

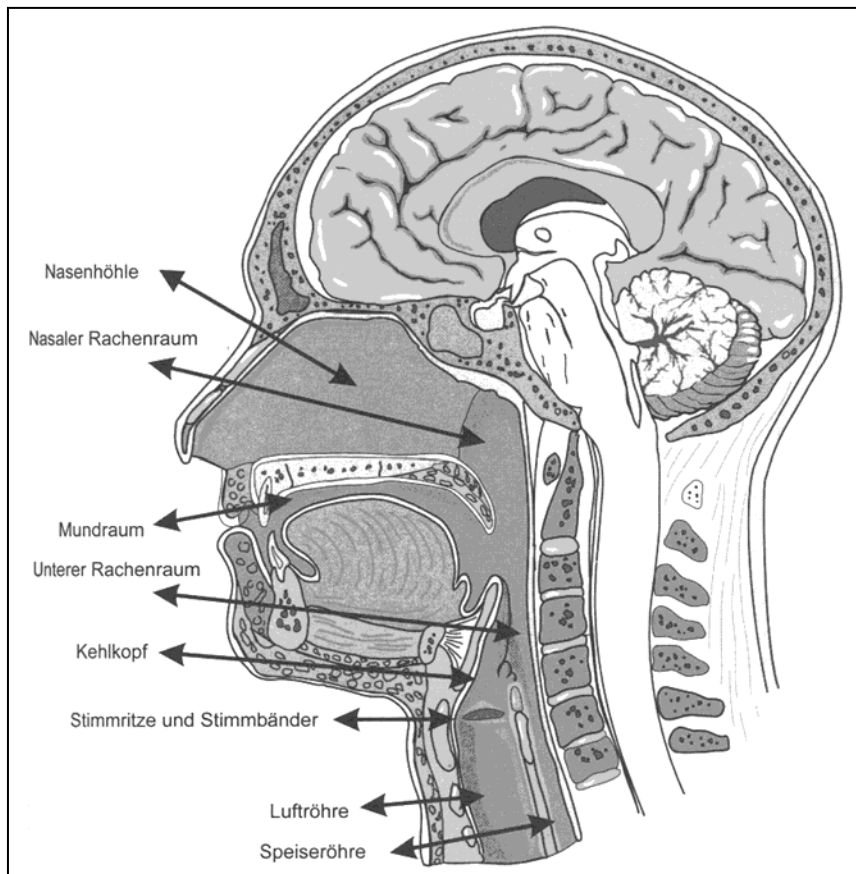
4. Schallquellen

4.1 Sprachorgan

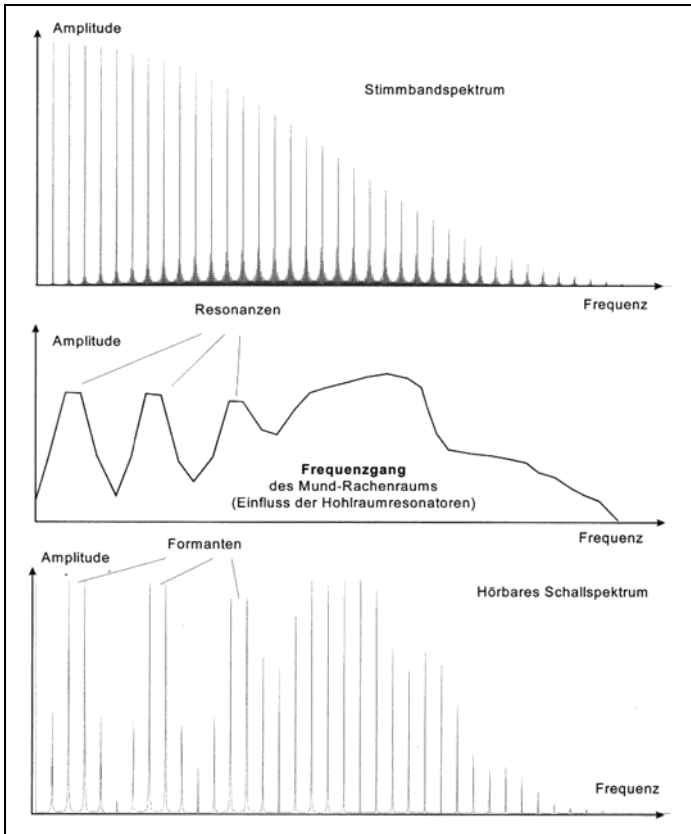
Die Energiequelle des Sprechorgans ist die in der Lunge gespeicherte Luft, die unter Druck über die Luftröhre, den Rachenraum und die Mundhöhle mit Öffnung bzw. den Nasenraum mit Öffnung nach außen abgegeben werden kann. Der in der Luftröhre sitzende Kehlkopf enthält zwei Stimmlippen, welche beim normalen Atmen weit geöffnet sind. Beim Sprechen eines Vokals oder stimmhaften Konsonanten werden die bänderartigen Stimmlippen geschlossen, so dass ein Überdruck in der Luftröhre entsteht, der die Bänder aufdrückt. Nach Entweichen eines Teiles der Luft, baut sich der Druck ab, die Bänder schließen sich wieder, so dass neuer Druck aufgebaut wird, der die Bänder wieder öffnet. Auf diese Weise entsteht ein sägezahnartiger Druckverlauf im Kehlkopf und die Stimmlippen schwingen mit einer Grundfrequenz, die bei Frau und Kind zwischen 120 und 500 Hz, beim Mann zwischen 60 und 250 Hz liegt. Neben der Grundfrequenz enthält der Schalldruck-Zeitverlauf am Kehlkopf sehr viele Harmonische (vgl. Spektrum einer Sägezahnschwingung), so dass sich Sprache von 100 Hz bis 7000 Hz erstreckt (siehe Hörfläche).

Die an den Kehlkopf angekoppelten Räume (Rachenraum, Mundraum, Nasenraum und Öffnungen Mund und Nase) wirken als akustische Filter, die bestimmte Frequenzbereiche, die sog. Formanten gut übertragen, während dazwischen liegende Bereiche stark unterdrückt werden. Mit Hilfe der die Form der Mundhöhle stark verändernden Zunge, der An- und Abkopplung des Nasenraumes durch das Gaumensegel sowie durch verschieden weites Öffnen des Mundes können die Formanten bzw. die Übertragungsfunktion des akustischen Filters stark verändert werden. Die Resonatorräume wirken also wie mehrere parallel geschaltete Bandpässe auf das durch die Stimmbänder erzeugte fast periodische Signal. Auf diese Weise werden die verschiedenen Klangfarben der Vokale erzeugt, welche sich durch die Einhüllende des Linienspektrums unterscheiden. Die meisten Vokale besitzen zwei **Hauptformanten** (Maxima der Einhüllenden des Spektrums) F_1 und F_2 , deren Frequenzlagen aus der sog. Formantenkarte entnommen werden kann.

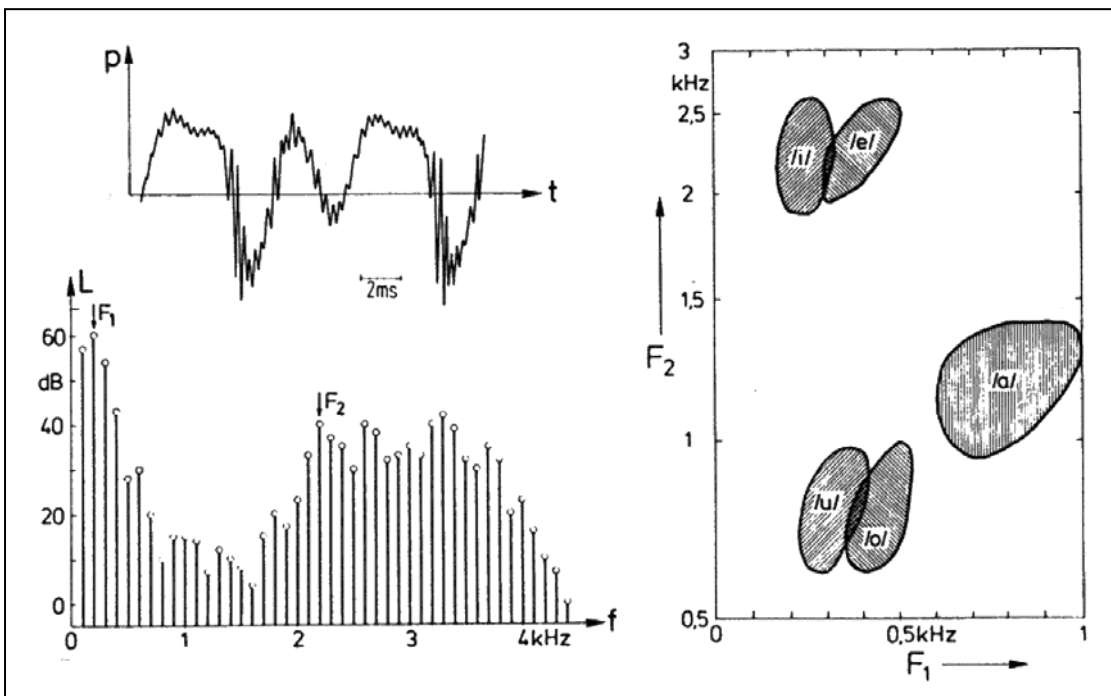
Der menschliche Sprachtrakt als verformbarer Hohlraumresonator:



Stimmbandspektrum und Formantenbildung:



Zeitfunktion und Spektrum des Vokals i; Formantenkarte für Vokale:



Typische Werte der ersten drei Formantfrequenzen der Vokale in Hz:

	/a/	/e/	/i/	/o/	/u/	/ä/	/ö/	/ü/
F ₁	850	360	220	350	300	860	400	250
F ₂	1220	2250	2200	500	870	2050	1660	1670
F ₃	2810	3000	3300	2600	2240	2850	1960	2050

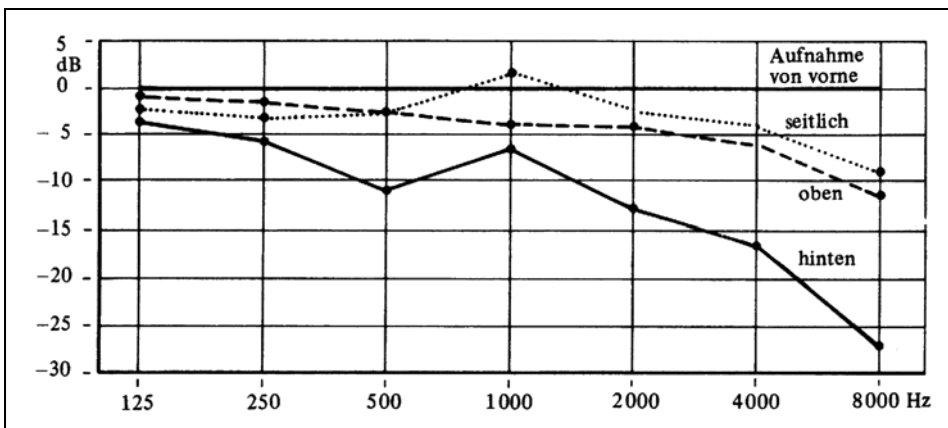
Beispiel: Welcher Laut besitzt die Formantfrequenzen F₂ = 2300 Hz und F₃ = 2900 Hz?

Die verschiedenen stimmhaften oder stimmlosen Konsonanten werden entsprechend der Art ihrer Erzeugung als **Nasale** (m, n, ng), **Frikative** (f, s, ch, sch), **Plosive** (b, d, g, p, t, k) und **Liquidae** (l, r) bezeichnet. Obwohl sie zur Lautstärke der Sprache nur sehr wenig beitragen, beinhalten sie wesentliche Informationsanteile, so dass bei ihrem Fehlen Sprache unverständlich wird. Neben den Konsonanten und den Vokalen sind auch die Übergänge zwischen beiden für das Sprachverständnis wichtig. Diese Übergänge sind zusammen mit den stationären Anteilen der Vokale die kleinsten Einheiten, in die Sprache zerlegt und wieder zusammengesetzt werden kann. Im deutschen gibt es etwa 200 solcher Grundeinheiten.

Die zeitliche Struktur der Sprache wird nur unwesentlich von den Satz- bzw. Wortgrenzen beeinflusst. Viel ausgeprägter sind die Pausen vor den häufig auftretenden Plosivlauten. Sie dauern etwa 60 bis 100 ms.

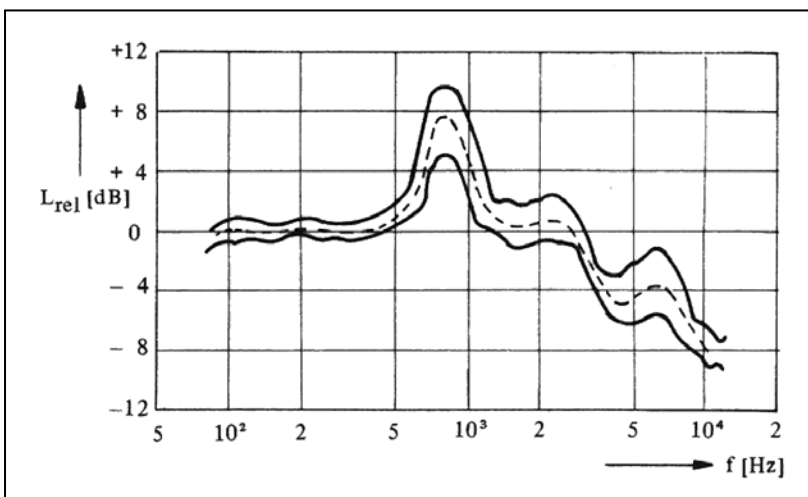
Wie die Musikinstrumente hat auch die menschliche Stimme keine allseitig gleiche Schallabstrahlung, sondern weist eine frequenzabhängige Schallbündelung, besonders im Frequenzbereich über 2000 Hz auf. Wandert man mit einem Mikrofon um einen Sprecher, so ändert sich die Klangfarbe der Stimme.

Unterschiede der Spektren von Gesang bei verschiedenen Aufnahmerichtungen:



Der gewohnte Sing- und Sprachklang ergibt sich in der Hauptabstrahlrichtung des Mundes. Oft werden jedoch Mikrofone an der Kleidung vor der Brust befestigt, wodurch sich durch die Schallabstrahlung der Brust und durch die Abstrahleigenschaften des Mundes am Mikrofonort Klangverfälschungen ergeben. Neben verstärkter Tiefen- und verringerter Höhenabstrahlung verursacht eine Anhebung von etwa 6 dB in einem schmalen Frequenzband bei 700 Hz (männliche Stimme) bzw. etwas darüber (weibliche Sprache) eine Klangfärbung. Wird der Frequenzgang des Mikrofons entsprechend korrigiert, wie das bei einigen **Lavalier-Mikrofonen** geschieht, ist ein Unterschied zwischen den Aufnahmen vor dem Mund und der Brust nicht hörbar.

Frequenzgang von Sprache vor der Brust des Sprechers:



Sprachpegel $L_{pSAeq,1m}$ vor dem Sprecher für verschiedene Sprechweisen:

Sprechweise	Sprachpegel $L_{pSAeq,1m}$
flüstern	36 dB
leise	42 dB
entspannt (p)	48 dB
entspannt, normal (p)	54 dB
normal, angehoben (p)	60 dB
angehoben	66 dB
laut	72 dB
sehr laut	78 dB
schreien	84 dB

Sprachverständlichkeit:

Die Sprachverständlichkeit ist ein grundlegendes Kriterium für die Beurteilung der Hörsamkeit von Räumen für Sprachdarbietungen und für die Übertragungsqualität in der Tontechnik. Im Allgemeinen wird die Silbenverständlichkeit ermittelt, weil bei Übertragungen auch Einzelsilben wie z.B. Zahlen verständlich sein sollen. Sie wird gemessen in Prozent der richtig verstandenen Silben bezogen auf die Gesamtzahl einer Reihe von Prüfsilben gleicher Lautheit. Dabei werden Testsilben ohne Bedeutung und Kontext, sog. **Logatome**, verwendet (z.B. pus, fag).

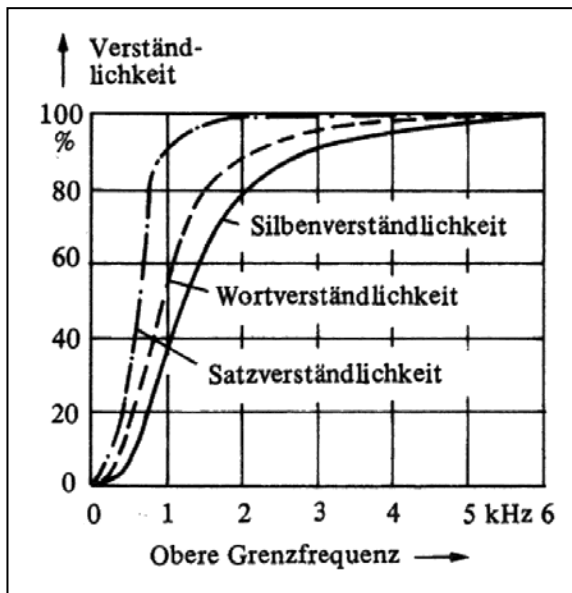
Logatomtest: >90 %: sehr gut, 80-90 %: gut, 65-80 %: befriedigend, 45-65 %: ausreichend, <45 %: nicht ausreichend

Die Wortverständlichkeit (z.B. Freiburger Einsilber-Test mit Worten wie Ring, Hang, Geist) liegt grundsätzlich über der Silbenverständlichkeit, die Satzverständlichkeit (z.B. Marburger Test) über der Wortverständlichkeit. Eine Silbenverständlichkeit von 80 % kann als gute Verständlichkeit bezeichnet werden, dies entspricht einer Satzverständlichkeit von 100 %.

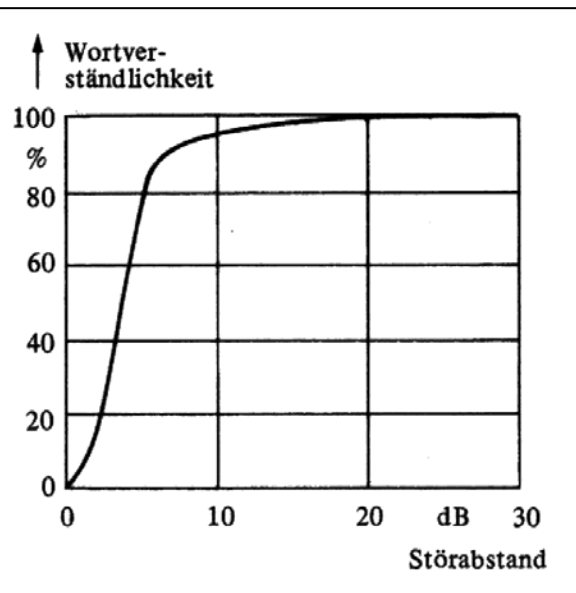
Bei einem Reimtest werden für ein gesprochenes Wort 6 Möglichkeiten zum Ankreuzen angeboten (z.B. Hin, Drin, Sinn, Zinn, Kinn, Rinn) und der Prozentsatz der richtigen Antworten ausgewertet.

Auf die Silben-, Wort- und Satzverständlichkeit haben neben der oberen Grenzfrequenz der Übertragung und der Störabstand auch Nachhallzeit und Frequenzgang von Räumen Einfluss. Die nachfolgenden Abbildungen zeigen, dass ab der Telefonbegrenzung von 3,4 kHz und bei einem Störabstand von 20 dB bereits eine sehr gute Verständlichkeit vorhanden ist.

Verständlichkeit in Abh. von oberer Grenzfrequenz:



Wortverständlichkeit in Abh. vom Geräuschpegelabstand:

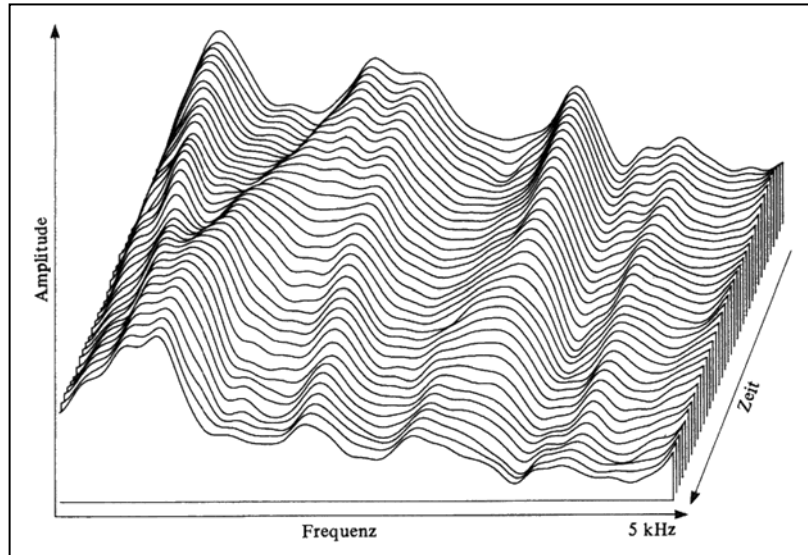


4.2 Musikinstrumente

Zeitverhalten und Spektrum:

Für die vollständige Erfassung von Klangeigenschaften ist die Angabe von zeitlicher Änderung der Amplitude und Frequenz erforderlich. Bei Musikinstrumenten ist weiterhin das zeitliche Ein- und Ausschwingen sowie das Abstrahlverhalten eine charakteristische Größe.

Ausschnitt aus dem gesprochenen Wort „Montreal“ als Beispiel für dreidimensionale Klangdarstellung:



Jeder Klang kann in zwei oder drei aufeinander folgende Abschnitte eingeteilt werden:

1. Einschwingen, Klangeinsatz:

Zeitabschnitt, in dem sich der Klang aus der Ruhe bis zu seinem eingeschwungenen Zustand entwickelt.

Kurze Klangeinsätze dauern bis etwa 10 ms, lange Klangeinsätze wie z.B. beim Kontrabass zwischen 100 und 500 ms. Der Durchschnitt liegt bei 15-50 ms. Kurze Klangeinsätze (Schlaginstrumente) haben einen hohen Geräuschanteil wie z.B. der Einschaltknack eines Tones (breites Spektrum), bei längerer Einschwingphase sinkt der Anteil geräuschhafter Komponenten.

Musikinstrumente sind sehr komplizierte Schwingungssysteme mit vielen Resonatoren, die einen raschen, „knackenden“ Klangeinsatz verhindern, so dass die meisten Musikinstrumente weicher als geschaltete Sinustöne klingen.

2. Quasistationärer Schwingungszustand:

Zeitabschnitt, in dem der Klang als relativ unveränderlich betrachtet werden kann. Auch die immer vorhandenen, aber für die Klangcharakteristik sehr wichtigen kleinen Schwankungen können noch als quasistationärer Zustand angesehen werden.

Der quasistationäre Klangabschnitt ist bei Instrumenten immer Veränderungen in Form von Amplitudenschwankungen wie beim Klavier, Orgel, Chören oder Orchesterstimmen sowie periodischen Frequenzschwankungen wie das Vibrato der Singstimme, der Streichinstrumente oder der meisten Blasinstrumente unterworfen. Die periodischen Schwingungsvorgänge des eingeschwungenen Klanges setzen sich aus dem Grundton und Obertönen zusammen, deren Frequenz jeweils ein ganzzahliges Vielfaches des Grundtones ist. Man bezeichnet sie auch als Harmonische oder Teiltöne, wobei der Grundton der 1. Harmonischen bzw. dem 1. Teilton entspricht.

Viele Musikinstrumente haben ihren gesamten Tonbereich hinweg einen bestimmten, für sie typischen Klangcharakter. Dieser wird wie bei der Sprache durch verstärkt hervortretende Spektralanteile, sog. Formanten bestimmt, welche bei Saiteninstrumenten durch Resonanzen des Resonanzkörpers und bei Blasinstrumenten durch das Mundstück verursacht werden. Bei der Violine liegt ein Format bei 1 kHz, wodurch ein heller, offener Klang entsteht. Das Violoncello besitzt Formanten zwischen 2 und 3 kHz, was dem Instrument eine gewisse Klangschärfe gibt, so dass es trotz seiner Größe klangheller als die Violine erscheint. Weiterhin bestimmen auch zusätzliche Geräuschanteile im stationären Klang den Klangcharakter des Instrumentes hervorgerufen durch Streichen des Bogens oder Anblasgeräusche.

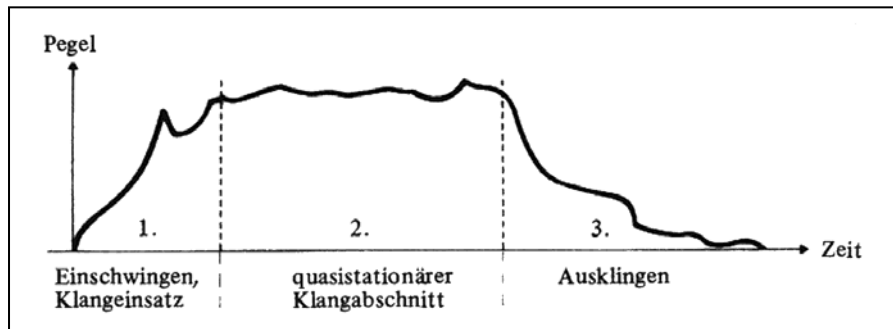
3. Ausklingen:

Zeitabschnitt, in dem der Klang bis zur völligen Ruhe ausklingt.

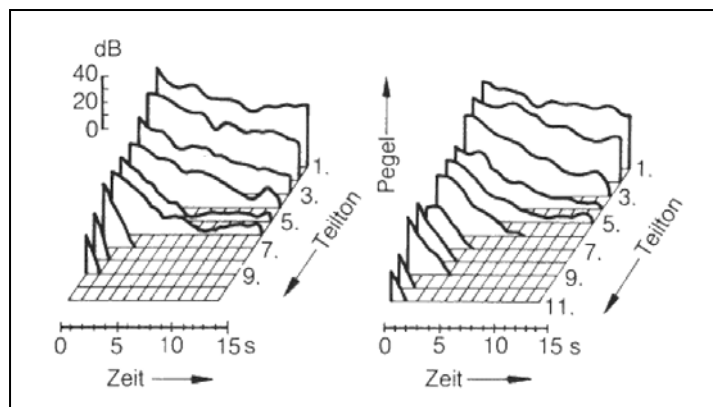
Der zeitliche Aufbau eines Tons entspricht dem raumakustischen Geschehen bei der Abstrahlung eines Tons: Einschwingen = Anhall, Ausklingen = Nachhall

Je weniger ein Resonanzsystem bedämpft ist, desto länger klingt es nach. Die Klangfarbe färbt sich dunkler, weil tiefe Frequenzen weniger bedämpft werden. Die längste Nachklingzeit haben Instrumente mit gezupften und geschlagenen Saiten wie Cembalo, Gitarre, Harfe und Klavier (20 bis 40 s) oder Schlaginstrumente, die bei Aufnahmen oft elektronisch ausgeblendet werden müssen. Die kürzeste Ausklingzeit haben Blasinstrumente.

Abschnitte eines musikalischen Klangs:



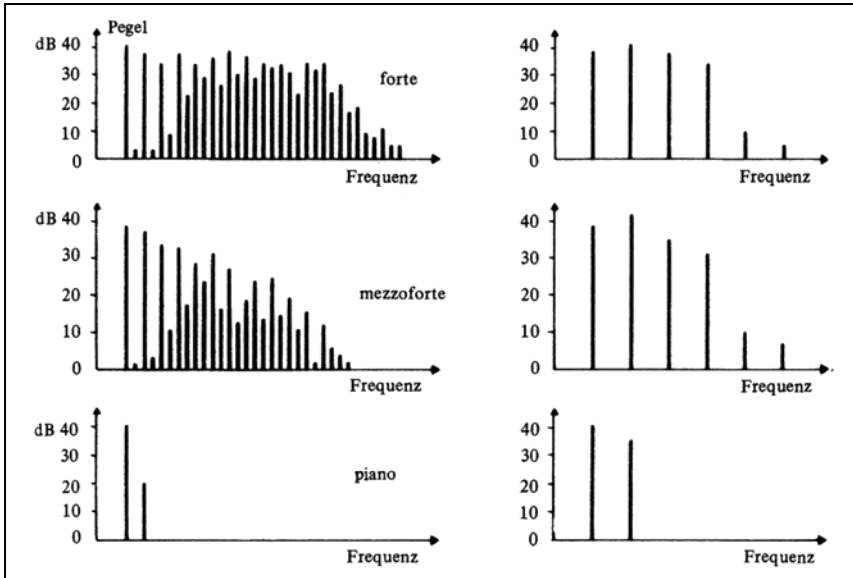
Ausklingen zweier Klaviertöne:



Dynamik:

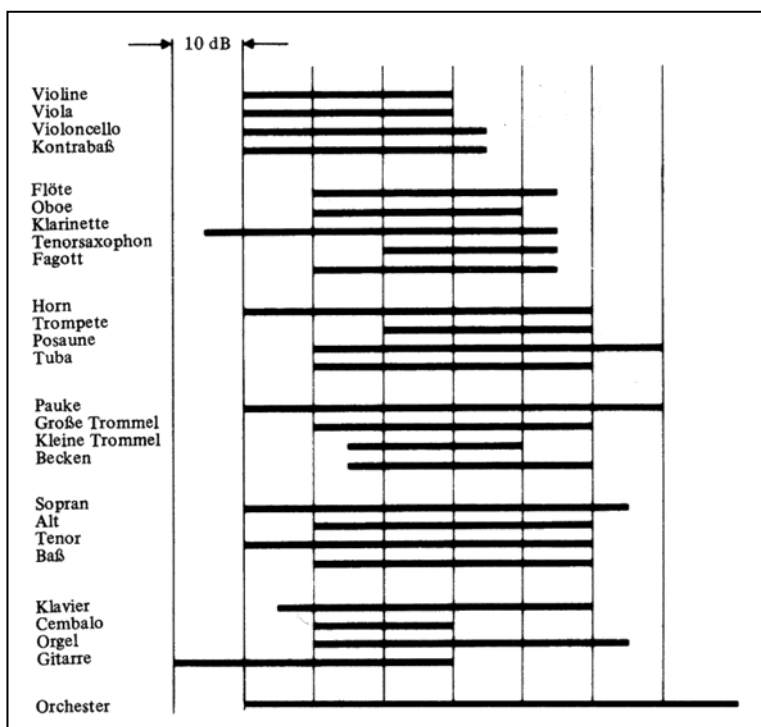
Die dynamischen Grade eines Instrumentenklangs unterscheiden sich außer in Dauer und Struktur des Einschwingvorganges hauptsächlich im unterschiedlichen spektralen Aufbau des quasistationären Klangs. Je stärker der dynamische Klang ist, umso mehr Teiltöne werden ausgebildet und umso höher liegt der Pegel der höheren Teiltöne.

Klarinettenspektrum in verschiedenen Dynamikstufen, links: tiefer Ton, rechts: hoher Ton



Streichinstrumente sind durchschnittlich halb so laut wie Holzblasinstrumente, weisen also um ca. 10 dB niedrigeren Pegel auf. Holzblasinstrumente sind ihrerseits um 5-10 dB niedriger als Blechblasinstrumente. Die Gesamtdynamik eines Orchesters kann bis 60-80 dB betragen. Die Dynamikwerte bei Studioproduktionen sind meist höher als bei Konzerten mit Publikum.

Dynamikbereiche der Musikinstrumente:



Abstrahlcharakteristik:

Schallquellen, die klein gegenüber den Wellenlängen des abgestrahlten Schalls sind, strahlen den Schall weitgehend ungerichtet ab. Gegenüber den Wellenlängen große Schallquellen bündeln den Schall und strahlen ihn damit in eine oder mehrere Richtungen gebündelt ab. Da die Wellenlängen der Spektralkomponenten musikalischer Klänge zwischen etwa 10 m und 2 cm liegen können, bündeln die Instrumente den Schall frequenzabhängig, dabei teilweise auch in sehr komplexer Form. Als grobe Faustregel kann gelten, dass Frequenzen im Bassbereich **unter etwa 250 Hz kugelförmig ungerichtet**, Frequenzen darüber zunehmend gerichtet abgestrahlt werden.

Die gerichtete Schallabstrahlung wirkt sich auf Klangfarbe und Schallpegel im Direktfeld mehr oder weniger stark aus, nicht aber im Diffusfeld. Da die Mikrofone aber meist im Direktfeld aufgestellt werden, hat die Richtcharakteristik der Instrumente bei Tonaufnahmen größere Bedeutung als beim direkten Hören. Sie macht es möglich, mit dem Mikrofon den Klangcharakter des Instruments bei der Aufnahme mitzubestimmen. Mikrofonstandort und Richtcharakteristik der Instrumente haben einen größeren Einfluss auf die Aufnahme als die Mikrofonwahl. Stark gerichtete Abstrahlung lässt den Klang eines Musikinstrumentes auch über größere Entfernungen noch präsent erscheinen, sie erhöht damit die Ortbarkeit der Instrumente, verringert aber gleichzeitig die Klangverschmelzung z.B. in einem Sinfonieorchester.

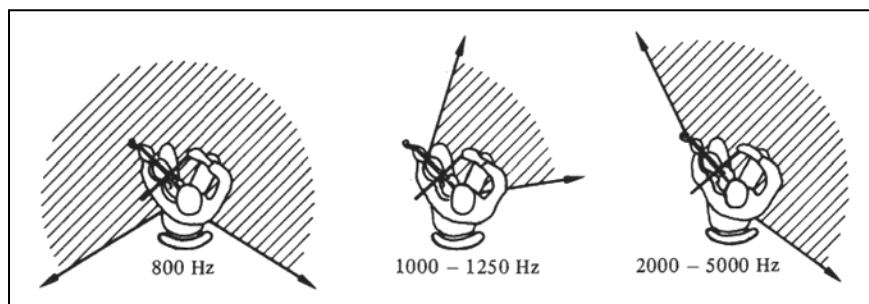
Gerichtete Klangabstrahlung kann den Hallradius ganz erheblich vergrößern, im höheren Frequenzbereich der Blechblasinstrumente um den Faktor 10, im Schnitt um Faktor 1,5 bis 2.

Die Richtwirkung der **Streichinstrumente** ist nicht so stark ausgeprägt wie bei den Blasinstrumenten. Kleine Veränderungen des Mikrofonortes wirken sich nicht so deutlich aus, so dass der Wahl des Mikrofontyps hier mehr Bedeutung zukommt.

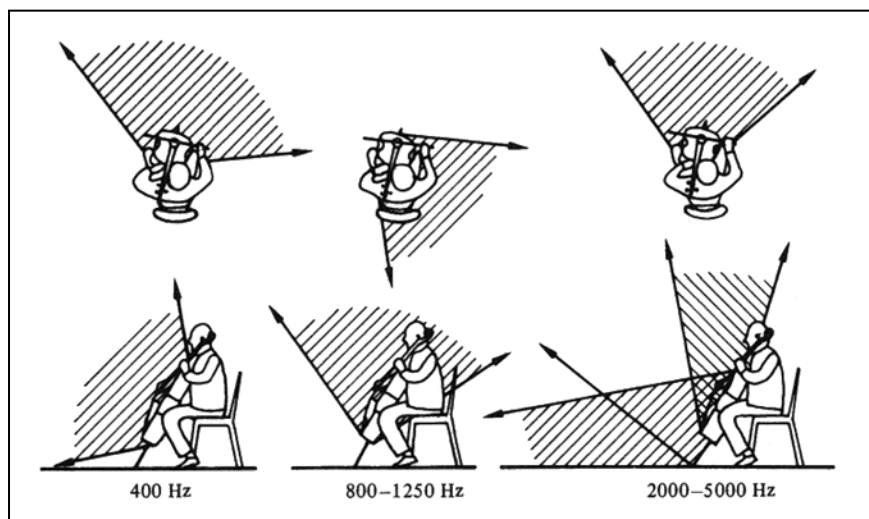
Bei einer Violine werden Frequenzen unter 500 Hz kugelförmig abgestrahlt, zwischen 1000 und 1200 Hz erfolgt die Abstrahlung senkrecht zur Resonanzkörperdecke, um bei höheren Frequenzen schließlich wieder breiter abzustrahlen. Bei einer Violine gibt die Abstrahlung etwa senkrecht zur Decke die günstigste Richtung für die Aufnahme.

Das Violoncello strahlt unter 200 Hz ungerichtet, um 1000 Hz bevorzugt nach oben und über 2000 Hz in zwei Zonen, eine zum Boden, eine senkrecht nach oben. Auch ein Violoncello kann gut über dem Streicher aufgenommen werden.

Abstrahlcharakteristik der Violine:



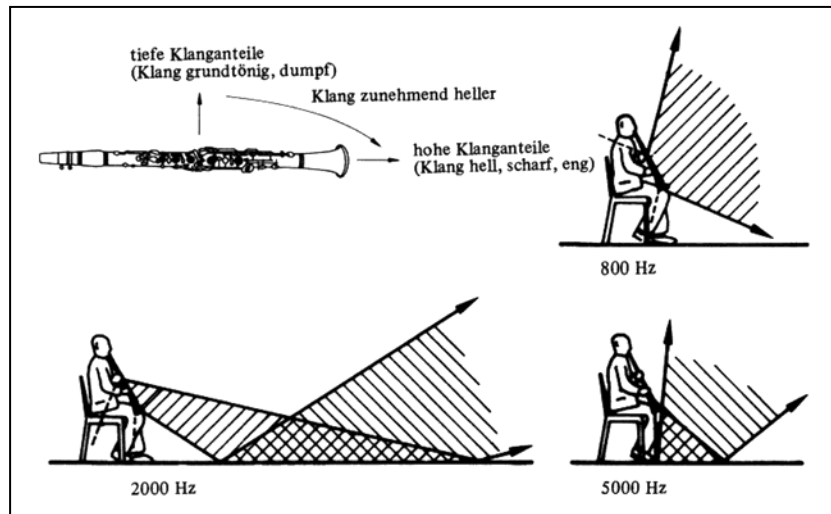
Abstrahlcharakteristik des Violoncellos:



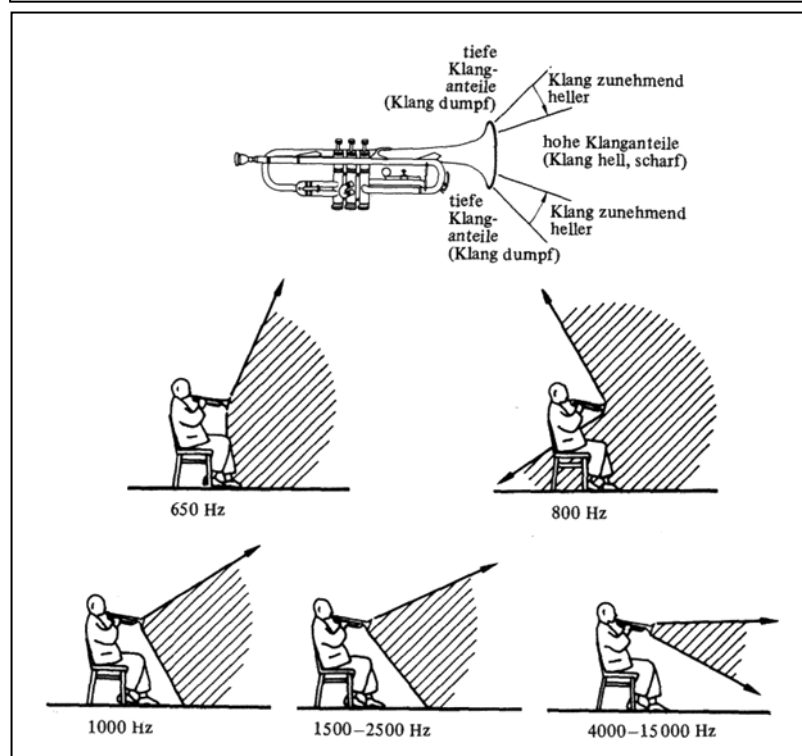
Bei **Holzblasinstrumenten** strahlen Frequenzen unter 1000 Hz bevorzugt aus den Grifflöchern. Mit ansteigender Frequenz neigt sich der Abstrahlbereich zunehmend zur Schallstürze hin. Daher ist die Mikrofonaufstellung hier besonders wichtig. Vor den Grifflöchern entsteht ein weicher, voller Klang, der sich in Richtung Stürze zu einem scharfen, engen, aber auch präsenten Klang formt. Mit zunehmender Entfernung zum Instrument werden diese Unterschiede immer geringer, weil der klangintegrierende Diffusanteil des Raumes zunimmt. Eine Mikrofonposition vor den Grifflöchern führt also zu einem runden und weichen Klang.

Bei den **Blechblasinstrumenten** gibt es keine Grifflöcher, so dass der Schall ausschließlich aus der Stürze abgestrahlt wird und verglichen mit den Holzblasinstrumenten auch schon tiefe Frequenzen über 500 Hz gebündelt werden. Auch hier bestimmt die Mikrofonaufstellung der Klangcharakter sehr stark. Da bereits tiefe und mittlere Frequenzen rotationssymmetrisch vor der Stürze abgestrahlt werden, ist diese Mikrofonposition gut geeignet.

Abstrahlcharakteristik der Oboe und Klarinette:



Abstrahlcharakteristik der Trompete:



Infolge der unterschiedlichen Abstrahlcharakteristik ist die Aufstellung der Musikinstrumente in einem Orchester von großer Bedeutung und dementsprechend historisch gewachsen. Der Toningenieur kann durch Einzelmikrofonaufnahmen im geeigneten Schallfeld eines Instrumentes dessen Klang besonders hervorheben.

4.3 Lautsprecherboxen

Im Gegensatz zu Musikinstrumenten weisen Lautsprecherboxen meist eine andere Abstrahlcharakteristik auf, nämlich kugelförmiges Abstrahlverhalten für tiefe Frequenzen und zunehmende Bündelung mit ansteigender Wiedergabefrequenz.

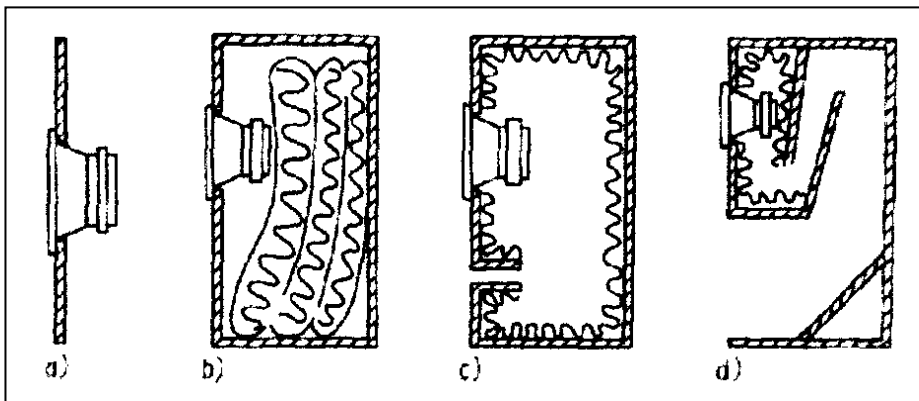
Um den Ausgleich zwischen dem Schalldruck und den Schallsog vor bzw. hinter der sich bewegenden Membrane bei tiefen Frequenzen zu verhindern, muss der Lautsprecher in eine entsprechend große Schallwand eingebaut werden. Der kürzeste Abstand d zwischen Lautsprecherchassis und Schallwandkante ergibt sich aus der tiefsten abzustrahlenden Frequenz f_0 mit folgender Gleichung:

$$d = \frac{c}{4 f_0}$$

Unterhalb der Grenzfrequenz f_0 fällt der Frequenzgang mit 6 dB/Oktave.

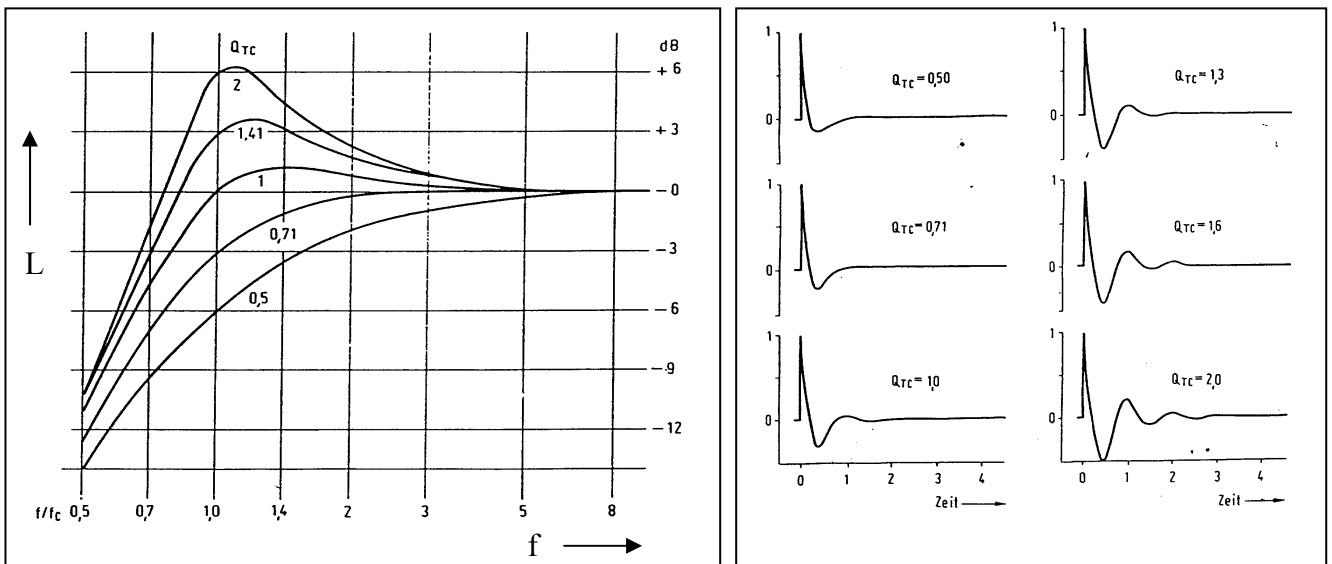
Die Verwendung einer geschlossenen Box vermeidet den akustischen Kurzschluss. Die nach innen abgestrahlte Energie wird bei der geschlossenen Box nicht genutzt, sondern durch Dämmmaterial absorbiert.

Lautsprechereinbau: a, Schallwand; b, geschlossene Box; c, Bassreflexbox; d, Transmissionline



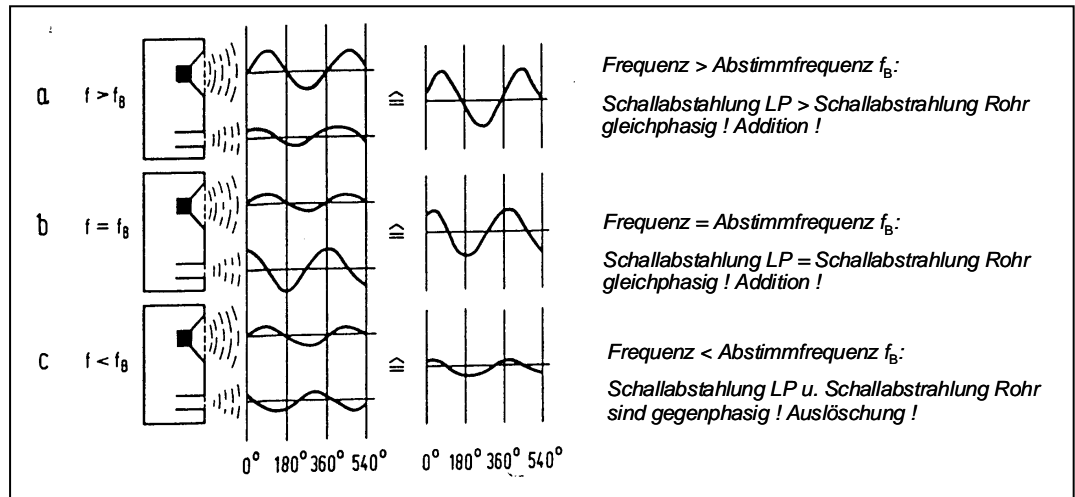
Je nach Abstimmung und verwendetem Volumen ergibt sich eine unterschiedliche Güte Q_{TC} der Box. Eine hohe Güte bedeutet eine geringe Dämpfung des Wiedergabeverhaltens im Tieftonbereich und damit eine Überbetonung der Bässe sowie ein langes Ausschwingverhalten der Box. Bei einer Güte Q von 0,7 hingegen ergibt sich ein ausgewogener Frequenzgang.

Schalldruckpegel L und Impulsverhalten einer geschlossenen Box in Abh. von der Güte Q_{TC} :

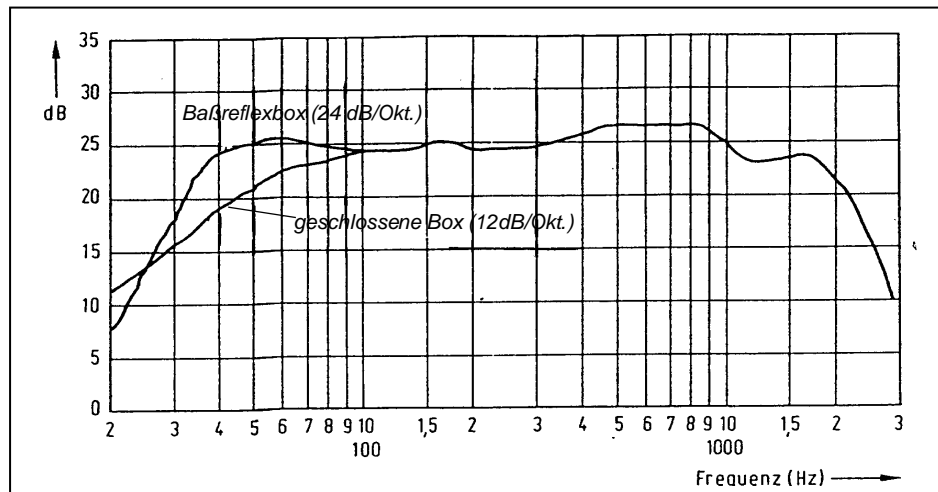


Um die nach innen abgestrahlte Energie wenigstens teilweise zu nutzen, wird vielfach ein Bassreflexrohr verwendet, das wie ein Helmholtzresonator wirkt und bei seiner Abstimmfrequenz f_B die Energie im Inneren der Box phasenrichtig nach außen lenkt, so dass im Tieftonbereich eine Pegelzunahme von bis zu 8 dB zu erzielen ist. Die schwingende Masse des Helmholtzresonators ist dabei die Luftmasse im Rohr, welche durch Rohrquerschnitt und Rohrlänge variiert werden kann. Die zugehörige Steifigkeit wird durch das eingeschlossene Luftvolumen in der Box definiert und kann nicht ohne weiteres verändert werden. Bassreflexboxen haben allerdings eine etwas schlechtere Impulswiedergabe als geschlossene Boxen. Ebenso kann die nach innen abgestrahlte Energie durch einen abgestimmten Passivstrahler (Membrane ohne Antrieb) oder eine Transmissionline, welche die Schallenergie über Laufzeiten phasenrichtig umlenkt, nach außen geführt werden.

Bassreflexbox:



Frequenzgang einer geschlossenen und einer Bassreflexbox:



4.4 Kopfhörer

Kopfhörer können mit geringem Aufwand dieselbe Bandbreite und denselben Schalldruck ohne nichtlineare und lineare Verzerrungen erreichen. Zudem spielen Raumeinflüsse und Schalldämmung keine Rolle und es ist immer Originallautstärke erzielbar. Rauschen wird per Kopfhörer besser erkannt, so dass eine Aufnahme bei Kopfhörerarbeitung 10 dB mehr Geräuschpegelabstand haben muss als eine gleich laut wiedergegebene Lautsprecherdarbietung. Ebenso können Knackstörungen durch Bitfehler leichter erkannt werden. Es können an verschiedenen Orten absolut gleiche Abhörbedingungen realisiert werden, so dass Kopfhörerwiedergabe meist für psychoakustische Untersuchungen verwendet werden. Jedes Ohr wird separat beschallt, so dass auch dadurch spezielle Versuche durchgeführt werden können.

Nachteilig ist bei Kopfhörerwiedergabe neben der Lästigkeit des Tragens des Kopfbügels die sog. Im-Kopf-Lokalisation, also die Lokalisierung des Hörereignisses im Kopf, und das Mitwandern des Klangbildes bei Kopfdrehungen, also die Kopfbezogenheit des Klangbildes. Die Lokalisation einer Phantomschallquelle auf der Verbindungslinie zwischen den beiden Ohren bezeichnet man auch als **Lateralisation**, wobei diese gedachte Verbindungslinie nach oben gebogen ist, so dass Mittenschallquellen erhöht bis zur Schädeldecke erscheinen. Während bei Lautsprecherdarbietung ein Pegelunterschied von 20 dB eine vollständige Lokalisation auf einer Seite des Hörpanoramas bewirken, ist bei Kopfhörerdarbietung eine wesentlich größere Pegeldifferenz für eine vollständig seitliche Hörabbildung erforderlich. Nachteilig ist auch das Fehlen der Außenohrübertragungsfunktion, so dass der Frequenzgang des Kopfhörers entsprechend zu entzerren ist. Musikdarbietung über Kopfhörer wird vom Zuhörer oft mit einem um ca. 10 dB höheren Pegel eingestellt als über Lautsprecher, so dass hier verstärkt eine Schädigung des Gehörs vermieden werden muss (Walkman).

Es gibt drei Arten der Kopfhörerdarbietung:

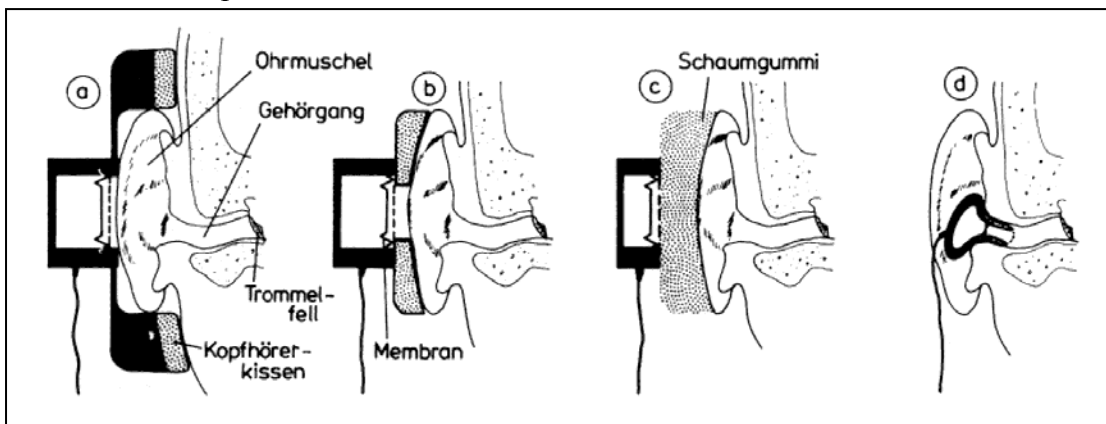
- monotisch nur ein Ohrhörer erhält ein Signal
- diotisch beide Ohrhörer erhalten dasselbe Signal
- dichotisch die beiden Ohrhörer erhalten unterschiedliche Signale

Daneben spricht man von monaural, wenn nur ein Ohr beschallt wird, und von binaural, wenn beide Ohren beschallt werden.

Man unterscheidet

- a, geschlossenen, zirkumauralen
- b, geschlossenen, supraauralen
- c, offenen, supraauralen
- d, „Im Ohr“-Hörer

Verschiedene Kopfhörerarten:



Freifeldübertragungsmaß:

Durch Kopfhörerwiedergabe wird die Übertragungsfunktion des Außenohres umgangen, so dass der Frequenzgang des Kopfhörers auf einfallenden Diffusschall oder auf freies Schallfeld mit bestimmter Schalleinfallrichtung optimiert werden muss (siehe HRTF-Frequenzgänge). Die Kopfhörer sind also entweder diffusfeldentzerrt oder freifeldentzerrt, wobei die bisherige Normung nur eine Freifeldentzerrung für Direktschalleinfall von vorne festlegt. Andere Einfallrichtungen werden dann klanglich verfärbt.

Für hochwertige Studiokopfhörer ist zukünftig jedoch eine Diffusfeldentzerrung vorgesehen.

Die Ohrsignale, die vor den Trommelfellen auftreten, unterscheiden sich von denjenigen Schallsignalen, welche in Abwesenheit der Person vorhanden gewesen wären. Die Unterschiede werden durch Beugungs- und Brechungserscheinungen der Schallwellen am Körper der hörenden Person hervorgerufen. Das Schallfeld, das in Abwesenheit der Person vorhanden ist, wird als Freifeld bezeichnet. Seine Charakteristik kann allein durch die geometrische Anordnung und die Art der

Schallquellen beschrieben werden. Der Unterschied zwischen dem Freifeldsignal und dem resultierenden Ohrsignal, wird durch die Freifeldübertragungsfunktion G_F beschrieben.

Um die Freifeldübertragungsfunktion von Kopfhörern zu bestimmen, wird der von einem Lautsprecher abgestrahlte Schalldruck L_F des freien Schallfeldes mit einem freifeldentzerrten Mikrophon an einem Punkt im reflexionsarmen Raum gemessen. Anschließend setzt sich eine Versuchsperson so, dass sich ihr Kopfmittelpunkt an der gleichen Stelle befindet. Die Spannung bzw. der Pegel L_H am Kopfhörer wird nun so eingestellt, dass bei beidohriger Beschallung der vom Lautsprecher erzeugte Sinuston genauso laut empfunden wird wie der kurz darauf über Kopfhörer dargebotene Sinuston gleicher Frequenz (DIN 45619). Das Freifeldübertragungsmaß G_F des Kopfhörers errechnet sich mit der Randbedingung gleicher Lautheit zu:

$$G_F = L_F - L_H$$

- G_F : Freifeldübertragungsmaß, bezogen auf $20 \mu\text{Pa} / 1 \text{ V}$
- L_F : Schallpegel im freien Schallfeld, bezogen auf $20 \mu\text{Pa}$
- L_H : Spannungspegel am Kopfhörer, bezogen auf 1 V

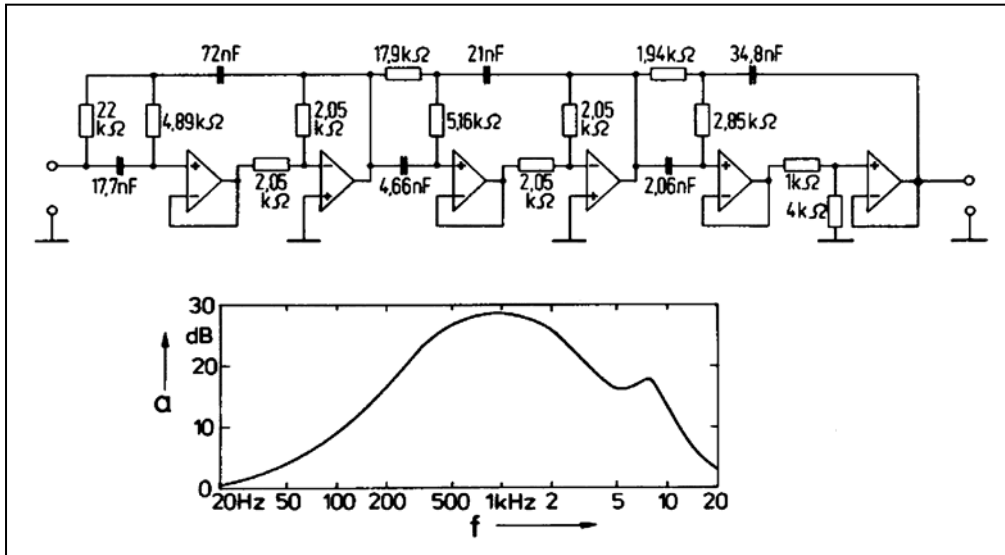
Die Freifeldübertragungsfunktion ist von

- der Richtung und Entfernung der Schallquelle und
- den individuellen anatomischen Abmessungen

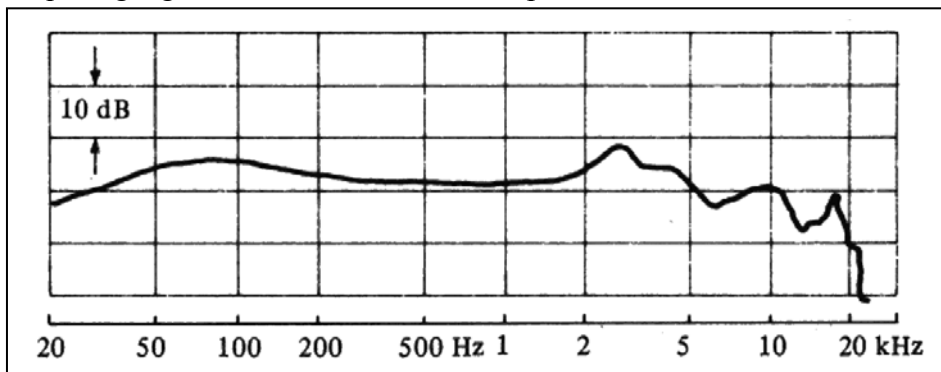
abhängig.

Werden die Bezugsmessungen in einem Diffusfeld durchgeführt, kann auf gleiche Art und Weise das Diffusfeldübertragungsmaß G_D ermittelt werden. Kopfhörer können damit auf Freifeldwiedergabe bzw. Diffusfeldwiedergabe durch Verwendung eines vorgeschalteten Entzerrers (Filter), welcher das entsprechende frequenzabhängige Übertragungsmaß nachbildet, getrimmt werden.

Freifeldübertragungsfunktion für einen dynamischen Kopfhörer:



Frequenzgang eines freifeldentzerrten Kopfhörers:



5. Frequenz- und Richtungscharakteristiken von Wandlern

5.1 Frequenzgang

Der Frequenzgang beschreibt die Ausgangsspannung oder den Ausgangspegel eines Mikrofons bei gegebenem Schalldruck in Abhängigkeit von der Frequenz des Schallsignals. Beim Lautsprecher beschreibt der Frequenzgang umgekehrt den wiedergegebenen Schalldruckpegel bei gegebener Eingangsspannung. Er wird als Kurve in einem doppelt logarithmischen Pegel-Frequenz-Diagramm dargestellt. Meistens wird ein linearer Frequenzgang angestrebt. Aus der Frequenzgangkurve können Rückschlüsse auf den Klang eines Mikrofons oder Lautsprechers gezogen werden. Frequenzgänge werden im reflexionsarmen Raum gemessen, um die Aufnahme bzw. Abstrahlung des Direktschalls, frei von störenden Reflexionen ermitteln zu können.

5.1.1 Mikrofon

Mikrofone teilt man in Druckempfänger und Druckgradientenempfänger ein.

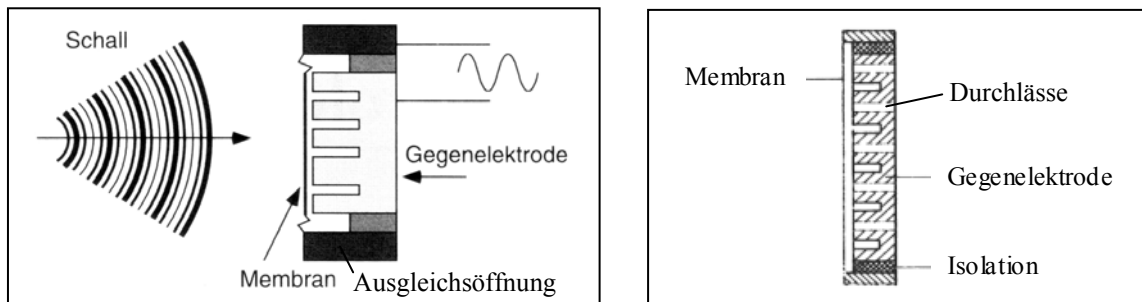
Druckempfänger:

- geschlossenes Gehäuse (bis auf kleine Ausgleichsöffnung für statische Druck)
- kugelförmige Richtcharakteristik, da Schalldruck ungerichtete Größe ist
- kein Nahbesprechungseffekt

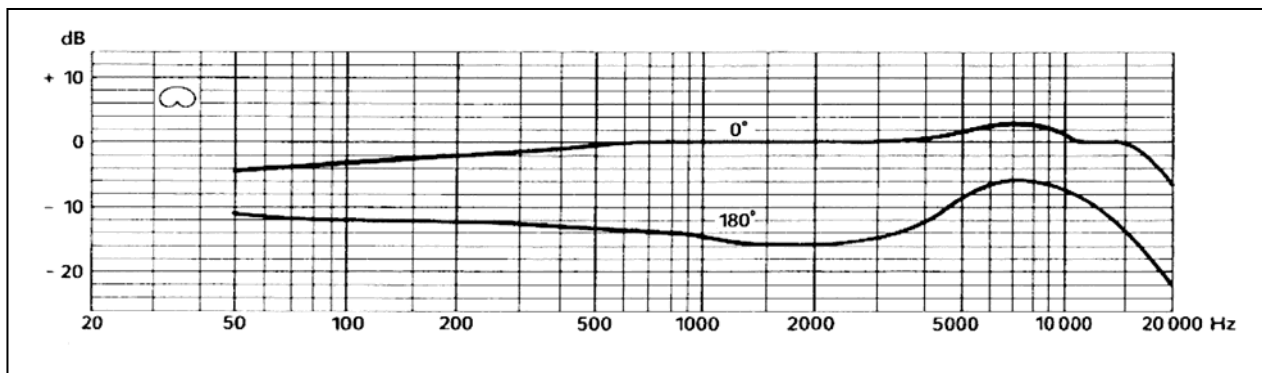
Druckgradientenempfänger:

- offenes Gehäuse
- verschiedene Richtcharakteristiken
- Nahbesprechungseffekt, verschieden stark

Schematischer Aufbau eines Druck- und Druckgradientenempfängers (rechts):



Richtungsabhängige Frequenzgänge eines Großmembranen-Kondensatormikrofons mit Nierencharakteristik:



Für Mikrofone gilt laut Studionorm als Übertragungsbereich der Pegelbereich, innerhalb dem der Ausgangspegel des Mikrofons gegenüber dem Pegel bei 1 kHz um 3 dB abgefallen ist. Leider kümmert sich kein Hersteller um die Studionorm, so dass oft der - 8-dB-Übertragungsbereich angegeben wird. Bei Mikrofonen ist oft nicht nur der Auf-Achse-Frequenzgang wichtig, sondern auch der im 30°-Winkel, da Reporter oft unter diesem Winkel sprechen.

Alle Schnelle- und Druckgradientenempfänger, also Mikrofone, die den Druckunterschied zwischen Membranenvorder- und -rückseite messen, sind Richtmikrofone und weisen einen sog. Nahbesprechungseffekt auf. Dabei erfährt der Frequenzgang für nahe am Mikrofon befindliche Schallquellen eine Anhebung im tiefen Frequenzbereich, die umso größer wird, je geringer der Mikrofonabstand und je tiefer die Frequenz ist. Die Anhebung setzt ein, wenn der Mikrofonabstand kleiner als die jeweilige Wellenlänge ist. Sie kommt zustande, weil die Druckdifferenz von Membranenvorder- und Membranenrückseite, die die Membrane auslenkt, aus zwei Komponenten zusammengesetzt ist:

1. Unabhängig von der Entfernung wird die Druckdifferenz zwischen Membranenvorder- und Membranenrückseite mit sinkender Frequenz geringer, was durch entsprechende Bassverstärkung im Mikrofon kompensiert wird (Fernfeldanteil).

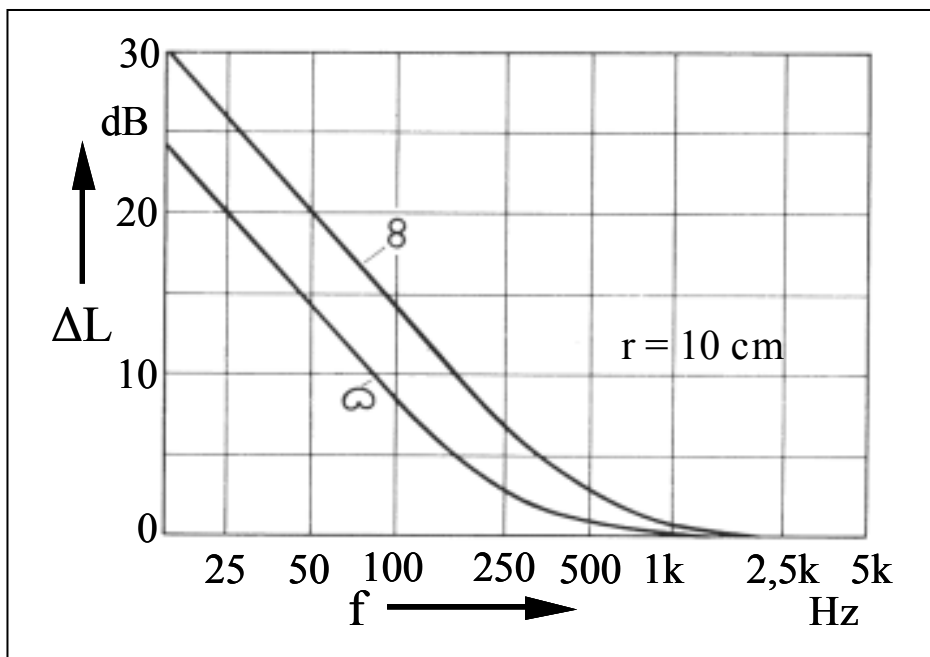
2. Im Nahfeld kommt jedoch eine stärkere frequenzunabhängige, zusätzliche Druckdifferenz hinzu, die umso stärker ist, je näher sich die Quelle am Mikrofon befindet.

Da auch diese frequenzunabhängige Komponente über die Bassverstärkung des Mikrofons geführt wird, ergibt sich eine Bassanhebung im Nahfeld.

Achterrichtcharakteristiken haben einen um 6 dB höheren Nahbesprechungseffekt als Nierenmikrofone. Bei Mikrofonabständen über 50 cm spielt der Effekt in der Praxis keine Rolle mehr.

Mikrofone, die den Effekt durch Absenkung tiefer Frequenzen kompensieren, heißen **Solistenmikrofone, Gesangsmikrofone oder Nahbesprechungsmikrofone**. Universalmikrofone haben oft einen Sprache/Musikschalter (Tiefen abgesenkt/linear). Das ideale Nahbesprechungsmikrofon ist aber der Druckempfänger. Er hat keinen Nahbesprechungseffekt und ist relativ unempfindlich für Popschall. Auch die breite Nierencharakteristik hat nur einen geringen Nahbesprechungseffekt.

Nahbesprechungseffekt: Pegelanhebung ΔL im Vergleich zur Kugelcharakteristik



Bei halbem Abstand (5 cm) verdoppeln sich die Frequenzangaben.

Bei fünffachem Abstand (50 cm) betragen die Frequenzangaben nur noch ein Fünftel.

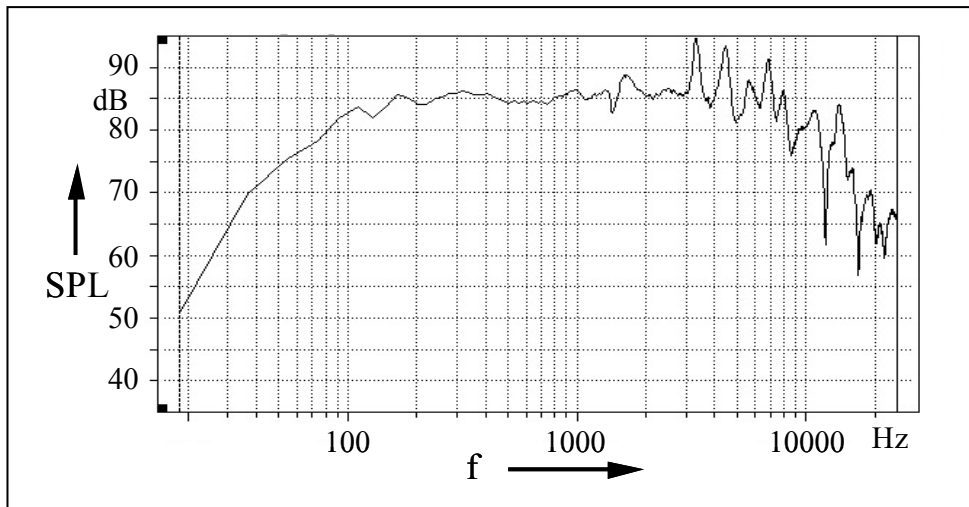
Beispiel: Pegelanhebung bei einem „Nierenmikro“ mit 40 cm Abstand bei 25 Hz?

5.1.2 Lautsprecher

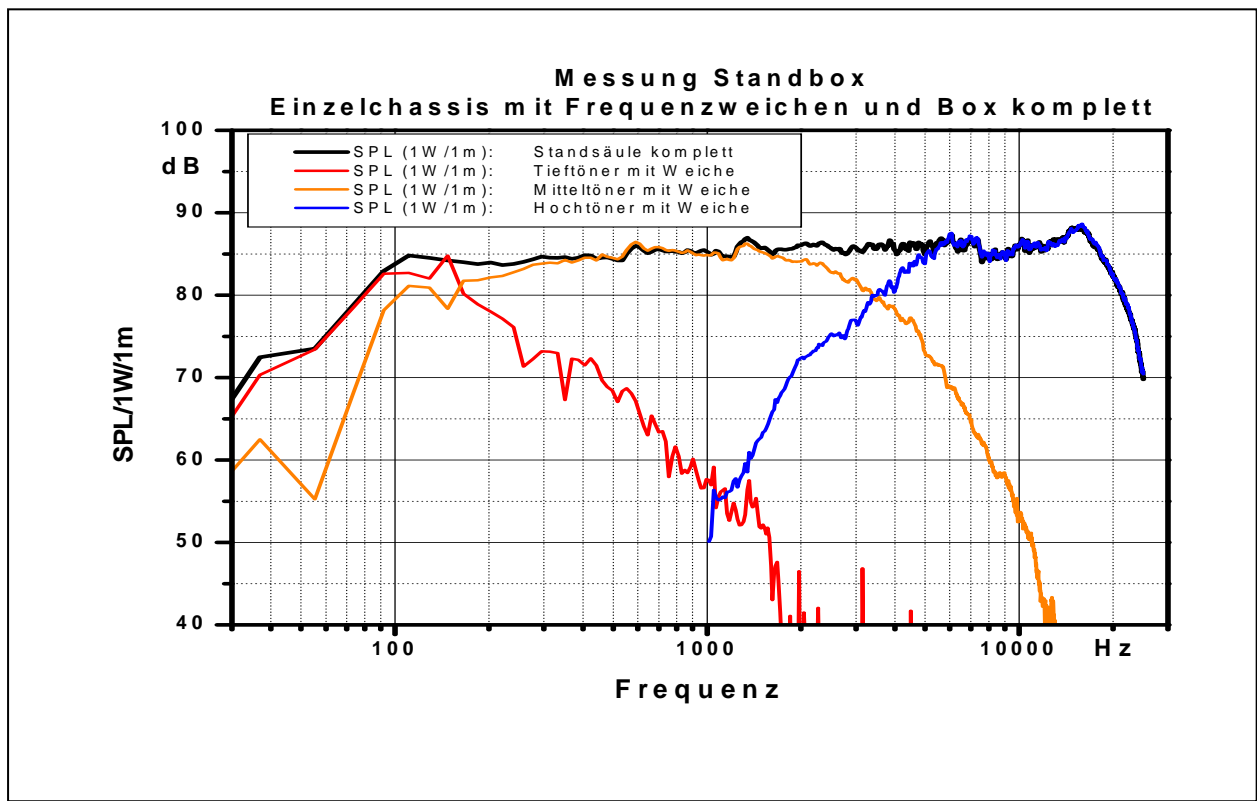
Da ein Lautsprecher meist nicht den kompletten Hörbereich wiedergeben kann, werden mehrere Lautsprecher in einer Box kombiniert. Durch Frequenzweichen werden nur die zugehörigen Frequenzbereiche an die entsprechenden Lautsprecher (Tief-, Mittel- und Hochtöner) durchgelassen, die anderen Bereiche werden weggefiltert. Zusätzlich sorgt die Frequenzweiche für eine Anpassung unterschiedlicher Lautsprecherempfindlichkeiten, um einen ausgewogenen Gesamttonfrequenzgang zu erreichen.

Als Übertragungsbereich einer Box wird nach EN 60268, Teil 5 vielfach der Pegel angegeben, bei dem zu tiefen und hohen Frequenzen der Schalldruckpegel um 10 dB abgefallen ist.

Frequenzgang eines Lautsprechers, gemessen im reflexionsarmen Raum bei 1 Watt elektrischer Eingangsleistung und 1 m Abstand des Mikrofons:



Frequenzgang einer 3-Wege-Standbox:



5.2 Richtcharakteristik

Mikrofone sind für einfallende Schallsignale aus verschiedenen Richtungen nicht gleich empfindlich. Meist erzeugt ein frontal einfallender Schalldruck eine höhere Ausgangsspannung als eine seitlich einfallende Schallwelle. Die Richtcharakteristik gibt daher Aufschluss über die bevorzugte Aufnahmerichtung des Mikrofons. Die Richtcharakteristik wird in einem Kreisdiagramm (Polarardiagramm) dargestellt, bei dem man sich das Mikrofon in der Mitte vorzustellen hat. Die Empfindlichkeit wird für alle Einfallrichtungen in einer geschlossenen Kurve dargestellt. Die Richtcharakteristik wird durch die Mikrophonkapsel bestimmt, während der Frequenzgang sich aus dem Zusammenspiel von Kapsel und Wandler ergibt.

Die Richtcharakteristik ist sehr stark frequenzabhängig. Je unabhängiger die Richtcharakteristik von der Frequenz ist, umso neutraler klingt das Mikrofon im diffusen Schallfeld. Je halliger ein Raum ist, desto eher werden Klangverfärbungen durch das Richtverhalten hörbar. Bei Tonaufnahmen im Freien (kein Diffusschall) spielen diese Verfärbungen keine Rolle.

Der **Richtungsfaktor** $\Gamma(\alpha, \omega)$ eines Mikrofons wird ermittelt, indem die Ausgangsspannung $U(\alpha)$ in Abhängigkeit vom Schalleinfallswinkel jeweils ermittelt wird und auf die in der Regel maximale Spannung bei Frontaleinfall ($\alpha = 0^\circ$) bezogen wird. Da die Mikrofonspannung proportional zum Schalldruck ist, entspricht der Richtungsfaktor auch den Schalldruckverhältnissen.

$$\frac{U_{\sim}(\alpha)}{U_{\sim}(0)} = \Gamma(\alpha) = \frac{p_{\sim}(\alpha)}{p_{\sim}(0)}$$

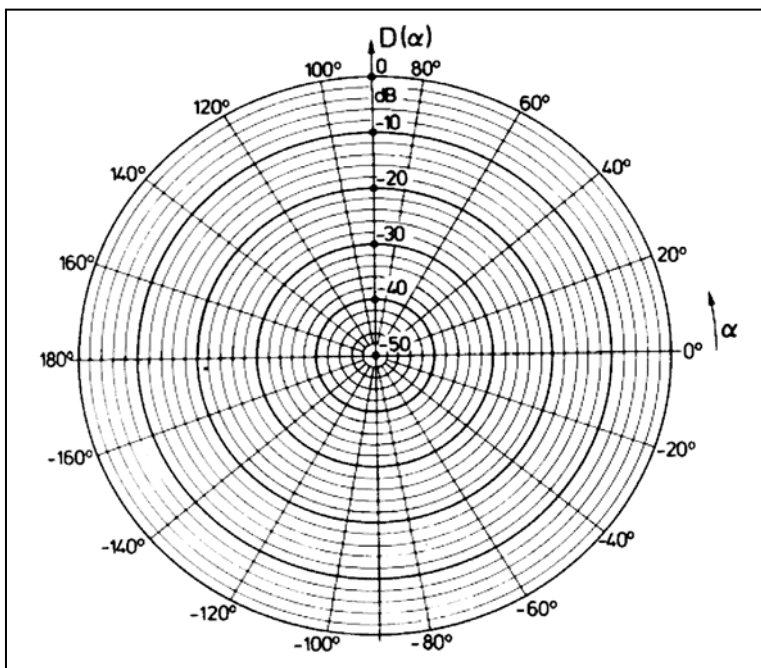
Im Richtdiagramm wird jedoch in vielen Fällen nicht der Richtungsfaktor, sondern das **Richtungsmaß** $D(\alpha, \omega)$ aufgetragen. Diese erhält man durch entsprechende Logarithmierung des Richtungsfaktors:

$$D(\alpha, \omega) = 20 \log \Gamma(\alpha, \omega) \text{ dB}$$

Hierbei ist zu beachten, dass der zu $\Gamma(\alpha, \omega) = 0$ gehörende Wert des Richtungsmaßes nicht mehr in Polarkoordinaten dargestellt werden kann, da $\log 0 = -\infty$. Der Dynamikbereich für das Richtungsmaß liegt daher meist bei:

$$-50 \text{ dB} \leq D(\alpha, \omega) \leq 0 \text{ dB}$$

Beispiel für das Koordinatennetz eines Richtdiagramms mit 50 dB Dynamik:



In vielen Fällen ist eine einzige Größe zur pauschalen Kennzeichnung der Richtwirkung nötig. Eine Größe zur Beschreibung der Bündelung in Form einer einzigen Zahl ist der **Bündelungsgrad** $\gamma(\omega)$, der durch Integration des quadrierten Richtungsfaktors $\Gamma(\alpha, \omega)$ über alle horizontalen Winkel α gewonnen wird. Da in der Regel auch die vertikale Bündelung berücksichtigt werden muss, wird $\Gamma(\alpha, \sigma, \omega)$ auch über die vertikalen Winkel σ integriert. Der Bündelungsgrad $\gamma(\omega)$ ist dann folgendermaßen definiert:

$$\gamma(\omega) = \frac{S}{\oint_S \Gamma^2(\omega) dS} \quad \text{z.B. } S = 4 \pi r^2 \quad \text{für Kugeloberfläche}$$

Der Bündelungsgrad $\gamma(\omega)$ wird zur Korrektur des gemessenen Hallradius verwendet und führt zur Berechnung des effektiven Hallradius. Die Wurzel von $\gamma(\omega)$ gibt hierbei an, um wieviel der Mikrofonabstand bei demselben Diffusschallanteil vergrößert werden kann verglichen mit einem Mikrofon mit kugelförmiger Richtcharakteristik. Kugelförmige Richtcharakteristik ergibt demnach $\gamma(\omega) = 1$.

Das **Bündelungsmaß** $d(\omega)$ errechnet sich aus dem Bündelungsgrad $\gamma(\omega)$ über den Logarithmus:

$$d(\omega) = 10 \log \gamma(\omega) \text{ dB}$$

Alle Beschreibungen der Richtungscharakteristiken gelten für Schallempfänger (Mikrofone) und Schallsender (Lautsprecher) gleichermaßen. Für Lautsprecher ist also $d(\omega)$ die Differenz zwischen dem in Hauptstrahlrichtung (0°) im Abstand r gemessenen Schalldruckpegel $L_F(\omega)$ und dem am gleichen Messpunkt gemessenen Schalldruckpegel $L_K(\omega)$ eines gedachten Kugelstrahlers, der die gleiche Schalleistung $P(\omega)$ abstrahlt.

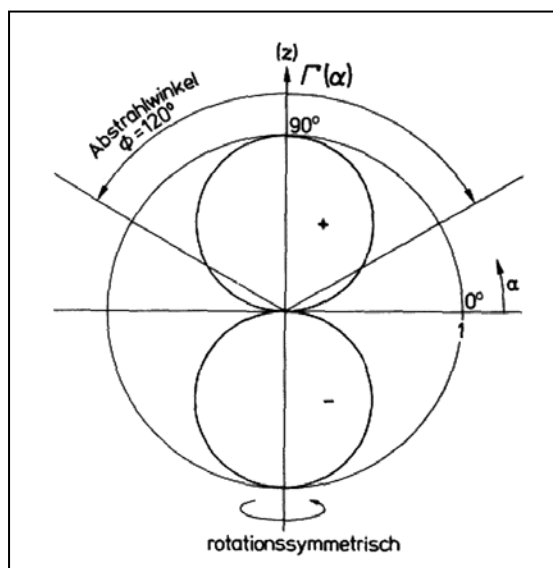
Ist die zu untersuchende Schallquelle eine Kugelschallquelle, so unterscheiden sich $L_F(\omega)$ und $L_K(\omega)$ nicht. Das Bündelungsmaß beträgt in diesem Fall $d(\omega) = 0 \text{ dB}$.

Als **Abstrahlwinkel** $\Phi(\omega)$ bezeichnet man den Winkel, innerhalb dessen gilt:

$$D \geq -6 \text{ dB}$$

Je höher die Bündelung, desto kleiner wird der Abstrahlwinkel. Dieser kann nur dann sinnvoll angegeben werden, wenn im Richtdiagramm $D \leq -6 \text{ dB}$ erreicht wird. Anstelle der Bezeichnung Abstrahlwinkel sind auch die englischen Begriffe **Dispersion-Angle** und **Beamwidth** gebräuchlich.

Richtdiagramm eines Dipolstrahlers:



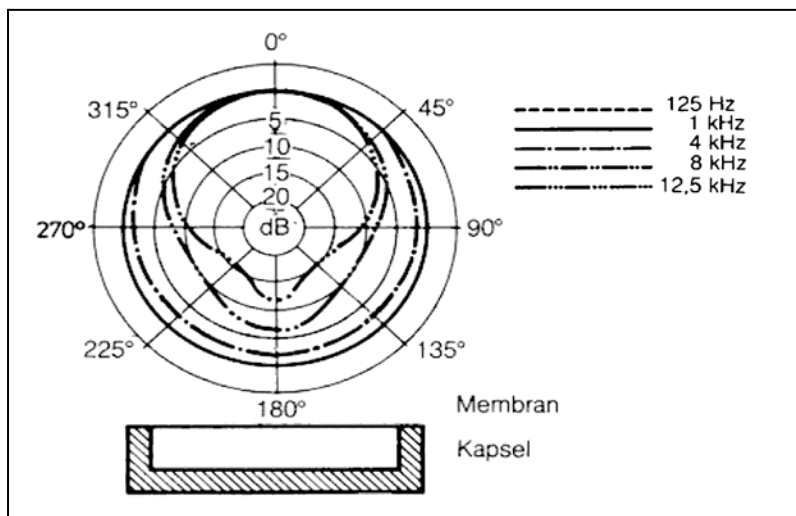
5.2.1 Richtcharakteristiken bei Mikrofonen

a, Kugelcharakteristik: $\gamma = 1$

Die Mikrofonmembrane bildet eine Seite einer akustisch dichten Mikrofonkapsel und wird durch die Schalldruckschwankungen bewegt. Sie ist für alle Schalleinfallrichtungen in gleicher Weise empfindlich, solange das Mikrofon wesentlich kleiner als die Wellenlänge der Schallwelle ist. Das Mikrofon hat deshalb Kugelcharakteristik. Oberhalb von rund 5 kHz wird der Schall wegen der geringen Wellenlänge nicht mehr vollständig um die Mikrofonkapsel herumgebeugt, so dass sich die Kugelrichtcharakteristik mit steigender Frequenz mehr und mehr über eine Art Nieren- bis hin zur Keulencharakteristik einengt.

Mikrofone mit Kugelcharakteristik sind meist reine Druckempfänger, d.h. es wird nur der Schalldruck vor der Membrane gemessen, das Luftvolumen hinter der Membrane ist bis auf eine kleine Öffnung zum statischen Luftdruckausgleich abgeschlossen.

Polardiagramm der Kugelcharakteristik mit Frequenzabhängigkeit:

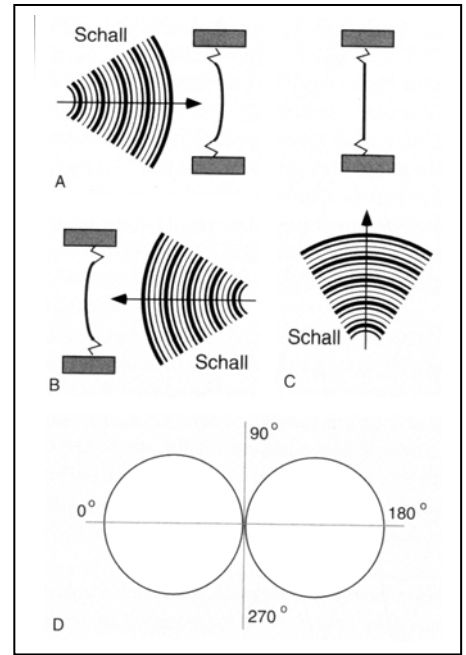
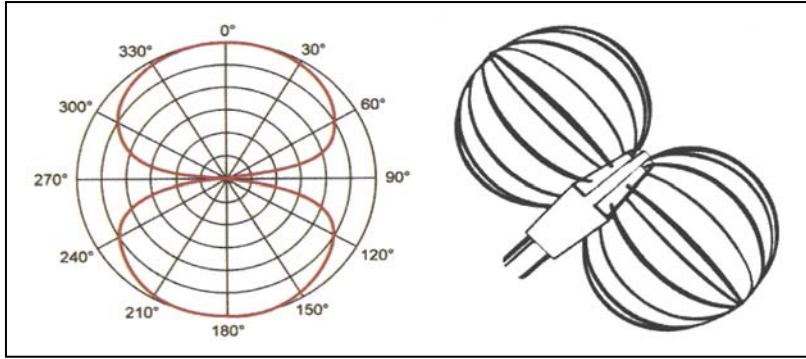


b, Achterrichtcharakteristik: $\gamma = 3$

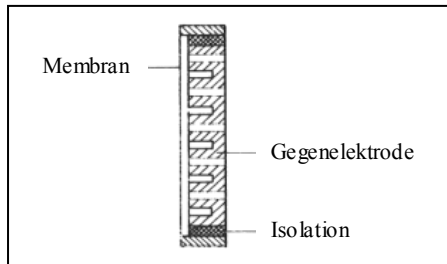
Beim Richtmikrofon mit nur Achterrichtcharakteristik kommt die Richtwirkung dadurch zustande, dass Schall auch von hinten an die Membrane gelangen kann und daher eine seitlich einfallende Schallwelle keine Auslenkung hervorruft. Man nennt Mikrofone, welche auch von hinten schalldurchlässig sind, Gradientenempfänger.

Die achtförmige Richtcharakteristik ist weitgehend frequenzunabhängig. Seitlicher Schall wird um 20 bis 25 dB ausgeblendet. Die Acht ist die Richtcharakteristik mit der besten Trennung einzelner nebeneinander liegender Schallquellen, sie übertrifft in ihrer Richtungsselektivität auch Rohrmikrofone. Verglichen mit der Kugel kann der Mikrofonabstand bei demselben Diffusfeldanteil genau wie bei der Niere um das 1,7fache ($= \sqrt{\gamma} = \sqrt{3}$) vergrößert werden. Die Acht bietet vor allem beim Einzel- und Stützmikrofonverfahren eine interessante Alternative zu den verschiedenen Nieren.

Polardiagramm der Achtcharakteristik und räumliche Darstellung: Schalleinwirkung:



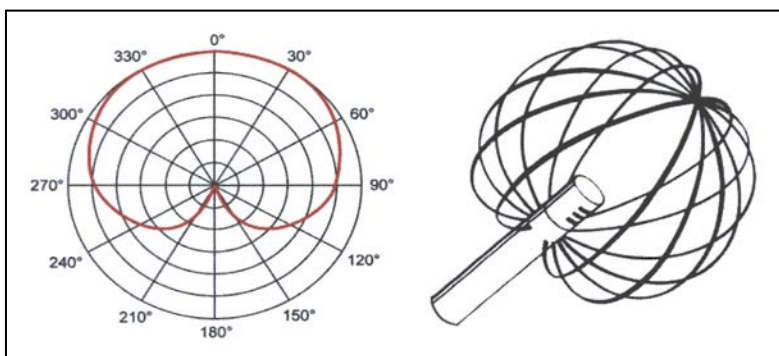
Prinzip des Druckgradientenmikrofons:



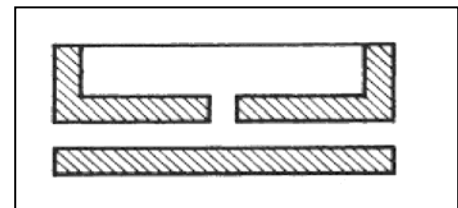
c, Nierencharakteristik (Cardioide): $\gamma = 3$

Auch Mikrofone mit Nierencharakteristik sind Druckgradientenempfänger. Die Richtwirkung wird dadurch realisiert, dass von rückwärts eintreffender Schall einen gleich langen Weg zur Vorder- und Rückseite der Membrane zurücklegen muss und so die Membrane nicht auslenken kann. Die Ausblendung rückwärtigen Schalls, aber nur bei 180°, ist bei der Nierencharakteristik am besten, frequenzabhängig über 20 dB bei tiefen Frequenzen und zu hohen Frequenzen hin abnehmend. Im 90°-Winkel eintreffender Schall wird dabei nur um 6 dB abgedämpft. In einem Bereich von $\pm 45^\circ$ um die Hauptrichtung hat das Mikrofon praktisch dieselbe Empfindlichkeit. Die Richtungsselektivität nach vorne und zur Seite ist also relativ wenig ausgeprägt. Auch bei der Niere wird der Mikrofonabstand bei gleichem Diffusfeldanteil um das 1,7fache vergrößert.

Polardiagramm der Nierencharakteristik und räumliche Darstellung:



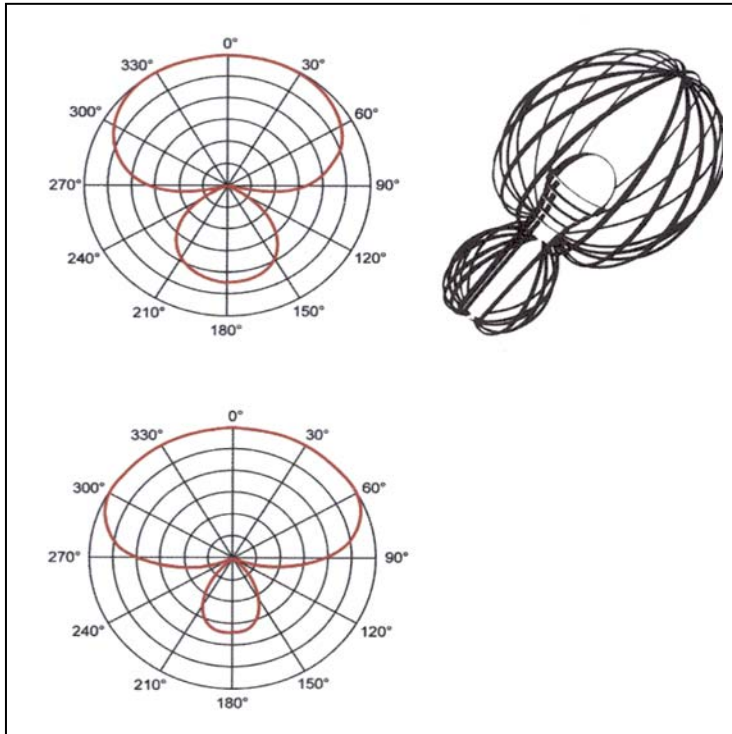
Niere durch Laufzeitglied:



d, Hypernieren- und Supernierencharakteristik: $\gamma = 3,6$

Die Richtwirkungen dieser Mikrofone können als unsymmetrische Achterrichtcharakteristik betrachtet werden. Die Hyperniere nimmt bei Ausrichtung auf die Schallquelle von allen Richtcharakteristiken den geringsten Diffusschallanteil auf. Gegenüber der Kugelcharakteristik kann der Mikrofonabstand bei gleichem Diffusfeldanteil um Faktor 1,9 ($= \sqrt{\gamma} = \sqrt{3,6}$) vergrößert werden. Die maximale Ausblendung liegt bei der Hyperniere bei einem Winkel von 110°. Die Superniere hat eine geringfügig breitere Richtcharakteristik als die Hyperniere, weist dafür aber eine bessere Rückwärtsdämpfung auf. Der „tote Winkel“ der Superniere liegt bei 135°.

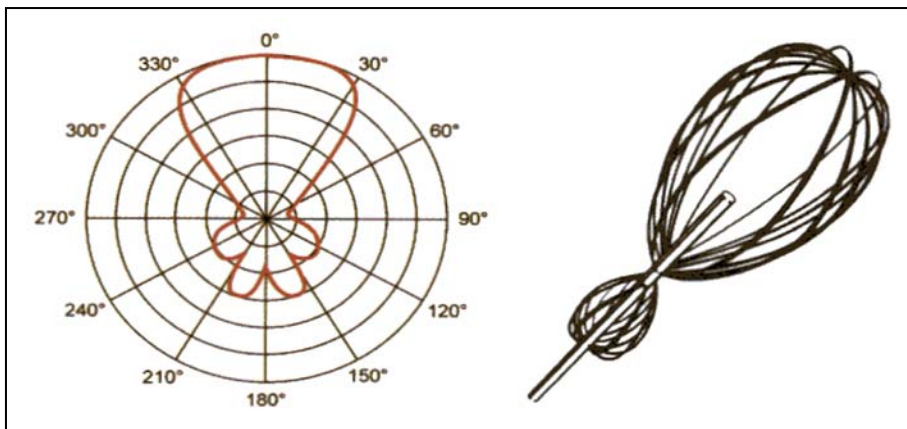
Polardiagramm der Hyper- (oben) und Supernierencharakteristik, räumliche Darstellung:



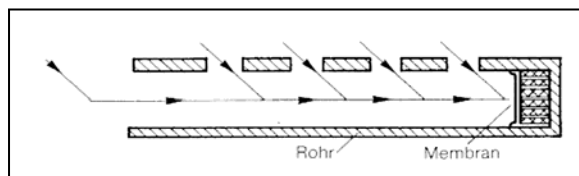
e, Rohrrichtmikrofone

Sie haben eine keulenförmige Richtcharakteristik, die besonders bei hohen Frequenzen den Aufnahmebereich auf einen engen Winkelbereich konzentrieren. Auf größeren Entfernungen können die Mikrofone nur dann einen Gewinn bringen, wenn ausreichend Direktschall ankommt, also bei kurzer Nachhallzeit und in größeren Räumen. Sie arbeiten als Druckgradientenempfänger mit einem für Frequenzen über etwa 1 kHz die Richtwirkung verbessernden Rohrvorsatz. Da der Schall, der seitlich auf das geschlitzte Richtrohr trifft, sich mit unterschiedlichen Phasenlagen der im Rohr sich ausbreitenden Schallwelle überlagert, wird seitlicher Schall durch Interferenz teilweise ausgelöscht. Daher kommt auch die Bezeichnung Interferenzempfänger. Rohrrichtmikrofone werden vielfach bei Kameraaufnahmen eingesetzt, wenn das Mikrofon relativ weit vom Sprecher entfernt sein muss.

Polardiagramm der Keulencharakteristik und räumliche Darstellung:



Aufbau Rohrrichtmikrofon:

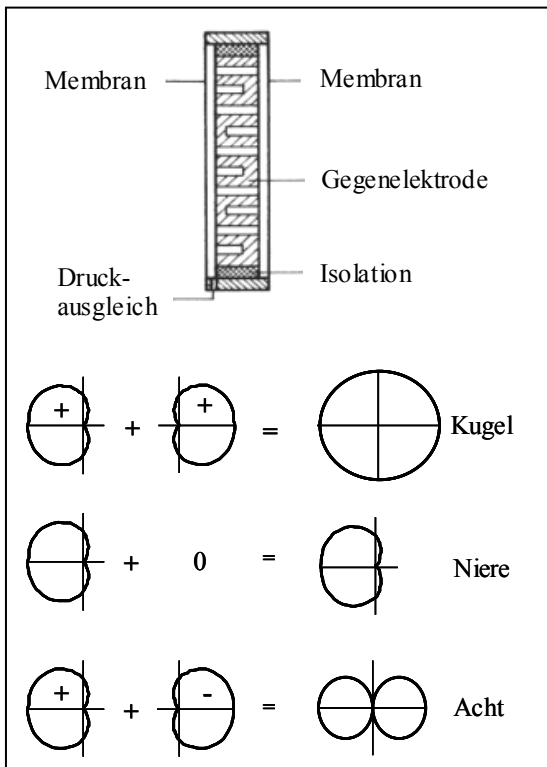


f, Umschaltbare Richtcharakteristiken

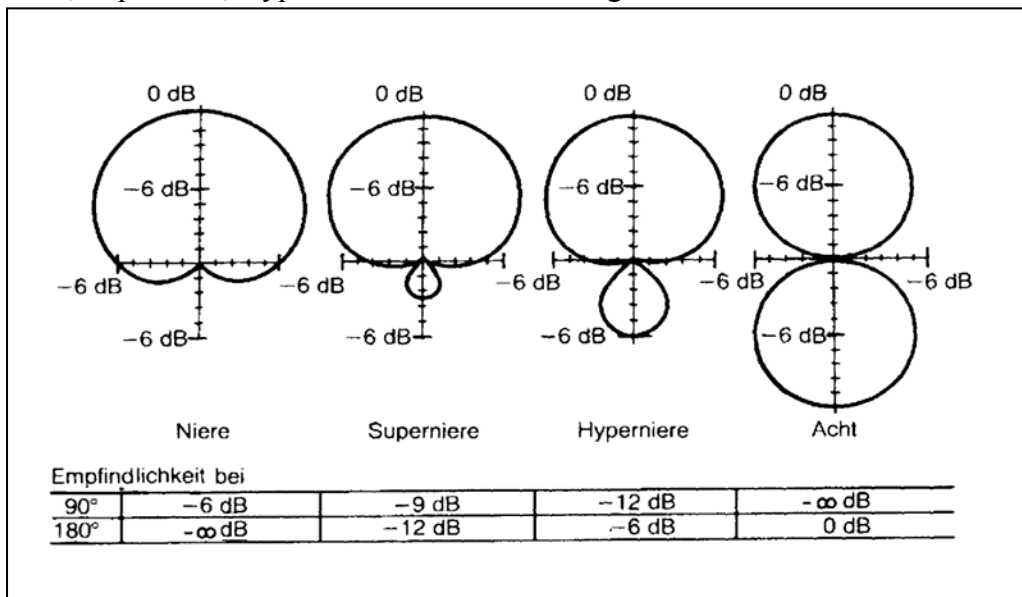
Kondensatormikrofone können nach folgenden Prinzipien umschaltbar sein:

- Durch rein mechanisch umschaltbare Elemente ist die Mikrofonkapsel entweder von hinten verschlossen (Kugel), offen (Acht) oder über ein Laufzeitglied offen (Niere, Hypernieren).
- Beim Doppelmembranenmikrofon werden zwei entgegengesetzt ausgerichtete Nierenmikrofone, die eine gemeinsame Gegenelektrode haben, entweder in Phase zusammenschaltet (Kugel, breite Niere), gegenphasig zusammenschaltet (Acht, Hypernieren) oder es wird nur eine Membrane benutzt (Niere).

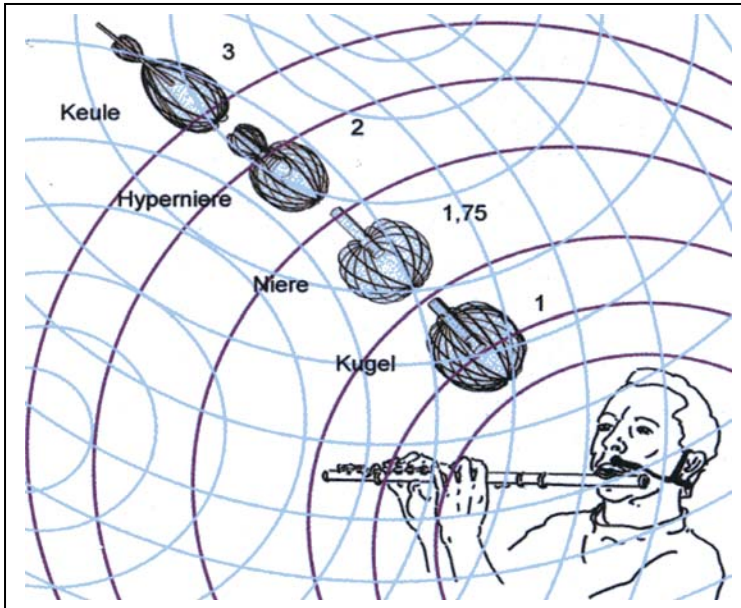
Doppelmembranenempfänger, Aufbau und wählbare Richtcharakteristiken:



Niere, Superniere, Hypernieren und Acht im Vergleich:



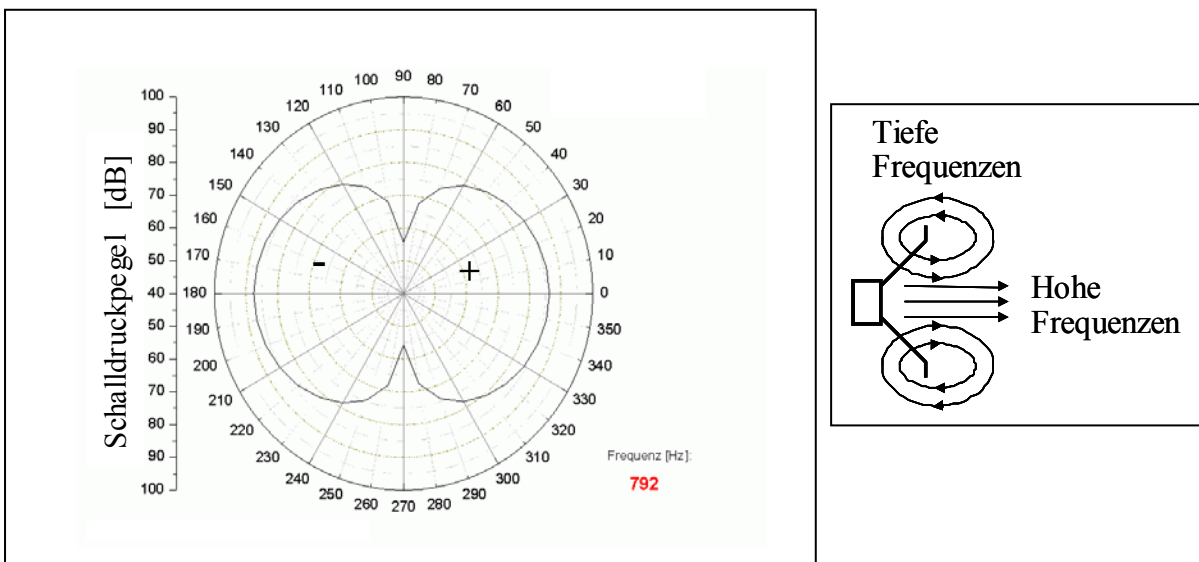
Mikrofonabstand von Richtmikrofonen bei gleichem Diffusschallanteil:



5.2.2 Richtcharakteristik bei Lautsprechern

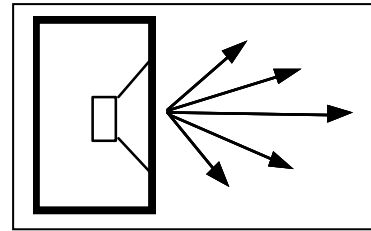
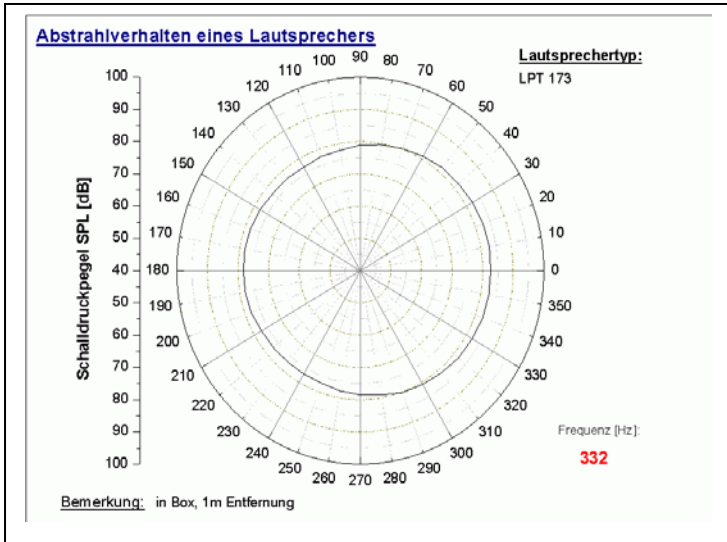
Auch bei der Schallwiedergabe ergeben sich entsprechende Richtcharakteristiken. Lautsprecher, welche nicht in eine entsprechende Box eingebaut sind, haben eine achtförmige Abstrahlungscharakteristik. Seitlich gleicht sich bei tiefen Frequenzen der Schalldruck der Membranenseite mit dem Schallsog an der Rückseite aus und umgekehrt. Man spricht vom sog. akustischen Kurzschluss. Bei hohen Frequenzen können die Luftteilchen sich nicht mehr so schnell ausgleichen, doch bündelt der Lautsprecher in diesem Frequenzbereich sehr stark.

Richtcharakteristik eines Tiefton-Lautsprechers im akustischen Kurzschluss:

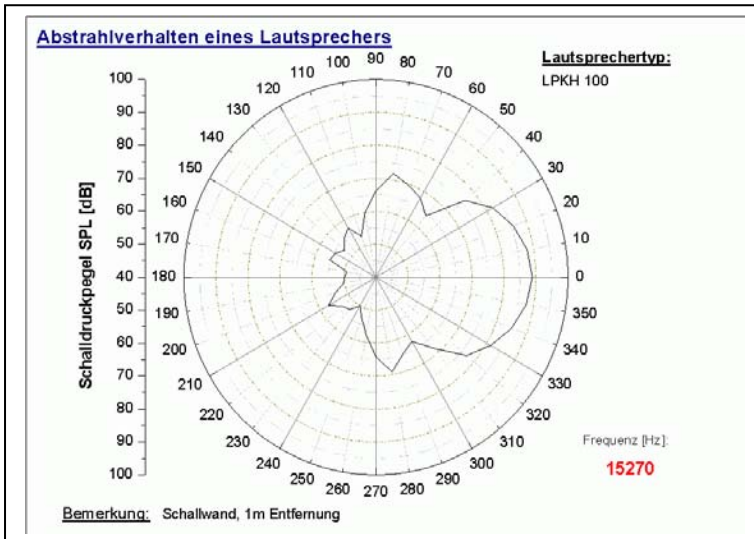


Lautsprecher in der Box wirken bei tiefen Frequenzen ($\lambda > \text{Boxabmessungen}$) aufgrund von Beugungseffekten als Kugelstrahler. Erst bei kleineren Wellenlängen als die Boxenabmessung tritt eine gerichtete Schallbündelung auf. Daher sind Hochtöner bei Lautsprecherboxen stets in Ohrhöhe angebracht.

Richtcharakteristik eines Tiefton-Lautsprechers in der Box bei tiefen Frequenzen:

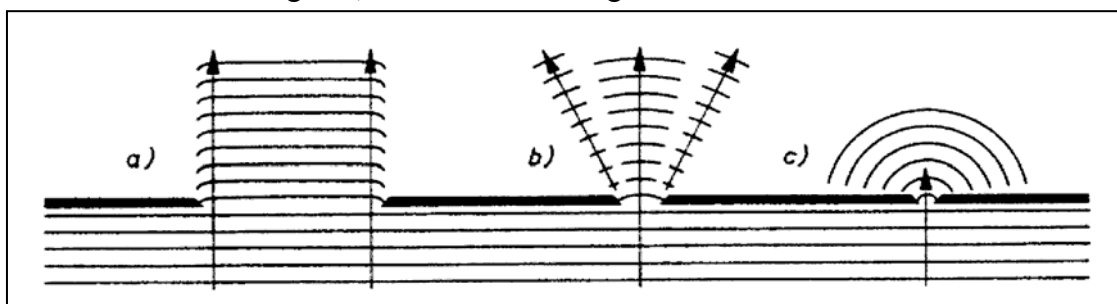


Richtcharakteristik eines Hochton-Lautsprechers in einer Box:



Sind die Abmessungen eines Hindernisses oder einer darin enthaltenen Öffnung groß gegenüber der Wellenlänge λ , erhält man durch das Wellenfeld eine exakte Schattenabbildung. Sind jedoch Hindernisabmessungen und Wellenlänge miteinander vergleichbar, ist eine Schattenprojektion aufgrund der auftretenden Beugungserscheinungen nicht mehr gegeben. Wellen dringen dann merklich über die geometrische Grenze in den Schattenraum ein. Ein gegenüber der Wellenlänge kleines Loch im Hindernis wirkt wie ein Punkt, von dem eine kugelförmige Elementarwelle ausgeht. Praktisches Beispiel ist ein in eine 20 cm breite Öffnung eingebauter Basslautsprecher, der tiefe Frequenzen nach allen Seiten abstrahlt (Kugelstrahler), obwohl sich seine Membrane nur in eine Richtung bewegt.

Durchgang einer ebenen Welle: a, durch eine Öffnung \gg Wellenlänge λ . b, durch eine Öffnung von der Größenordnung λ . c, durch eine Öffnung $\ll \lambda$.



6. Mikrofonaufnahmeverfahren

6.1 Mikrofontypen

6.1.1 Kondensatormikrofon

Kondensatormikrofone basieren auf dem elektrostatischen Wandlerprinzip, bei dem die Membranmasse sehr gering gehalten werden kann, so dass diese Mikrofone einen sehr breitbandigen Frequenzgang und ein sehr gutes Impulsverhalten aufweisen. Ihre Empfindlichkeit liegt um ca. 10 dB höher als die der anderen Mikrofonarten. Kondensatormikrofone werden meist mit einer 48-V-Phantomspesung vom Mischpult oder einer externen Spannungsversorgung zum Aufbau der notwendigen Gleichspannung und zum Betrieb des in den Griff eingebauten Vorverstärkers gespeist. Ältere Messmikrofone benötigen 200 V Speisespannung.

Im Studio werden fast ausschließlich Kondensatormikrofone eingesetzt, ebenso für Messaufgaben. Im Live-Einsatz sind sie aufgrund ihrer höheren Empfindlichkeit anfällig gegenüber Rückkopplungen.

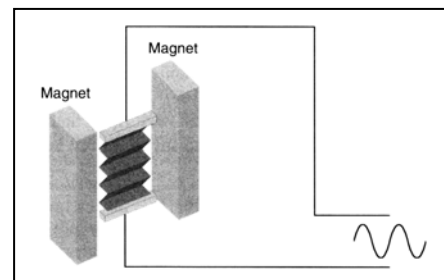
6.1.2 Elektretmikrofon

Dieser Typ funktioniert ebenfalls nach dem elektrostatischen Prinzip, er benötigt jedoch keine Vorspannung der Mikrofonkapsel, da hierzu eine dauerhaft polarisierte Folie, ein sogenanntes Elektret, verwendet wird. Dies ist für den Außeneinsatz interessant, es wird jedoch nicht die hohe Qualität von Kondensatormikrofonen erreicht und die Elektretfolie unterliegt einer Alterung.

6.1.3 Bändchenmikrofon

Die Membrane besteht bei diesem Mikrofon aus einem sehr leichten Aluminiumstreifen, der zwischen zwei Polen eines Dauermagneten eingespannt ist. Durch den sehr linearen Frequenzgang und das sehr gute Impulsverhalten ist es in der Klangqualität mit dem Kondensatormikrofon vergleichbar.

Prinzip eines Bändchenmikrofons:



6.1.4 Elektrodynamisches Mikrofon

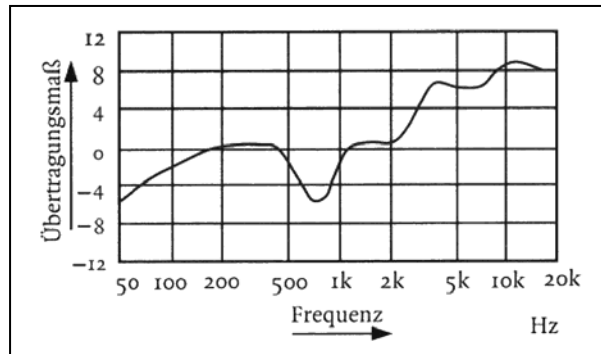
Wegen der höheren Masse von Membrane mit Spule ist das Eigenschwingverhalten des auf dem elektrodynamischen Prinzip beruhenden Mikrofons schlechter, der Frequenzgang nicht im gesamten Übertragungsbereich linear und das Impulsverhalten träger. Allerdings ist die robuste Bauweise beim Live-Einsatz vorteilhaft und hohe Schalldrücke können noch ohne Verzerrungen wiedergegeben werden. Da der Frequenzgang nicht über den gesamten Hörbereich linear ist, sind die Mikrofone für eine bestimmte Anwendung optimiert. Das D112 von AKG z.B. für die Aufnahme von tiefrequenten Klängen einer Bassdrum, das SM 58 von Shure für Vokalaufnahmen.

6.1.5 Lavalier-Mikrofon

Diese Mikrofone sind für das Anstecken im Brustbereich von Sprechern konstruiert. Sie sind unempfindlich gegen Körperschall wie Reibegeräusche der Kleidung. Sie sind an die Besonderheiten der Schallabstrahlung menschlicher Sprache angepasst. Hohe Frequenzen werden wegen ihrer

gerichteten Abstrahlung verstärkt, mittlere Frequenzen um 800 Hz werden wegen ihrer resonanzartigen Überhöhungen abgeschwächt.

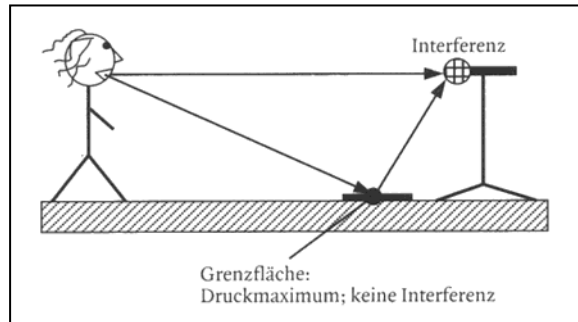
Frequenzgang eines Lavalier-Mikrofons:



6.1.6 Grenzflächenmikrofon

Grenzflächenmikrofone werden direkt an reflektierende Flächen wie Wände, Böden oder Tischen angebracht, nicht an Stativen montiert. An Grenzflächen weist der Schalldruck immer ein Maximum auf, wodurch der Wirkungsgrad an solchen Orten höher ist. Zudem lassen sich störende Phaseneffekte, die zu Interferenzen zwischen Direktschall und Reflexionen führen können, vermeiden.

Grenzflächenmikrofon:



6.1.7 Körperschallmikrofon

Körperschall- oder Pick-up-Mikrofone werden direkt am Resonanzkörper von Instrumenten befestigt. Üblicherweise hat der Körperschall aber andere Eigenschaften als der vom Zuhörer wahrgenommene Umgebungsschall, so dass sich diese Mikrofone im Studiobetrieb nicht durchgesetzt haben. Im Live-Einsatz finden sie jedoch häufig an Gitarren und Bassinstrumenten Einsatz, weil nur der Instrumentenklang und keine anderen Umgebungsgereusche aufgezeichnet werden.

6.1.8 Großmembranmikrofon

Diese Kondensatormikrofone haben einen Membranendurchmesser von 25 mm und mehr, während Kleinmembranmikrofone Durchmesser von 10 bis 25 mm aufweisen und daher wegen ihrer geringeren Masse Details von Schallschwingungen leichter folgen können und gleichmäßigere Charakteristiken besitzen. Bedingt durch ihr Konstruktionsprinzip weisen Großmembranmikrofone jedoch mehr Tiefen auf und geben dem Instrument dadurch mehr Volumen und Fülle. Marketingphilosophie: Große Membrane = großer Sound

6.1.9 Röhrenmikrofon

Röhrenmikrofone besitzen statt eines Transistorverstärkers einen separat zu beheizenden Röhrenverstärker, der mehr Verzerrungen produziert. Dadurch entsteht ein charakteristischer, „warmer“ Sound, speziell für Sprachaufnahmen. Marketingphilosophie: Warme Röhre = warmer Sound

6.2 Stereoverfahren

Bei einer Tonaufnahme bestimmt die Aufnahmesituation das Stereophonieverfahren. Hierbei werden drei Methoden unterschieden, über die ein Stereoeindruck hervorgerufen werden kann:

- Intensitätsverfahren: unterschiedliche Intensitäten an beiden Ohren
- Laufzeitverfahren: unterschiedliche Schalllaufzeiten zwischen den Ohren
- Äquivalenzstereophonie oder gemischte Stereophonie: beide Verfahren gemischt

Werden alle Instrumente und Stimmen in Mehrspurtechnik nacheinander monophon aufgezeichnet und später auf ein Zweispurband gemischt, so ist das Ergebnis eine rein intensitätsstereophone Aufnahme. Bei der Mischung können nämlich zwischen den Kanälen nur Pegelunterschiede, aber keine Laufzeitunterschiede eingestellt werden. Wird aber schon bei der Aufnahme zweikanalig mit mehreren Mikrofonen oder mit speziellen Stereoanordnungen gearbeitet, dann können auch Phaseninformationen aufgezeichnet werden. Eine solche Aufnahme kann, je nach Mikrofonauswahl und -anordnung, auch laufzeit- oder äquivalenzstereophon sein.

Stereomikrofone sind spezielle Mikrofone, die für die Herstellung von Stereoaufnahmen nach den verschiedenen Verfahren benutzt werden. In Prinzip bestehen alle Stereomikrofone aus zwei getrennten Mikrofonen, die in einer Baueinheit zusammengefasst sind.

Die räumliche Abbildungstreue eines Stereomikrofons ist nicht messbar. Wie gut das Mikrofon reale Schallquellen im Aufnahmeraum als Phantomschallquellen im Wiedergaberaum darstellen kann, ist kein physikalisches, sondern ein psychoakustisches Problem und damit auch vom aufgenommenen Klang und vom Zuhörer abhängig. In verschiedenen Aufnahmesituationen sind oft auch verschiedene Stereoverfahren vorteilhaft. Wenn dem nicht so wäre, gäbe es vermutlich nur ein Stereomikrofon, nämlich das beste.

Außer in ihren Eigenheiten bei der Abbildung der Räumlichkeit unterscheiden sich die Stereoverfahren noch in der **Monokompatibilität**. Bei einer Monomischung wird das zweikanalige Signal auf ein einkanaliges Monosignal reduziert. Ein großer Teil der Rauminformation geht dabei verloren. Ob darüber hinaus weitere Einbußen im Klang zu erwarten sind hängt vom Stereoverfahren und von der Methode der Monomischung ab. Wird keine spezielle Monomischung angefertigt, sondern die Stereoaufnahme lediglich einkanalig abgespielt, dann treten die Unterschiede der verschiedenen Stereoverfahren zutage. In monophonen Geräten werden nämlich Stereosignale durch Summierung der Stereokanäle zum Monosignal reduziert und diese Methode bekommt den verschiedenen Verfahren verschieden gut. Es ist bei der Entscheidung für das eine oder andere Stereoverfahren also auf jeden Fall eine Überlegung wert, ob die Aufnahmen auch monophon abgespielt gut klingen sollen.

Bei Quasi-Live-Aufnahmen und Benutzung akustischer Instrumente sind Stereomikrofone das geeignete Aufnahmewerkzeug. Dazu zählen Hörspiele, Aufnahmen räumlich ausgedehnter Schallquellen (Bläusersatz, Chor, Flügel, Schlagzeug) und schließlich ganz allgemein Aufnahmen akustischer Musik, bei denen alle Musiker gleichzeitig und in einem Raum spielen (Klassik immer, Jazz oft, Rock selten). In der klassischen Studiotechnik ist das Stereomikrofon deshalb das wichtigste Mikrofon. Bei der „modernen“ Aufnahme im Mehrspurverfahren wird es oft zur Aufnahme akustischer Instrumente benutzt.

Der **Öffnungswinkel** einer Stereoanordnung ist der Winkel zwischen den beiden Kapseln bzw. der Winkel zwischen den Hauptaufnahmerichtungen. Der **Versatzwinkel** ist derjenige Winkel, um den die Kapseln aus der Vorwärtsrichtung herausgedreht werden. Mit **Aufnahmewinkel** ist häufig derjenige Winkel gemeint, der von der Stereoanordnung mit einem relativen Pegelabfall von 3 dB gegenüber der Vorwärtsrichtung aufgezeichnet wird.

6.3 Intensitätsstereophonie

Als Pegel- oder Intensitätsstereophonie werden alle Aufnahmeverfahren bezeichnet, bei denen sich die beiden Kanäle nur im Pegel, nicht aber in der Phasenlage der verschiedenen Quellen unterscheiden: Ein Instrument, das auf der rechten Seite abgebildet werden soll, ist auf dem linken Kanal leiser als auf dem rechten. Pegelunterschiede entstehen zwischen den Ohren bei Frequenzen ab etwa 1 kHz, wofür das Gehör sehr empfindlich ist. Die Intensitätsstereophonie liefert also Aufnahmen mit sehr präziser Richtungsabbildung der Schallquellen, einzelne Instrumente oder Stimmen können im Gesamtklang gut geortet werden.

Intensitäts-Stereoaufnahmen zeigen eine besonders gute Richtungsabbildung.

Intensitätsstereophone Aufnahmen werden mit dem XY- oder MS-Verfahren hergestellt. Die Mikrofonensignale von XY- und MS-Mikrofonen sind im Prinzip äquivalent. Durch Summen- und Differenzbildung der Kanäle können sie ineinander übergeführt werden.

Eine entsprechende Anordnung lässt sich mit zwei identischen Einzelmikrofonen oder mit einem Stereo-Koinzidenzmikrofon realisieren, bei dem jeweils zwei getrennte Mikrofonensysteme dicht übereinander angeordnet sind (lat. koinzidere = zusammenfallen).

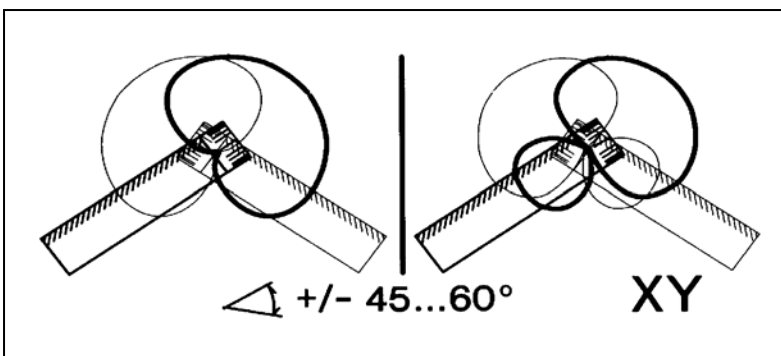
Monokompatibilität:

Aufnahmen in Intensitätsstereophonie sind ideal für die Monowiedergabe, da es keine Laufzeit- oder Phasenunterschiede zwischen den beiden Kanälen gibt. Das Monosignal wird einfach durch Summierung der beiden Kanäle erzeugt. Da die Signalanteile einer Quelle auf beiden Kanälen phasengleich sind, ist die Summation problemlos und das Ergebnis entspricht klanglich in etwa dem Stereosignal. Bei der MS-Methode ist die Monomischung noch einfacher, falls die Aufnahme auch als M und S aufgezeichnet wird. Hier trägt einer der Kanäle (M) bereits das Monosignal, der andere (S) wird weggelassen.

6.3.1 XY-Verfahren

Beim XY-Verfahren bezeichnet X den linken und Y den rechten Stereokanal. Das XY-Mikrofon besteht aus zwei gerichteten Kapseln mit gleicher Richtcharakteristik, die unmittelbar übereinander angeordnet und gegeneinander angewinkelt sind. Dadurch, dass die beiden Kapseln sehr dicht beieinander liegen, treten praktisch keine Phasenunterschiede zwischen den Kapselsignalen auf. Eine seitlich eintreffende Schallwelle wird entsprechend der Ausrichtung der Kapseln von der einen stärker, von der anderen schwächer aufgezeichnet.

XY-Anordnung: Zwei Gradientenkapseln mit gleicher Richtcharakteristik. links: Niere, rechts: Hypernieren. Versatzwinkel: $45^\circ - 60^\circ$

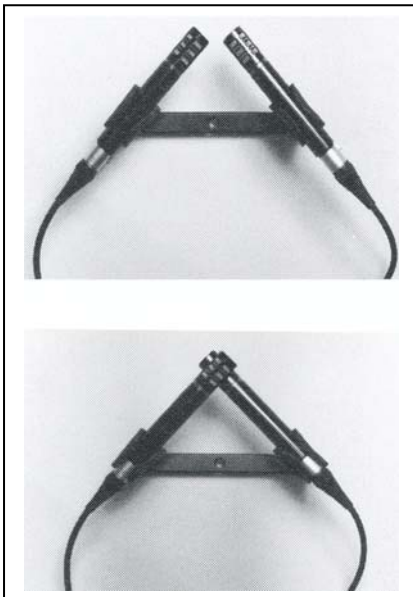


Häufig werden die Kapseln auch so angeordnet, dass die Richtcharakteristiken sich in 0°-Richtung genau mit ihren -3 dB-Punkten treffen, so dass über den gesamten Öffnungswinkel des Mikrofons der aufgenommene Pegel nahezu konstant bleibt

Richtcharakteristik	Versatzwinkel	Öffnungswinkel
Niere	65,5°	131°
Superniere	57,5°	115°
Hyperniere	52,5°	105°

Zur Aufnahme in XY-Technik können spezielle Koinzidenz-Stereomikrofone verwendet werden, bei denen zwei Kapseln in einem Gehäuse untergebracht sind. Oder es werden zwei Mikrofone auf einer Stereoschiene gegeneinander angewinkelt montiert. Dabei ist darauf zu achten, dass der von rechts kommende Schall auch das für den von rechts kommenden Schall zuständige Mikrofon zuerst erreicht. Andernfalls kann es wegen der Richtungswahrnehmung nach dem Gesetz der ersten einfallenden Wellenfront zu einer fehlerhaften Abbildung der Stereobasis kommen.

Falsche (oben, da Schall von rechts zuerst nach links ausgerichtetes Mikrofon erreicht) und richtige (unten) XY-Anordnung:



6.3.2 MS-Verfahren

Im MS-Mikrofon (M = Mitte, S = Seite) sind wie im XY-Mikrofon zwei Kapseln dicht übereinander montiert. Beide Kapseln haben aber verschiedene Richtcharakteristiken (Acht und beliebige andere Charakteristik) und sie stehen immer senkrecht zueinander.

Das von der ungerichteten Kapsel aufgezeichnete Signal ist das Mitten- oder Mono-Signal. Die zwingend notwendige, quer liegende Achtercharakteristik zeichnet das Seitensignal, also Informationen von der rechten und von der linken Seite auf. Die positive Seite der Achtercharakteristik (z.B. am Mikro: 0°) muss dabei nach links zeigen. Wird bei MS das Achtermikrofon falsch aufgebaut oder verkehrt herum gehalten (schnell passiert), dann werden dadurch linker und rechter Kanal vertauscht.

Für originaltreue Wiedergabe müsste ein Lautsprecher das Mittensignal wiedergeben und der andere Lautsprecher quer dazu aufgestellt mit achtförmiger Richtcharakteristik abstrahlen. Für die heute gebräuchliche Wiedergabeordnung mit linkem und rechtem Kanal muss das MS-

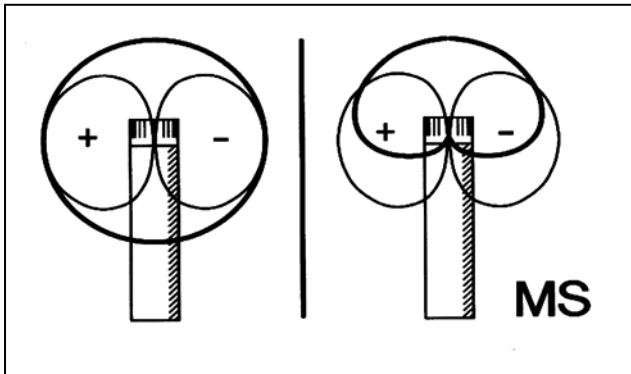
Signal erst in ein XY-Signal umgewandelt werden. Dies geschieht durch Summierung bzw. Differenzbildung der beiden Kanäle:

$$X \text{ (links)} = M + S; \quad Y \text{ (rechts)} = M - S$$

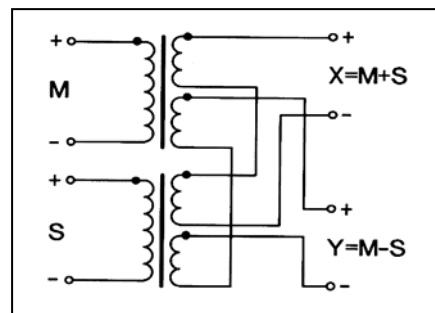
$$M = X + Y; \quad S = X - Y$$

Die Kombination von Kugel – und Achtercharakteristik entsprechen dabei den entgegengesetzt ausgerichteten Nierencharakteristiken eines XY-Verfahrens. Die Umwandlung zwischen den Verfahren erfolgt entweder über elektronische Matrixschaltungen oder über passive Differentialübertrager.

MS-Verfahren: M-Mikrofon mit Kugelcharakteristik (links) und Nierencharakteristik (rechts):



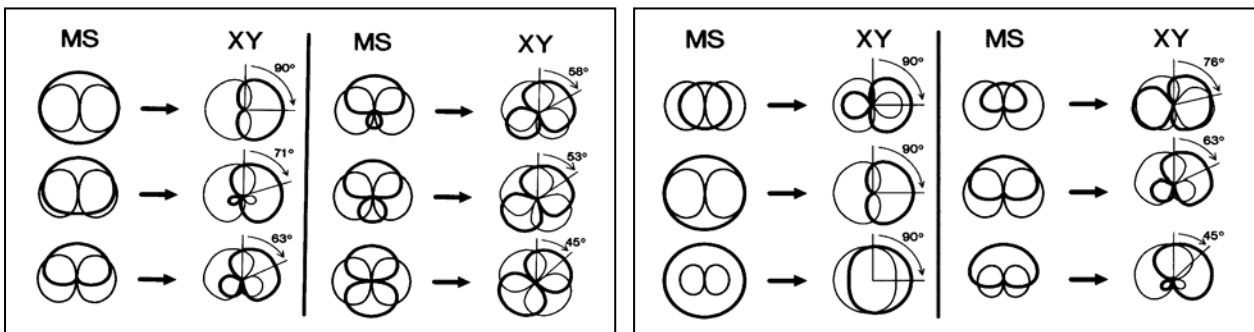
Differentialübertrager:



Der Öffnungswinkel wird beim MS-Mikrofon durch die Richtcharakteristik der Mittenkapsel und durch das Mischungsverhältnis bei der Umwandlung in links/rechts ohne Mikrofonveränderung realisiert und kann auch nach der Aufnahme noch verändert werden. Bei Verwendung von zwei getrennten Mikrofonen kann ein Mischpult zum Generieren der XY-Kanäle verwendet werden, wobei damit jedoch leicht Fehler in der Stereoabbildung entstehen können. Das MS-Verfahren ist sehr empfindlich gegenüber Pegel- und Phasenfehler.

Die MS-Aufzeichnung ist für Stereo-Reportagen und Filmtone sehr beliebt und wird bei der Rundfunkübertragung eingesetzt. Mitten- (Mono-) und Seitensignal werden getrennt gesendet und im Stereoempfänger in links/rechts übersetzt. Der Mono-Empfänger ignoriert das S-Signal.

Resultierende Richtcharakteristiken in Abhängigkeit der M-Charakteristik (links) und dem Mischungsverhältnis (rechts):



Je weiter sich die Mittencharakteristik der Acht nähert, um so enger werden die resultierenden Charakteristiken und um so enger wird auch der Öffnungswinkel.

Mit zunehmendem Pegel des Mittensignals werden die resultierenden Charakteristiken breiter und der Öffnungswinkel wird enger.

6.3.3 Blumlein-Verfahren

Das nach Alan Blumlein benannte Verfahren besteht aus einer XY-Anordnung mit zwei unter 90° gekreuzten Achtercharakteristiken. Es besitzt gegenüber den anderen Koinzidenzverfahren folgende Vorteile:

- Besonders gute Räumlichkeit
- Wegen symmetrischer Anordnung kann Mikrofon auch zwischen zwei Instrumenten stehen und beide aus der Vorzugsrichtung aufnehmen ($\pm 45^\circ$)
- Stereobasis bei der Wiedergabe kann wegen der Phasendrehenden rückwärtigen Teile der Achten breiter sein als Abstand der Lautsprecher
- vergleichsweise schwach im Bassbereich
- Einsatz preiswerter Bändchenmikrofone statt teurer Kondensatormikrofone

Aufbau der Blumlein-Anordnung und dynamische Bändchenmikrofone:



6.4 Laufzeitstereophonie, AB-Verfahren

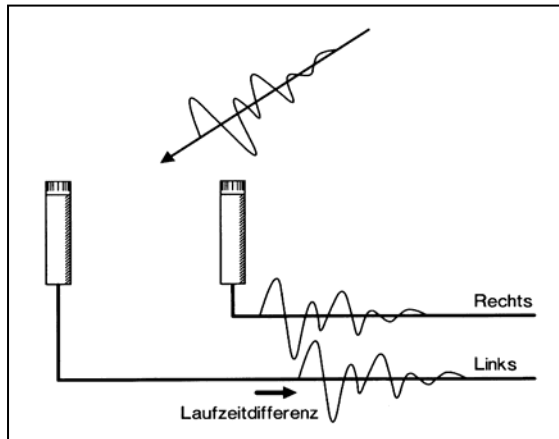
Als Laufzeit-, AB- oder Phasenstereophonie wird das Verfahren bezeichnet, bei dem zwischen den beiden Kanälen nur Laufzeitunterschiede aufgezeichnet werden: Ein auf der rechten Seite abgebildetes Instrument kommt auf dem linken Kanal später als auf dem rechten an, aber infolge des geringen Mikrofonabstands mit ungefähr dem gleichen Pegel. Die Laufzeitmethode nutzt die Eigenschaften des Gehörs, bei Frequenzen unterhalb von 750 Hz Phasenunterschiede auszuwerten, die zwischen den beiden Ohren entstehen. Phaseninformationen im Stereosignal erlauben daher die Lokalisation auch tieffrequenter Schallsignale und fördern die Räumlichkeit des Klangeindrucks.

Stärker als bei der Richtungswahrnehmung verlässt sich das Gehör bei der Entfernungswahrnehmung auf Phaseninformationen im Schallsignal. Konsequenterweise führen deshalb Phasenunterschiede im Stereosignal zu einer besonders guten Wiedergabe räumlicher Tiefe. Die AB-Stereophonie macht in bedämpften Studioräumen keinen Sinn. Sie ist prädestiniert für Aufnahmen in Konzertsälen oder Kirchen, bei denen möglichst viel von der natürlichen Räumlichkeit eingefangen werden soll.

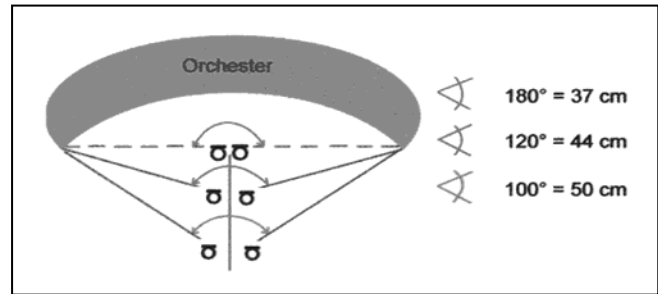
Laufzeit-Stereoaufnahmen bilden räumliche Tiefe besonders gut ab.

Für Laufzeitstereophonie sind zwei räumlich getrennte Mikrofone mit einem Abstand deutlich kleiner als der Abstand beider Mikrofone zur Quelle erforderlich. Die Auswahl und Anordnung der Mikrofone stellt sicher, dass keine Pegelunterschiede zwischen den beiden Kanälen entstehen. Theoretisch ideal ist ein Mikrofonabstand von 17 cm, da er die Schallaufzeiten zwischen den Ohren beim räumlichen Hören reproduziert. Je größer die Schallquelle ist und je weiter das Mikrofon von der Quelle entfernt ist, umso weiter auseinander dürfen die beiden Kapseln stehen, um eine gute Stereoverteilung zu erhalten. Bei zu großem Abstand kann allerdings bei der Lautsprecherwiedergabe ein akustisches „Loch“ in der Mitte der Stereoabbildung entstehen. In diesem Fall schafft ein drittes Mikrofon in der Mitte Abhilfe.

AB-Verfahren:



Optimaler Abstand der AB-Mikrofone zueinander:



Monokompatibilität:

Jeder der Laufzeitstereokanäle für sich kann als Monosignal verwendet werden, da die Pegelverhältnisse bereits einer Monoaufnahme entsprechen. Der andere Kanal wird weggelassen. Eine Summierung der Kanäle, wie sie in monophonen Abspielgeräten stattfindet, hingegen kann zu erheblichen Klangverfälschungen führen. Bei tiefen Frequenzen können wegen Interferenzauslöschungen Pegelverluste entstehen und bei hohen Frequenzen ergibt sich ein ungleichmäßiger, kammfilterartiger Frequenzgang. Tieffrequente Quellen müssen also möglichst in der Mitte aufgenommen werden. Laufzeitverfahren sind also für monophone Wiedergabe nur dann geeignet, wenn eine spezielle Mono-Kopie angefertigt wird.

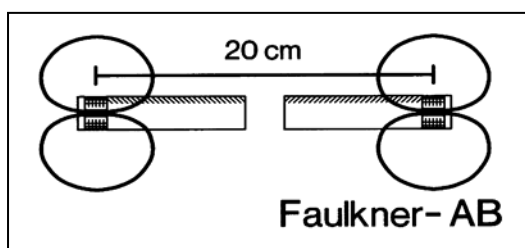
6.4.1 Druckempfänger

Die übliche AB-Anordnung besteht aus zwei Druckempfängern, wobei die überlegenen Klangeigenschaften von Kondensatordruckempfängern insbesondere bei *tiefen Frequenzen* voll zur Geltung kommen. Sie werden vielfach bei Klassikproduktionen eingesetzt. Bei „Klein-AB“ werden die beiden Mikrofone ungefähr in Ohrabstand befestigt, bei der „Groß-AB“-Anordnung beträgt der Abstand bis zu einem Meter. Je weiter man die Mikrofone auseinander montiert, umso beeindruckender wird die Räumlichkeit der Aufnahme, allerdings unter dem Verlust der Lokalisation der Quellen.

6.4.2 Gradientenempfänger

Statt Kugelmikrofone können auch gerichtete Mikrofone verwendet werden. Die Kapseln müssen dann parallel ausgerichtet werden, um sicherzustellen, dass Schallsignale einer Quelle bei beiden Kapseln unter dem gleichen Winkel eintreffen. Mit Gradientenempfängern kann der Diffusschall (Hallanteil) stärker unterdrückt werden.

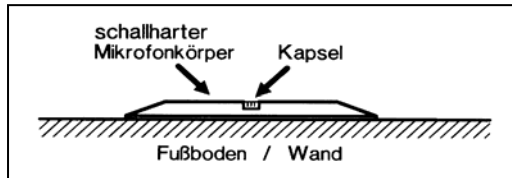
Zwei parallel ausgerichtete Gradientenempfänger mit achtförmiger Charakteristik werden als Faulkner-AB bezeichnet:



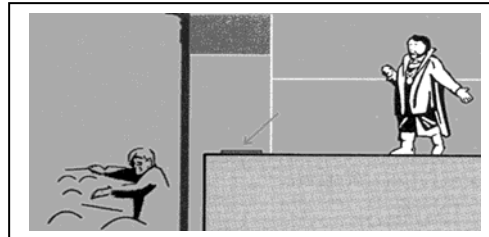
6.4.3 Grenzflächen-AB

Eine Spezialität unter den Laufzeitanordnungen ist die Live-Aufnahme mit Grenzflächenmikrofonen, die im Abstand zueinander von einem Meter oder mehr vor die Bühne gelegt werden. Auf diese Weise können unkompliziert und unauffällig akustisch schwierige Situationen wie z.B. Opern- oder Theateraufführungen in den Griff bekommen werden. Für solche Anwendungen können auch gerichtete Grenzflächen (Nierencharakteristik) sinnvoll sein.

Grenzflächenmikrofon:



am Bühnenrand:



6.4.4 AB mit drei Mikrofonen

Eine häufig benutzte AB-Variante ist die Aufnahme mit drei Mikrofonen, wobei das Signal des mittleren Mikrofons im Mischpult gleichmäßig auf rechten und linken Kanal verteilt wird. Das dritte Mikrofon wird bei der Groß-AB-Aufstellung aufgebaut, sobald sich das akustische Geschehen bei der Wiedergabe im rechten und linken Lautsprecher konzentriert und somit ein akustisches Loch in der Mitte entsteht. Beim Abmischen des Stereosignals ist allerdings auf Phasenauslöschungen bei Frequenzen, deren Wellenlänge in der Größenordnung des Kapselabstandes liegt, zu achten. Das Signal des dritten Mikrofons kann auch zur Monowiedergabe verwendet werden.

6.5 Äquivalenz-Stereophonie

Unter dem Oberbegriff Äquivalenzstereophonie oder auch gemischte Stereophonie werden die Verfahren zusammengefasst, bei denen die beiden Kanäle sowohl Pegel- als auch Laufzeitdifferenzen aufweisen: Ein auf der rechten Seite abgebildetes Instrument ist auf dem linken Kanal sowohl leiser (Pegel) als auch später (Laufzeit). Die Idee hinter der Äquivalenzstereophonie ist die Nachbildung der Signaleigenheit, die zwischen den Ohren beim räumlichen Hören entstehen. Während Intensitäts- und Laufzeitverfahren nur jeweils einen Aspekt der räumlichen Orientierungsfähigkeit des Gehörs ausnutzen, wird bei der gemischten Stereophonie beides kombiniert. Die Trennkörper-Äquivalenzmikrofonie erzeugt darüber hinaus noch die beim natürlichen Hören auftretenden typischen Klangunterschiede zwischen rechtem und linkem Signal.

Bei Äquivalenzaufnahmen ist sowohl eine gute Abbildung räumlicher Tiefe als auch eine gute Trennung der Quellen in der Stereobasis zu erwarten. Außerdem klingen solche Aufnahmen bei Kopfhörerwiedergabe besser als Intensitäts- oder AB-Aufnahmen.

Die gebräuchlichen Äquivalenzanordnungen lassen sich grob in zwei Gruppen aufteilen:

- Räumlich getrennte gerichtete Kapseln (Gradientenempfänger)

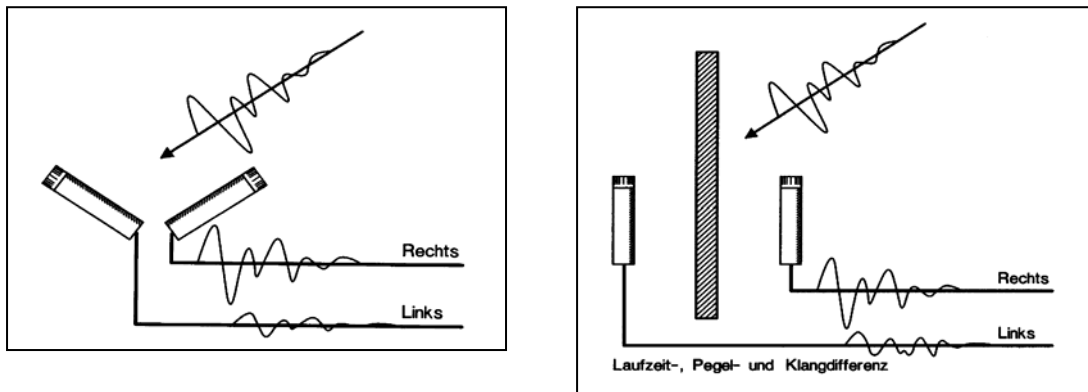
Gradientenempfänger mit einigem Abstand und gegeneinander angewinkelt in einer AB-ähnlichen Anordnung (z.B. ORTF)

- Ungerichtete Kapseln (Druckempfänger) mit akustischen Trennkörpern

Druckempfänger mit einigem Abstand und schallreflektierenden oder absorbierenden Trennkörper dazwischen. Gute Wiedergabe tiefer Frequenzen wegen Druckempfänger, aber frequenzab-

hängige Pegelunterschiede wegen Trennkörper. Ein Kanal ist also leiser, später und dumpfer als der andere.

Äquivalenzverfahren mit zwei Gradientenempfängern (links) und Druckempfängern mit Trennscheibe (rechts):



Monokompatibilität:

Äquivalenzaufnahmen sind weniger gut zur Monomischung geeignet als reine intensitätsstereophone Aufnahmen. Der Monokanal wird durch Summierung der beiden Einzelkanäle gewonnen. Wegen der Phasenunterschiede kann der Klang jedoch darunter leiden, wenn auch nicht so stark wie beim reinen Laufzeitverfahren. Die Monokompatibilität wird auf jeden Fall verbessert, wenn tieffrequente Signale (Bass, Cello oder Schlagzeug) aus der Mitte kommen.

6.5.1 Getrennte Nierencharakteristik: ORTF, NOS

Der einfachste Weg zur Herstellung einer äquivalenzstereophonen Aufnahme ist der Einsatz zweier Richtmikrofone auf einer Stereoschiene wie bei der AB-Methode. Die Aufzeichnung von Pegeldifferenzen zwischen rechts und links wird dadurch gewährleistet, dass die Kapseln nach außen gedreht werden.

Diese Methode wird bei dem beliebten ORTF-Mikrofon nach den Richtlinien des ehemaligen französischen Rundfunks ORTF (Office de Radiodiffusion-Télévision Française) eingesetzt. Richtcharakteristik, Abstand und Versatzwinkel der Kapseln sind genau festgelegt:

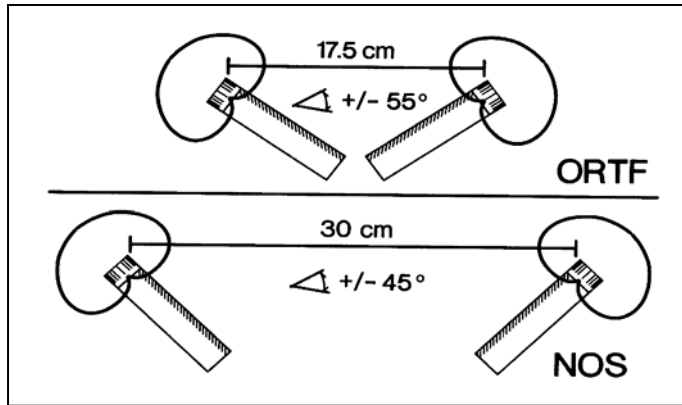
- Gradientenempfänger mit Nierencharakteristik
- Kapselabstand 17 – 17,5 cm
- Öffnungswinkel 110°

Bei dieser Anordnung entsprechen sowohl die Laufzeit- als auch die Pegelunterschiede in etwa den Verhältnissen beim natürlichen Hören. Im Vergleich zu XY, MS, Blumlein und NOS bietet das ORTF-Mikrofon einen guten Kompromiss zwischen Lokalisation der Quellen und Räumlichkeit der Aufnahme.

Auch bei der NOS-Anordnung (Nederlandsche Omroep Stichting) nach der Empfehlung des niederländischen Rundfunks ist der Aufbau festgelegt:

- Nierencharakteristik
- Kapselabstand 30 cm
- Öffnungswinkel 90°

ORTF-Anordnung (oben) und NOS-Anordnung (unten):

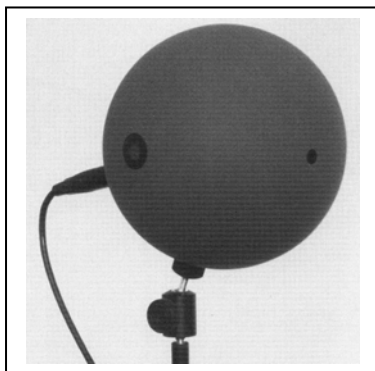


6.5.2 Trennkörpermikrofone

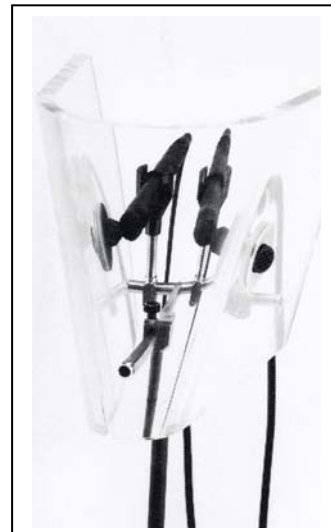
a, Kugelfläche:

Das Kugelflächenmikrofon nach Günther Theile vom IRT besteht aus einer schallharten (reflektierenden) Kugel von rund 20 cm Durchmesser, in die seitlich zwei diffusfeldentzernte Druckempfänger bündig eingelassen sind. Der Frequenzbereich, ab dem Druckstau und Schallschatten wirksam werden, ist durch den Kugeldurchmesser bestimmt. Da der Kugeldurchmesser ungefähr gleich dem Kopfdurchmesser ist, stimmen die charakteristischen Frequenzen mit denen beim natürlichen Hören überein: Unterhalb von rund 500 Hz werden nur Phasendifferenzen aufgezeichnet, oberhalb von 1 kHz größtenteils Pegeldifferenzen, zwischen 500 Hz und 1 kHz beides. Dieses Verfahren ist sehr gut für Kopfhörerwiedergabe geeignet.

Kugelflächenmikrofon:



Clara:



b, Clara:

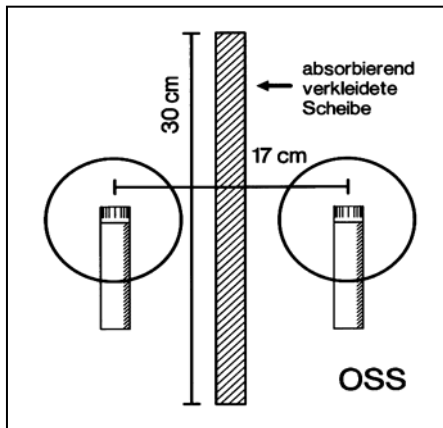
Eng verwandt mit der Kugelfläche ist die von dem Biologen Hinrich Peters entwickelte und nach Clara Schumann benannte Clara. Als Trennkörper kommt eine kopfdimensionierte, parabelförmige Acrylkonstruktion (reflektierend) zum Einsatz, in die zwei separate freifeldentzernte Druckempfänger bündig mit der Oberfläche eingesetzt sind. Dieses Verfahren ist ebenfalls sehr gut für Kopfhörerwiedergabe geeignet.

c, OSS-Mikrofon:

Einen anderen Weg beschreitet das OSS-Mikrofon (optimales Stereo-Signal). Hier werden zwei Druckempfänger nicht durch einen reflektierenden, sondern durch einen absorbierenden Körper, nach dem Schweizer Jürg Jecklin auch Jecklin-Scheibe genannt, getrennt.

Die schallabsorbierende Beschichtung der Scheibe ist notwendig, um Kammfiltereffekte infolge Interferenzauslöschungen zu verhindern. Die Scheibe hat einen Durchmesser von 30 cm, die beiden Kapseln werden jeweils in halbem Ohrabstand seitlich vor dem Kreismittelpunkt befestigt. Die Frequenzabhängigkeiten entsprechen denen am Kopf, nur ist statt Druckstau und Abschattung ausschließlich die Abschattung wirksam. Die sehr preisgünstige Jecklin-Scheibe kann mit beliebigen Kondensator-Druckempfängern bestückt werden.

OSS-Mikrofon mit Jecklin-Scheibe:



6.6 Einzelmikrofonverfahren

In Bereich der Pop- und U-Musik wird mit dem Einzelmikrofonverfahren, auch Polymikrofonie oder Multimikrofonie genannt, gearbeitet. Im Extremfall wird jedes Instrument einzeln aufgenommen und nachher im Mischpult zu einem Stereo-Klangbild zusammengesetzt. Voraussetzung für diese Technik ist eine deutliche akustische Trennung zwischen den einzelnen Mikrofonen mit einer Übersprechdämpfung von mindestens 15 dB. Daher liefern Mikrofone mit Nieren- oder Hypernierencharakteristik die besten Ergebnisse. Hohe Kompression in den Mikrofonwegen und dadurch geringe Dynamik sind weitere Kennzeichen bei Pop- und U-Musik. Das Einzelmikrofonverfahren lässt sich jedoch nicht ohne weiteres auf Aufnahmen klassische Musik anwenden, bei denen hohe Anforderungen auf Durchsichtigkeit, Brillanz und Raumillusion gestellt werden. Besonders die Mischung verschiedener Instrumentenklänge zu einer gemeinsamen Klangfarbe würde durch eine zu direkte Mikrofonaufstellung gestört.

6.7 Kunstkopf

Eine Mikrofonanordnung, die auch zu den Trennkörpermikrofonen gezählt werden kann, ist das Kunstkopfmikrofon. Es besteht aus einer Nachbildung des menschlichen Kopfes, die mit Druckempfängern in den Ohrmuscheln bestückt ist. Wegen der Nachbildung der Ohrmuscheln enthalten Kunstkopfaufnahmen nicht nur frequenzabhängige Pegelinformationen durch Druckstau und Abschattung, sondern zusätzlich noch die typischen richtungsabhängigen Frequenzgangverzerrungen der Ohrmuscheln.

Wenn solche Aufnahmen über Kopfhörer gehört werden, wird der Hörer akustisch in den Aufnahmeraum versetzt. Richtungs- und Entfernungsabbildung sind erstaunlich präzise. In gewissem Rahmen kann sogar unten/oben und vorne/hinten unterschieden werden. Man spricht bei dieser Technik deshalb von kopfbezoglicher Stereophonie oder Kunstkopf-Stereophonie. Alle anderen Aufnahmeverfahren liefern raumbezügliche Signale.

Aufnahmen mit Kunstkopf klingen bei Wiedergabe über Lautsprecher nie so gut wie Aufnahmen in raumbezoglicher Stereophonie:

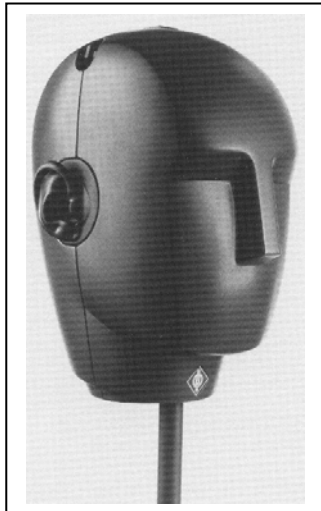
- Durch die ohrabhängigen Frequenzverzerrungen haben solche Aufnahmen meist eine unbefriedigende Klangfarbe
- Weil bei Lautsprecherwiedergabe beide Stereosignale nicht nur das jeweilig zugeordnete Ohr, sondern auch das andere Ohr erreichen, kann das Klangbild auseinanderfallen.

Umgekehrt sind raumbezügliche Aufnahmen nicht besonders gut für Kopfhörerwiedergabe geeignet:

- Es können Klangverfärbungen durch das Fehlen der Außenohrverzerrung auftreten.
- Dadurch, dass der Einfluss des Außenohres auf das Schallfeld fehlt, wird das Schallsignal als nicht aus dem umgebenden Raum herrührend empfunden und in der Regel im Kopf gehört („Im-Kopf-Lokalisation“).
- Störgeräusche in der Aufnahme sind bei der Kopfhörerwiedergabe deutlicher zu hören als bei der Lautsprecherwiedergabe.

Mit neu entwickelten Signalprozessoren, die den Außenohrfrequenzgang nachbilden, kann ein raumbezügliches in ein kopfbezügliches Stereosignal umgewandelt werden. Wie bei der Kunstkopfaufnahme werden bei Kopfhörerwiedergabe die Phantomschallquellen dann außerhalb des Kopfes geortet.

Diffusfeldentzerrtes Neumann-Kunstkopfmikrofon:



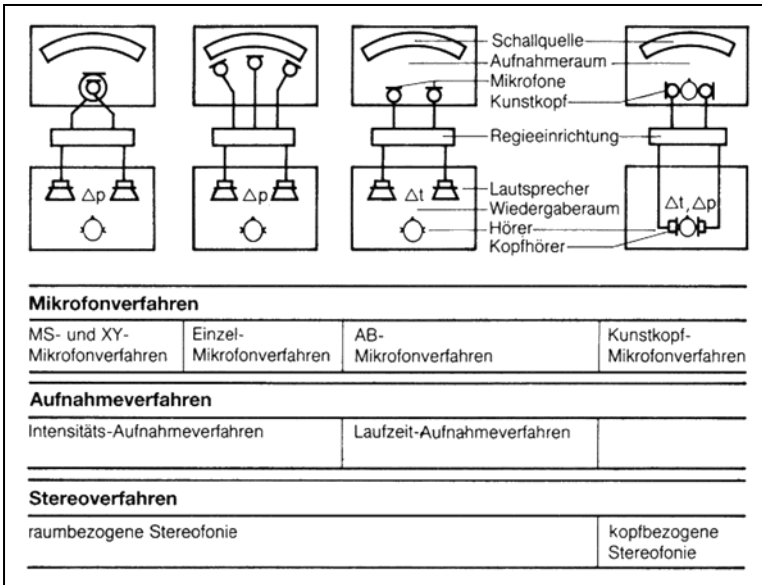
6.8 Klangbildeigenschaften

Die Eigenschaften des aufgenommenen Klanges hängen ab vom verwendeten Aufnahmeverfahren und den Positionen der Schallquellen und Mikrofone. Beim Einzelmikrofonverfahren erscheinen alle Schallquellen selbst bei räumlicher Tiefenstaffelung der Darbietung gleich weit entfernt. Beim reinen XY-, MS- und AB-Verfahren erscheinen seitliche Schallquellen weiter entfernt als mittige Quellen, das Klangbild flieht also an den Flanken bei der Wiedergabe zurück.

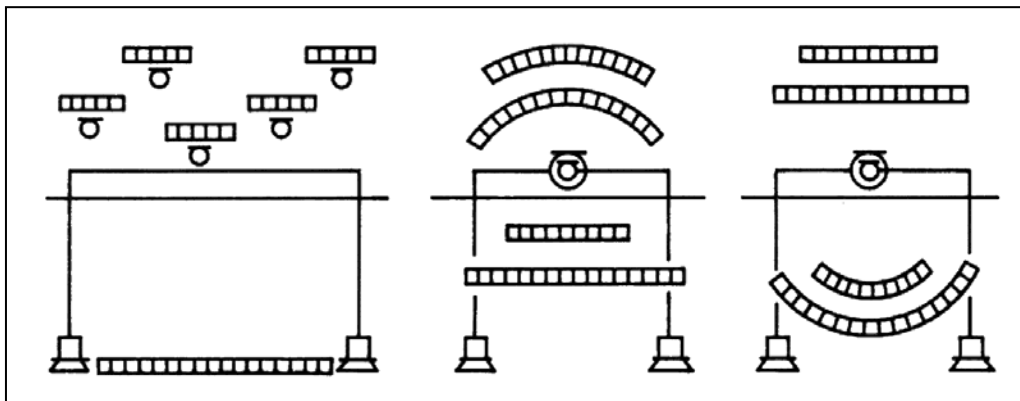
Durch eine halbkreisförmige Aufstellung der Quellen könnte dies vermieden werden, ist jedoch in der Praxis kaum anwendbar.

Mit Stützmikrofonen kann dieser Effekt ebenfalls aufgehoben werden, da durch regietechnische Manipulationen wie Pegelveränderungen und Verzögerungen der Entfernungseindruck angepasst werden kann.

Aufnahmeverfahren:



Entfernungsverhältnisse:



Räumliche Eigenschaften des Klangbildes:

Mikrofonverfahren	räumliche Eigenschaften des Klangbildes				besonders geeignet für			
	gute Lokalisierungbarkeit	guter Raumeindruck	gute Tiefenstaffelung	besondere Präsenz	U-Musik u. ä.	E-Musik, Jazz, Volksmusik	aktuelles und dokument. Wort	Hörspiel, Feature
Koinzidenzmikrofonverfahren	⊗			⊗		⊗	⊗	⊗
Einzelmikrofonverfahren	⊗			⊗	⊗		⊗	⊗
Laufzeitmikrofonverfahren		⊗	⊗			⊗		
Stützmikrofonverfahren	⊗			⊗		⊗		
Kunstkopfverfahren	⊗	⊗	⊗					⊗