen, Dorte Hammershøi, Michael Fris Sørensen

Journal Audio Engineering Society, Volume 43, Number 4, 1995 April

50) Transfer Characteristics of Headphones Measured on Human Ears

Henrik Møller, Clemen Boje Jensen, Dorte Hammershøi, Michael Fris Sørensen

Journal Audio Engineering Society, Volume 43, Number 4, 1995 April

51) Head-Related Transfer Functions of Human Subjects

Henrik Møller, Clemen Boje Jensen, Dorte Hammershøi, Michael Fris Sørensen

Journal Audio Engineering Society, Volume 43, Number 5, 1995 May

Fortschritte der Akustik

52) Der Einfluß verschiedener Kopfhörertypen auf die Richtungswiedergabe bei der Darbietung von Kunstkopfsignalen

R. Weber, W. Brennecke, H. Remmers

Fortschritte der Akustik – DAGA 81

53) Zur Messung von Kunstköpfen im freien Schallfeld

Thomas Fedtke

Fortschritte der Akustik – DAGA 98

54) Der Einsatz der Kunstkopftechnologie zur Aufzeichnung von Hörtests und Gegensprechttests für Freisprecheinrichtungen

F. Kettler, H. W. Gierlich, H. Klaus, A. Dehnel, J. Berger

Fortschritte der Akustik – DAGA 98

55) Ein neurophysiologisch motiviertes Modell zur Lokalisation von Schallquellen

Klaus Hartung, Susanne J. Sterbing

Fortschritte der Akustik – DAGA 98

56) Intensitätsmodulierendes Mikrophon auf Si-Basis

Martin Klaiber, Dirk Lange

Fortschritte der Akustik – DAGA 98

57) Der geklonte Raum: Zukunft? Illusion?

W. Kraak

Fortschritte der Akustik – DAGA 98

Tonmeistertagungen

MAPPE 3

58) Mikrofondaten und Ihre Bedeutung in der Praxis

Jörg Wuttke

Bericht: 9. Tonmeistertagung, Berlin 1978

59) Weshalb ist der Kammfilter-Effekt bei Summenlokalisierung nicht hörbar?

Günther Theile

Bericht: 11. Tonmeistertagung, München 1981

60) Herkömmliches und Neues zum Thema „Kondensatormikrofon mit Kugelcharakteristik“

Jörg Wuttke

Bericht: 13. Tonmeistertagung, München 1984

61) Einsatz der Kunstkopftechnik bei Musikproduktionen

Rolf Kohnemann, Klaus Genuit

Bericht: 13. Tonmeistertagung, München 1984

62) Die Bedeutung der Diffusfeldentzerrung für die stereofone Aufnahme und Wiedergabe

Günther Theile

Bericht: 13. Tonmeistertagung, München 1984

63) Entwicklungstendenzen der Stereophonie

Gerhard Steinke

Bericht: 13. Tonmeistertagung, München 1984

64) Überlegungen zur Stabilität und Leistungsfähigkeit verschiedener stereofoner Übertragungsverfahren

Georg Plenge

Bericht: 13. Tonmeistertagung, München 1984

65) Hauptmikrofon und Stützmikrofone - Neue Gesichtspunkte für ein bewährtes Aufnahmeverfahren

Günther Theile

Bericht: 13. Tonmeistertagung, München 1984

66) Neue Erfahrungen, Ergebnisse und Erläuterungen zu laufzeitstereofonen Aufnahmetechniken unter Verwendung von Druckempfängern

Wilfried Zahn, Helmut Püllmanns

Bericht: 13. Tonmeistertagung, München 1984

67) Mikrofone im direkten und diffusem Schallfeld – Wandel in der Schallaufnahmetechnik

Ernst-Joachim Völker

Bericht: 13. Tonmeistertagung, München 1984

68) Erfahrungsbericht über den Einsatz von herkömmlichen Studiomikrofonen als Boden- oder Grenzflächenmikrofone

Theodor Przybilla, Werner Schmidt

Bericht: 13. Tonmeistertagung, München 1984

69) Untersuchungen zur Wahl des Hauptmikrofonverfahrens

Martin Wöhr, Bruno Nellesen

Bericht: 14. Tonmeistertagung, München 1986

70) Neue Perspektiven für koinzidente und quasi-koinzidente Mikrofonverfahren

David Griesinger

Bericht: 14. Tonmeistertagung, München 1986

71) Einfluß verschiedener Wiedergabeeinrichtungen auf die Beurteilung von Hauptmikrofonverfahren

Tobias Prager, Günther Theile

Bericht: 14. Tonmeistertagung, München 1986

72) Betriebsverhältnisse von Mikrofonen bei Wind und Popp

Jörg Wuttke

Bericht: 14. Tonmeistertagung, München 1986

73) Impulsverhalten von Mikrofonen und Lautsprechern

Joseph Wilhelm Manger

Bericht: 14. Tonmeistertagung, München 1986

74) Das Kugelflächenmikrofon

Günther Theile

Bericht: 14. Tonmeistertagung, München 1986

75) Zwei Jahre Kugelflächenmikrofon

Jörg Wuttke

Bericht: 17. Tonmeistertagung, Karlsruhe 1992

76) Microphone Arrays as Adjustable Sound Receivers

Wieslaw R. Woszczyk

Bericht: 17. Tonmeistertagung, Karlsruhe 1992

**77) Natur und Landschaft hören, vom Parabolspiegel zum Kunstkopf.
Ein kurzer Hör-Einblick in die Natur-Aufnahmetechnik**

Walter Tilgner

Bericht: 17. Tonmeistertagung, Karlsruhe 1992

78) Neues Stereomikrofon in Kondensatortechnik

Günter Rosen

Bericht: 17. Tonmeistertagung, Karlsruhe 1992

79) Vorstellung eines digital entzerrten Kunstkopfsystems

Dieter Leckschatt

Bericht: 17. Tonmeistertagung, Karlsruhe 1992

80) Neue Gesichtspunkte zu Podiumsakustik und Zusammenspiel

Jürgen Meyer

Bericht: 18. Tonmeistertagung, Karlsruhe 1994

**81) Ein neues Studiokondensatormikrofon mit umschaltbarer
Richtcharakteristik**

Manfred Hibbing

Bericht: 18. Tonmeistertagung, Karlsruhe 1994

**82) „Das Medium ist die Botschaft“ (Marshall McLuhan) -
Zur Frage der Interpretation auf Tonträgern**

Gidi Boss

Bericht: 18. Tonmeistertagung, Karlsruhe 1994

83) Die wohltemperierte CD: Ein Blick auf Realismus, Illusion und Ästhetik in Tonaufnahmen

T. A. Thiel

Bericht: 18. Tonmeistertagung, Karlsruhe 1994

84) Aufnahme von Musikinstrumenten unter besonderer Berücksichtigung der Hörbedingungen der Musiker

Bram Gätjen

Bericht: 18. Tonmeistertagung, Karlsruhe 1994

85) Integralstereofonie – Ein neues Stereoverfahren?

Enno Eisföllner

Bericht: 18. Tonmeistertagung, Karlsruhe 1994

86) Mikrofonen Allerlei – Ein kleines Kompendium

Jörg Wuttke

Bericht: 18. Tonmeistertagung, Karlsruhe 1994

87) Schwingungsverhalten von Membranen moderner Kondensatormikrofone

Holger Pastillé

Bericht: 20. Tonmeistertagung, Karlsruhe 1998

88) Eigenrauschen und Dynamikumfang von Mikrofon und Aufnahmekette

Martin Schneider

Bericht: 20. Tonmeistertagung, Karlsruhe 1998

89) Mikrofon mit frequenzabhängig einstellbarem Bündelungsmaß

Christian Langen

Bericht: 20. Tonmeistertagung, Karlsruhe 1998

90) Das Mikrofon zwischen Physik und Emotion

Jörg Wuttke

Bericht: 20. Tonmeistertagung, Karlsruhe 1998

91) Vergleich von Hauptmikrofonverfahren in der Kölner Philharmonie

Judith Nordbrock

Bericht: 20. Tonmeistertagung, Karlsruhe 1998

14 Schlußbemerkung

“Das Ganze ist mehr als die Summe seiner Einzelteile“

Die in dieser Arbeit beschriebenen Techniken zeigen exemplarisch einige geläufige Aufnahmeverfahren, die jedoch nur einen möglichen Rahmen abstecken.

Die Veränderung eines Faktors wie z.B. Mikrofontyp, Raumakustik, Aufstellung des Ensembles etc. hat zugleich große Auswirkungen auf alle anderen beteiligten Komponenten, so daß oft die gesamte Aufnahmesituation neu überdacht werden muß.

Ein Aufnahmeverfahren läßt sich nicht mit einem menschlichen Hörvorgang vergleichen, insofern führen möglichst genaue Simulationen des Hörvorganges durch die Art der Aufnahmetechnik selten zu befriedigenden Resultaten. Eine „Verfälschung“ der „natürlichen“ räumlichen Situation durch z.B. Verwendung mehrerer Mikrofone, Veränderung des Frequenzspektrums, Beimischung von künstlichem Hall etc. können oft zu einem wesentlich „natürlicherem“ Eindruck des Aufnahmeergebnisses führen.

Jede Musik will auch auf eine bestimmte Weise gehört werden. Dieser Aspekt beinhaltet sowohl gängige Klischees, wie zum Beispiel ein Barockensemble oder ein romantisches Orchester zu klingen hat, als auch konkrete Vorstellungen eines Komponisten wie zum Beispiel ein bestimmtes Stück klanglich in Erscheinung treten soll.

Insofern kann eine Aufnahme keine neutrale Aufzeichnung eines musikalischen Ereignisses sein, sondern ist in gewissen Maß immer auch eine klangliche Mitgestaltung.

15 Danksagung

Abschließend möchte ich mich bei drei Personen besonders bedanken, die durch ihre Hilfe und Ratschläge einen wesentlichen Anteil am Entstehen dieser Arbeit gehabt haben:

o.H.Prof. Mag. Dipl.-Ing. Dr. Robert Höldrich, Vorstand des IEM Graz
Ferdinanda Anhofer

Dipl.-Ing. Dr. tech. Gerhard Graber, Ass. Prof. am Institut für Nachrichtentechnik in
Graz

Meinen herzlichen Dank auch an:

Dipl.-Ing. Franz Graf und Christian Hammer vom Musikhaus Hammer

Diese Arbeit ist meinen Eltern gewidmet