

# Bau- und Raumakustik

Janina Fels / Aachen

## 1 Raumakustik

### 1.1 *Einleitung*

Es ist eine allgemeine Erfahrung, dass man in manchen Sälen die Sprachverständlichkeit sehr gut ist, in anderen dagegen nicht. Sieht man davon ab, wie deutlich der Redner spricht und wie laut der Lärmpegel ist, so bleibt noch ein sehr erheblicher Einfluss des Raumes auf die Sprachverständlichkeit aufgrund seiner akustischen Eigenschaften, oder wie man oft kurz sagt, aufgrund seiner Akustik.

Ähnlich liegen die Dinge in einem Opernhaus oder in einem Konzertsaal. Auch hier gibt es Beispiele für gute oder schlechte Akustik. Wir erwarten in einem Konzertsaal einen schönen, runden, räumlich wirkenden Orchesterklang als ein Ganzes, und es ist die Aufgabe der Raumakustik herauszufinden, was das eigentlich bedeutet und mit welchen greifbaren physikalischen Sachverhalten dies korreliert. Auch in einem Arbeitsraum, in einer Fabrikhalle oder einem Großraumbüro hängt der Lärmpegel von der Art und der Leistung der Schallquelle ab, zu einem erheblichen Teil aber auch davon, was der Raum aufgrund seiner akustischen Eigenschaften daraus macht.

Die Aufgabe der Raumakustik ist also zum Teil physikalischer Art, nämlich aus den baulichen Daten, also aus den Abmessungen, den verwendeten Materialien, der Anordnung des Publikums usw. das Schallfeld im Raum zu ermitteln. Zum anderen hat sie zu quantifizieren, welche objektiven Schallfelddaten oder Schallfeldparameter für gute oder weniger gute Hörbedingungen an den einzelnen Zuhörerplätzen verantwortlich sind. Der zweite Teil der Aufgabe ist nur durch Befragungen von Zuhörern oder durch systematische Hörversuche zu lösen. Schließlich werden von dem Raumakustiker - gewissermaßen durch Rückverfolgung dieser Aufgabenkette - Auskünfte darüber erwartet, wie ein Raum baulich gestaltet werden muss, bzw. welche Änderungen an einem geplanten oder existierenden Raum vorgenommen werden müssen, um die akustischen Erwartungen der Zuhörer zu erfüllen.

### 1.2 *Nachhall und Nachhallzeit*

Die physikalisch einwandfreie Beschreibung räumlicher Schallfelder geht von der Wellengleichung aus, deren Lösungen den durch Lage und Beschaffenheit der Wände bestimmten Randbedingungen anzupassen sind. Sie muss für praktische Zwecke ausscheiden, da sie auch mit den heutigen Mitteln rechnerisch nicht zu bewältigen ist und überdies weit mehr Informationen liefern würde, als für die akustische Beurteilung eines Raumes sinnvoll wäre. Eine für die raumakustische

Praxis wesentlich brauchbarere Beschreibung geht im einfachsten Fall von einer Energiebilanz aus. Dem zufolge ist die zeitliche Energieänderung in einem Raum mit dem Volumen  $V$  gegeben durch die Leistung  $P$  der Schallquelle, vermindert um die Energie, die pro Zeit- und Flächeneinheit an der Raumwand absorbiert wird:

$$V \frac{dw}{dt} = P - \frac{cS}{4} \bar{\alpha} \cdot w \quad \text{Gl. 1-1}$$

Es ist  $w$  die Schallenergiedichte,  $c$  die Schallgeschwindigkeit,  $S$  die gesamte Wandfläche;  $\alpha$  ist der Absorptionsgrad der Wände, definiert als das Verhältnis der nicht reflektierten Energie zur einfallenden Energie; Überstreichung kennzeichnet den gewogenen Mittelwert über alle Wandteile.

Für  $dw/dt = P = \text{const.}$  ist die stationäre Energiedichte  $w$  und der Schalldruckpegel  $L$  wird:

$$w = \frac{4P}{cS\bar{\alpha}} = \frac{4P}{cA} \quad \text{Gl. 1-2}$$

bzw.

$$L = 10 \log \frac{\tilde{p}^2}{p_0^2} = 10 \log \frac{w}{w_0} = 10 \log \frac{4P}{cA w_0}, \quad w_0 = 3,4 \cdot 10^{-10} \text{ J/m}^3 \quad \text{Gl. 1-3}$$

Die Größe  $A = S\bar{\alpha}$  wird als äquivalente Absorptionsfläche bezeichnet. Sie ist eine ebenfalls wichtige Grundgröße der Bauakustik (s. Abschn. 2.2). Dagegen lautet die Lösung der Differentialgleichung (Gl. 1-1) für  $P = 0$ :

$$w(t) = w_0 \exp\left(-\frac{cS}{4} \bar{\alpha} t\right) \quad \text{Gl. 1-4}$$

( $w_0$  = Anfangswert der Energiedichte zur Zeit  $t = 0$ .) Die obigen Überlegungen gelten aber nur für den Fall des „diffusen Schallfelds“, in dem alle Raumrichtungen (im Mittel) gleichermaßen an der Schallausbreitung beteiligt sind. In der Praxis ist die Voraussetzung oft nur näherungsweise erfüllt, wenn überhaupt. Erfahrungsgemäß gilt Gl. 1-4 auch dann einigermaßen, nicht aber die Gl. 1-2. Zur Berechnung des Lärmpegels in einem großen oder flachen oder langen Arbeitsraum muss man daher die Gl. 1-2 durch eine genauere Berechnungsmethode ersetzen.

Das ist für die Raumakustik besonders wichtig, da die Dauer des durch Gl. 1-4 beschriebenen Abklingvorgangs, d.h. des so genannten Nachhalls, bei den verschiedenen Frequenzen die wichtigste akustische Kenngröße eines Raumes darstellt. Man kennzeichnet sie durch die „Nachhallzeit“  $T$ . Das ist die Zeit, in der die Energiedichte auf das  $10^{-6}$ -fache ihres Anfangswertes (um 60 dB) abgesunken ist. Sie ergibt sich aus Gl. 1-4 nach Einsetzen der Konstanten und Näherung für kleine mittlere Absorptionsgrade zu

$$T = \left(0,16 \frac{\text{s}}{\text{m}}\right) \cdot \frac{V}{S\bar{\alpha}} = \left(0,16 \frac{\text{s}}{\text{m}}\right) \cdot \frac{V}{A} \quad \text{Gl. 1-5}$$

Diese Formel erlaubt bei bekannten Raumdaten eine meist hinreichend genaue Berechnung der Nachhallzeit.

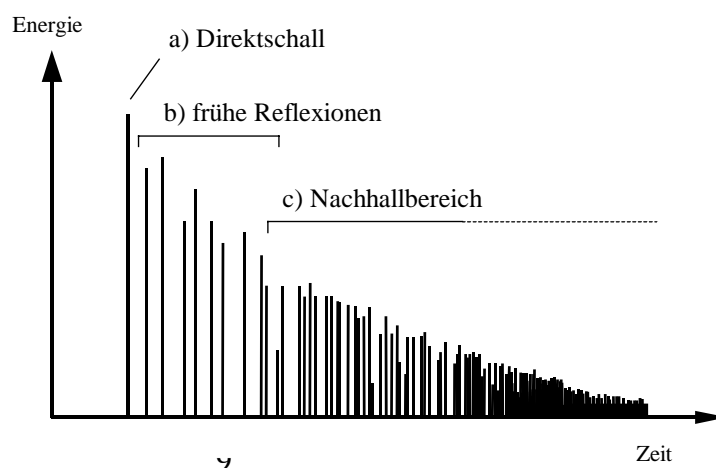
Der Sprachverständlichkeit sind lange Nachhallzeiten grundsätzlich abträglich, da der Nachhall die Tendenz hat, die zeitliche und spektrale Struktur der Sprachlaute und der Silben zu verwischen. Da Räume mit völlig fehlendem Nachhall aber nur mit großem Kostenaufwand zu realisieren sind und auch andere Nachteile haben, gilt im Sinne eines Kompromisses eine Nachhallzeit von 0,6 s bis 1 s als optimal für Vortrags- oder Hörsäle, für Sitzungssäle usw. Bei Sprechtheatern lässt man in der Regel Nachhallzeiten bis etwa 1,2 s zu. Für die Sprachverständlichkeit ist weiterhin vorteilhaft, wenn die Nachhallzeit bei tiefen Frequenzen eher noch niedriger ist als im mittleren Frequenzbereich.

| Günstige Bereiche der Nachhallzeit |                            |
|------------------------------------|----------------------------|
| Art der Darbietung                 | mittlere Nachhallzeit in s |
| Sprache (Hörsaal, Sitzungsraum)    | < 1                        |
| Sprechtheater                      | 1,0 - 1,2                  |
| Konzertsaal                        | 1,7 - 2,1                  |
| Oper                               | 1,0 - 1,8                  |

### 1.3 Weitere raumakustische Kenngrößen

Eine einigermaßen korrekte Nachhallzeit ist zwar ein notwendiges, nicht aber ein hinreichendes Kriterium für gute Akustik. Außerdem charakterisiert sie eine allgemeine akustische Eigenschaft des Raumes, nicht aber die meist unterschiedlichen Hörbedingungen an verschiedenen Zuhörerplätzen. Weitere charakteristische Parameter lassen sich auf der Grundlage der so genannten Raumimpulsantwort gewinnen. Hierunter versteht man das Signal, das an einem Empfangsort auftritt, wenn der Schallsender einen sehr kurzen Impuls aussendet (s. Bild). In diesem Diagramm kennzeichnet die erste Spitze den so genannten Direktschall, das ist der Schallanteil, der sich auf dem kürzesten Weg von dem Schallsender zum Empfänger ausbreitet. Alle anderen Spitzen kennzeichnen nach Lage und Höhe den Beitrag der Schallanteile, die an der Decke und den Wänden des Raumes einmal, zweimal oder noch öfter reflektiert worden sind.

Da bei werden diese Anteile nach Maßgabe des Absorptionsgrads der betreffenden Wandteile abgeschwächt; eine weitere Abschwächung und außerdem eine mehr oder weniger große Verzögerung gegen-



über dem Direktschall ergibt sich daraus, dass diese reflektierten Schallanteile größere Wege zurückzulegen haben.

Hinsichtlich ihrer subjektiven Wirkung kann man im Allgemeinen in einer Raumimpulsantwort nach dem Bild drei Teile unterscheiden: Zum einen den Direktschall (a), der nach dem Gesetz der ersten Wellenfront die Richtung bestimmt, aus dem das Schallereignis gehört wird. Der zweite Bereich (b) umfasst die wenig verzögerten, noch weitgehend getrennt eintreffenden frühen Reflexionen. Schließlich folgen in immer kürzeren Abständen die zahlreichen schwächeren und länger verzögerten Reflexionen, die den eigentlichen Nachhall ausmachen (c). Da der letztere durch die Nachhallzeit meist ausreichend charakterisiert ist, sind die für eine bestimmte Hörposition im Raum maßgebenden und über die Nachhallzeit hinausgehenden akustischen Kennzeichen in dem zwischen 0 und 80 ms liegenden Bereich zu suchen.

Die Bemühungen der Raumakustiker konzentrierten sich in der zurückliegenden Zeit darauf, aus solchen gemessenen oder auch vorausberechneten Impulsantworten Parameter abzuleiten, welche - ergänzend zur Nachhallzeit - die akustische Qualität eines Saales oder auch nur bestimmter Plätze oder Platzgruppen in ihm kennzeichnen. Stellvertretend für viele andere sei hier die „Deutlichkeit“ erwähnt, die als Maß für die Verständlichkeit von Sprache oder der Durchsichtigkeit von Musikdarbietungen dienen kann. Sie ist durch

$$D = \frac{\int_0^{50ms} E(t) dt}{\int_0^{\infty} E(t) dt} \quad \text{Gl. 1-6}$$

definiert. Dabei kennzeichnet  $E(t)$  die Energie in der Impulsantwort, die zur Zeit  $t$  am Empfangsort eintrifft. Dieser Definition liegt die Erkenntnis zugrunde, dass die um weniger als 50 ms gegenüber dem Direktschall verzögerten Schallreflexionen subjektiv dem Direktschall zugeschlagen werden, also dessen Lautstärke zu erhöhen scheinen. Diese Bestandteile der Impulsantwort werden daher oft als „nützliche Reflexionen“ bezeichnet. Eine weitere, besonders für Konzertsäle wichtige Erkenntnis ist, dass die Richtungsverteilung der im Zeitbereich zwischen 0 und etwa 80 ms beim Hörer eintreffenden Reflexionen für den subjektiven Räumlichkeitsindruck maßgebend ist, der ein wesentliches Qualitätsmerkmal ist. Aufgrund entsprechender psychoakustischer Untersuchungen lässt sich dieser durch den so genannten „Seitenschallgrad“ gut kennzeichnen:

$$LF = \frac{\int_0^{80ms} E(t) \cos^2 \Theta dt}{\int_0^{80ms} E(t) dt} \quad \text{Gl. 1-7}$$

Hierin ist  $E$  die Energie der Reflexionen und  $\Theta$  der Winkel, den Einfallsrichtung mit einer durch die beiden Ohren des Zuhörers gelegten Achse bildet. Die Integrale

sind über alle Reflexionen einschließlich des Direktschalls mit Verzögerungszeiten von weniger als 80 ms zu erstrecken.

Die Ergebnisse zahlreicher, von verschiedenen Forschern und Forschergruppen durchgeführter psychoakustischer Untersuchungen lassen sich dahingehend zusammenfassen, dass bei Sälen, die für irgendwelche akustischen Darbietungen bestimmt sind, die Nachhallzeit nach wie vor an erster Stelle unter den objektiven raumakustischen Kriterien zu sehen ist. Welche weiteren Kriterien von Bedeutung sind, hängt in erster Linie von der Art der Darbietung (Sprache oder Musik) ab.

#### **1.4 Schallabsorption und Schallabsorber**

Für die Schallabsorption an Wänden gibt es im Wesentlichen zwei Ursachen: die Bewegung von Luft in Poren des Wandmaterials (Verluste durch Reibung) und das Mitschwingen von Wänden im Schallfeld.

##### *1.4.1 Poröse Absorptionsmaterialien*

Der für das Absorptionsvermögen eines porösen Materials (Watte, Glaswolle, Filz u.ä.) charakteristische längenspezifische, äußere Strömungswiderstand  $\Xi$  wird durch einen Versuch mit konstanter Luftströmung gemäß folgender Formel bestimmt:

$$-\Delta p = \Xi \cdot \Delta x \cdot v_a$$

wobei  $v_a$  die äußere Strömungsgeschwindigkeit ist. Im Inneren einer Probe herrscht die um  $1/\sigma$  vergrößerte Strömungsgeschwindigkeit  $v_i$ , da sich die Stromlinien auf den kleineren Porenquerschnitt zusammenziehen müssen ( $\sigma$  = Porosität  $< 1$ ):



Noppenschaumstoff zur Auskleidung von Raumbereichen



Steinwolle für raum- und bauakustische Zwecke

Da in praktischen Fällen das poröse Material sich meist als Schicht endlicher Dicke vor einer starren Wand befindet, wird ein Teil der eindringenden Wellen an dieser reflektiert und interferiert an der Grenzfläche mit der auftreffenden Welle. Dadurch ergeben sich häufig Schwankungen des Absorptionsgrades bei Variation der Frequenz. Eine merkliche Absorption wird erst erreicht, wenn der erste Schnellebauch der stehenden Welle vor der Wand im porösen Material liegt, dieses somit mindestens  $\lambda/4$  dick ist. Man spart also Absorptionsmaterial, wenn man

dieses nicht direkt auf die Wand bringt, sondern dahinter einen Zwischenraum frei lässt.

#### 1.4.2 Resonanzabsorber

Fällt eine Schallwelle auf eine bewegliche Wand, so wird diese im Allgemeinen zum Schwingen angeregt. Zugleich wird auf der abgewandten Seite eine Schallwelle abgestrahlt. Ist  $m''$  die Flächenmasse der Wand (in  $\text{kg/m}^2$ ), dann ist ihr Absorptionsgrad bei senkrechtem Schalleinfall

$$\alpha = \frac{1}{1 + \left( \frac{\omega m''}{2\rho_0 c} \right)^2}$$

Er fällt mit wachsender Frequenz monoton ab - eine Folge der Massenträgheit. In der Praxis macht sich diese Art der Absorption nur bei dünnen Wänden (Fenster-scheiben, Folien) bemerkbar und auch da nur bei tiefen Frequenzen. Wichtiger ist dagegen die Absorption einer schwingungsfähigen Wand, die im Abstand  $d$  vor einer schallharten Wand montiert ist. Der Luftraum der Dicke  $d$  wirkt wie eine Feder mit der flächenbezogenen Nachgiebigkeit

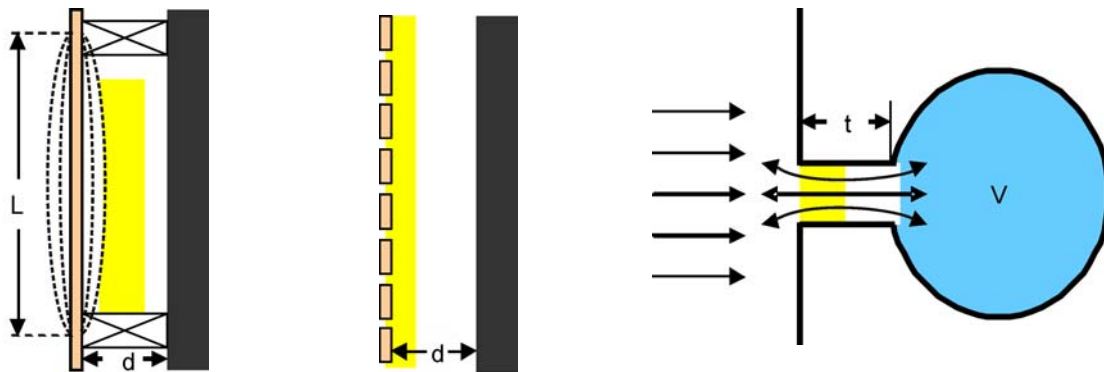
$$n'' = \frac{d}{\rho_0 c^2}$$

Bei der Frequenz

$$f_0 = \frac{1}{2\pi} \frac{1}{\sqrt{m'' n''}} = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{\rho_0 c^2}{m'' d}}$$

wird die Schwingungsamplitude sehr groß, und unvermeidbare Verluste z.B. durch Biegung der Verkleidung (elastische Verluste) bilden einen Absorptionsmechanismus. Um eine höhere Absorption zu erhalten, kann man den Hohlraum zusätzlich ganz oder teilweise mit porösem Material mit der Verlustkonstante  $w$  (Reibungswiderstand) füllen. Derartige Resonanzabsorber spielen in der Raumakustik eine große Rolle, da man mit ihnen durch geeignete Dimensionierung Wände mit weitgehend vorgegebbarer Absorption herstellen kann. Auch für Loch- oder Schlitzplatten kann man eine effektive mitschwingende Masse  $m''$  berechnen. Diese Masse entspricht der Masse der Luft in den Löchern.

$$m'' = \frac{\rho_0}{\sigma} (b + 1,6a)$$

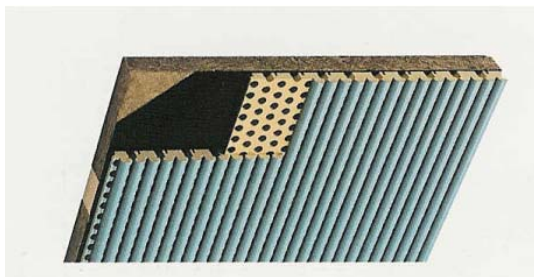


Plattenresonator

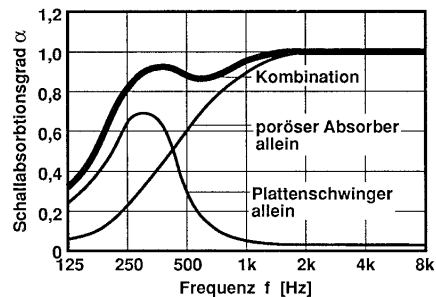
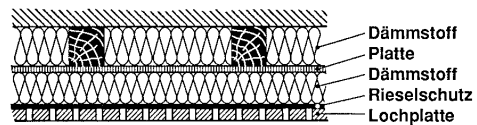
Loch- / Schlitzabsorber

Helmholtz-Resonator

Hierin ist  $b$  die Plattendicke,  $a$  der Radius der als kreisförmig angenommenen Löcher und  $\sigma$  der „Perforationsgrad“, d.h. der Bruchteil der Öffnungsfläche an der Gesamtfläche. Durch starke Perforation lassen sich also auch Schichten mit kleinen Flächenmassen herstellen, die zusammen mit einer porösen Schicht einen Resonator mit relativ hoher Resonanzfrequenz und wenig ausgeprägter Resonanz ergeben. Daher eignen sich dünne, hochperforierte Platten aus Blech, Gips oder Holz zur Abdeckung von Schluckstoffschichten (Mineralwolle oder ähnliche Stoffe), was praktisch aus Gründen des Berührungsschutzes, aber auch eines besseren Aussehens erforderlich ist. Diese Form findet oft Anwendung als sog. „Akustik-Decke“. Dies ist typischerweise folgender Aufbau (von oben gesehen): massive Rohdecke - Luftraum - Mineralwolle - Lochplatte.



Frontplatte mit Speziallochmuster



In der Vergangenheit fanden ebenfalls so genannte mikroperforierte Absorber zunehmend Beachtung. Diese bestehen aus einer Folie (z.B. transparenter Kunststoff) oder Platte (z.B. Acrylglas) mit sehr kleinen Löchern ( $d = 0,05 - 0,5$  mm). In Abhängigkeit der Anwendung ist der Lochungsgrad im Bereich von 0,5 – 2 %. Bei solchen Anordnungen ist die Absorption hauptsächlich auf die viskose Reibung der Luftmoleküle an den Wänden der Mikro-Lochung zurückzuführen. Da mikroperforierte Absorber auch aus transparentem Material hergestellt werden können finden sie oft in Situationen Einsatz, in denen aus ästhetischen Gründen die Nutzung anderer Absorptionsmechanismen unerwünscht ist.

## 2 Bauakustik

### 2.1 Einleitung

Die Bauakustik beschäftigt sich mit der Schall- und Schwingungsausbreitung in Gebäuden sowie mit der Beurteilung des Schallschutzes in Gebäuden. Dabei ist Luftschall und Körperschall hinsichtlich der Anregung und der Fortpflanzung in Gebäude zu unterscheiden. Beispielsweise würde eine laut eingestellte Hifi-Anlage zunächst Luftschall im „Senderraum“ abstrahlen. Die Schallübertragung in den sog. „Empfangsraum“, der ein schutzbedürftiger Raum im Sinne des baulichen Lärmschutzes sein kann (z.B. ein Schlafzimmer in fremdem Wohnbereich) erfolgt dann über vielfältige Wege, z.B. als Luftschall über Lüftungskanäle, als Körperschall direkt über die Trennwand oder als Umwandlungen von Luft- in Körperschall und umgekehrt. Körperschall, der durch Gehen auf Decken erzeugt wird, nennt man „Trittschall“. Ebenfalls von Interesse ist Körperschall aus haustechnischen Anlagen (Frisch- und Abwasserinstallation, Klimaanlage, etc.) sowie die Schalldämmung gegen Außenlärm (Industrielärm, Straßen- und Luftverkehrslärm).

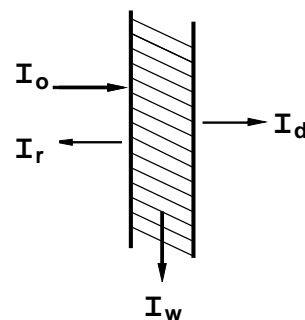
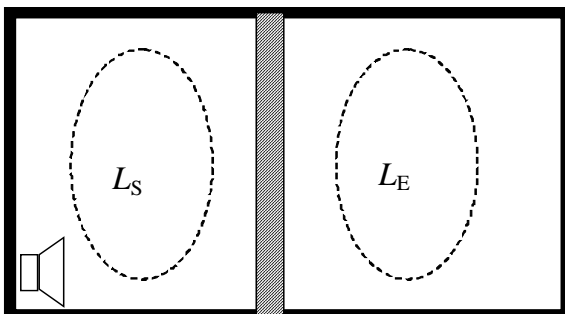
### 2.2 Luftschalldämmung

Eine wichtige Größe ist das Schalldämmmaß  $R = -10 \log \tau$  mit dem Transmissionsgrad

$\tau = I_d/I_0$ . In der Praxis werden die einfallende und die durchgelassene Schallintensität allerdings nicht unmittelbar gemessen, sondern die Messung des Schalldämmmaßes erfolgt zwischen zwei Räumen mit einem indirekten Verfahren. Dann gilt:

$$R = L_S - L_E + 10 \log S / A \quad \text{Gl. 2-1}$$

( $L_S$  = Senderraum-Schalldruckpegel,  $L_E$  = Empfangsraum-Schalldruckpegel,  $S$  = Trennbauteilfläche,  $A$  = äquivalente Absorptionsfläche des Empfangsraumes)



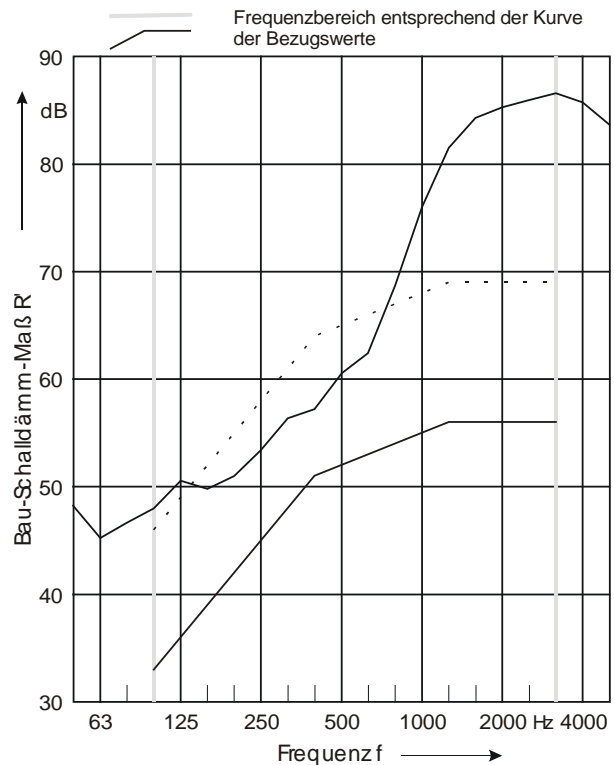
Messungen dieser Art werden in Gebäuden durchgeführt, um festzustellen, ob der gesetzlich vorgeschriebene Mindestschallschutz gewährleistet ist. Andererseits gibt es Labor-Prüfverfahren, die auf ähnlichen messtechnischen Grundlagen stehen und die dazu dienen, die Schalldämmung von Bauteilen oder Baukonstrukti-



nen zu ermitteln. Letztere Daten können verwendet werden, um bereits bei der Planung von Bauten die schalltechnische Eignung nachzuweisen.

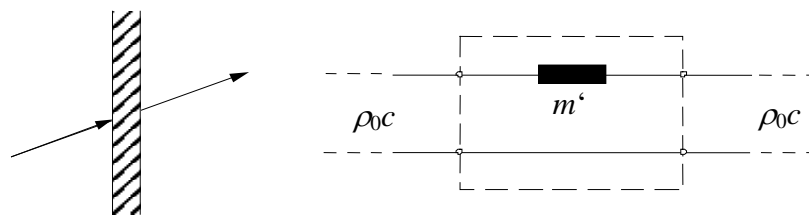
Der wesentliche physikalische Unterschied dieser beiden Betrachtungsweisen liegt in der Tatsache, dass im Prüfstand nur jeweils eine Konstruktion beurteilt wird, dass aber im fertigen Gebäude alle Übertragungswege über alle trennenden und flankierenden Bauteile eine Rolle spielen. Letztere Tatsache kennzeichnet man dadurch, dass man das Schalldämmmaß mit einem Apostroph ( $R'$  statt  $R$ ) versieht.

Die Ergebnisse der Schalldämmmaße werden im Frequenzbereich von 100 Hz – 3,15 kHz in Terzen dargestellt und beurteilt. Einfacher und letztlich relevant ist das sog. bewertete Schalldämmmaß  $R_w$  (oder  $R'_w$ ), welches durch einen Vergleich der gemessenen Schalldämmkurve mit einer international genormten Bezugskurve ergibt.



## 2.3 Berechnung der Schalldämmmaße einzelner Bauteile

### a) einschalige Bauelemente

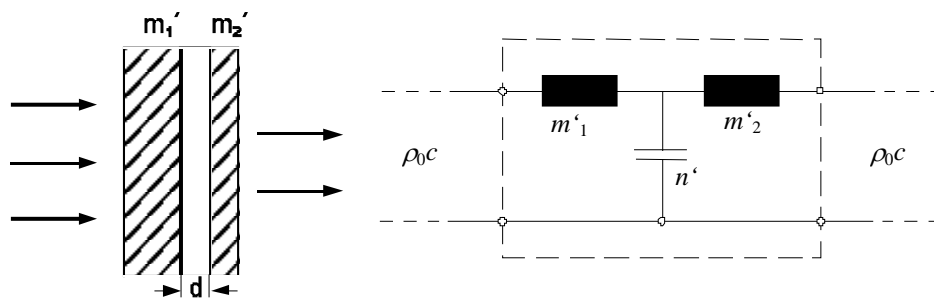


Die Einfachwand und ihr elektrisches Analogon

$$R = 10 \log \left( \frac{P_{\text{ein}}^2}{P_{\text{durch}}^2} \right) = 10 \log \left| 1 + \left( \frac{\omega m'}{2Z_0} \right)^2 \right| \approx 20 \log \left( \frac{\omega m'}{2Z_0} \right) \quad \text{Gl. 2-2}$$

Dieses sog. „Massegesetz“ gilt für biegeweiche Bauteile, wobei  $\omega$  die Kreisfrequenz,  $m'$  die flächenbezogene Masse und  $Z_0 = \rho_0 c$  die Kennimpedanz von Luft ist. Bei Schalleinfall unter dem Winkel  $\vartheta$  wird das Argument des Logarithmus mit dem Faktor „ $\cos \vartheta$ “ ergänzt.  $R$  steigt um 6 dB pro Oktav (doppelte Frequenz) oder pro Masseverdopplung an.

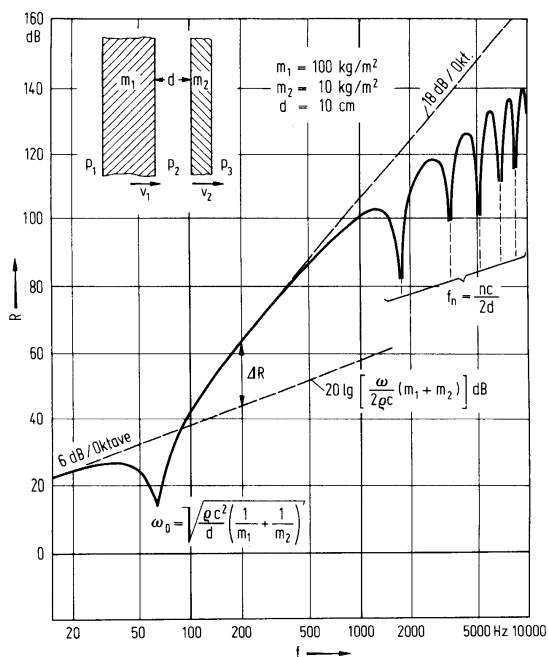
## b) zweischalige Bauelemente



Die Doppelwand und ihr elektrisches Analogon

Bei zweischaligen Elementen wird das Massegesetz von einem wesentlich stärkeren Effekt überlagert, der auf das Zusammenwirken zweier Masse-Schalen auf einer Luftschicht, die als Feder wirkt, zurückzuführen ist.

$$R = 20 \log \left[ \frac{\omega^3 d m'_1 m'_2}{2 \rho_0^2 c^3} \right], \quad \omega_0 = \sqrt{\frac{m'_1 + m'_2}{n' m'_1 m'_2}} \quad \text{Gl. 2-3}$$



Schalldämmmaß einer Doppelwand

Dabei tritt zwar bei der Resonanzfrequenz  $\omega_0$  eine Verschlechterung ein, aber im eigentlichen Nutzbereich steigt das Schalldämmmaß steil (18 dB/Oktav) an, bis die Wellenlänge so klein wird, dass statt der Federwirkung der Luftschicht stehende Wellen im Zwischenraum auftreten. In der Praxis findet man „Doppelwände“ bei Haustrennwänden, Leichtbauwänden (z.B. Gipskartonplatten), im Fertighausbau, bei Fenstern und bei Vorsatzschalen zur Verbesserung der Schalldämmung. Wichtig sind eine gute Körperschallentkopplung der Schalen (keine Schallbrücken!) und eine geeignete Füllung des Hohlraums mit absorbierendem Material zur Dämpfung des Resonanzeinbruches.

## 3 Binaurales Hören

### 3.1 Dreidimensionale Schallwahrnehmung

Die Richtung eines Schallereignisses kann von normalhörenden Menschen aufgrund charakteristischer Merkmale identifiziert werden. Betrachtet wird zunächst das Schallfeld einer einzelnen Schallquelle im Freifeld, also ohne weitere Reflexionen von Wänden oder sonstigen Hindernissen. Ist in diesem Feld eine einzelne Person vorhanden, wird die sonst ungehinderte Ausbreitung des Schallfeldes durch Reflexionen und Beugungseffekte an Rumpf, Schulter, Kopf und Ohrmuschel gestört, das Schallsignal der Quelle wird auf dem Weg in die beiden Ohren dadurch linear verzerrt. Diese Verzerrungen sind insbesondere abhängig von der Einfallrichtung des Schalls bezogen auf den Körper und dessen Abstand zur Schallquelle.

Der Schall einer seitlich angeordneten Schallquelle erreicht beide Ohren nach unterschiedlicher Laufzeit, weil der Schall zum abgewandten Ohr einen längeren Weg zurücklegen muss als zum zugewandten. Außerdem wird das abgewandte Ohr durch den Kopf akustisch abgeschattet. Die Schalldrücke an beiden Ohren unterscheiden sich also. Die beiden Abweichungen werden durch die „Interaurale Laufzeitdifferenz“ und die „Interaurale Pegeldifferenz“ quantifiziert. Bei tiefen Frequenzen ist der Einfluss auf die Schallausbreitung weniger ausgeprägt, da der Kopf gegenüber der Wellenlänge klein ist, die Pegelunterschiede sind dann eher gering. Daher wird für tiefe Frequenzen eher die Laufzeitdifferenz ausgewertet, bei höheren Frequenzen ist dann die Pegeldifferenz entscheidend.



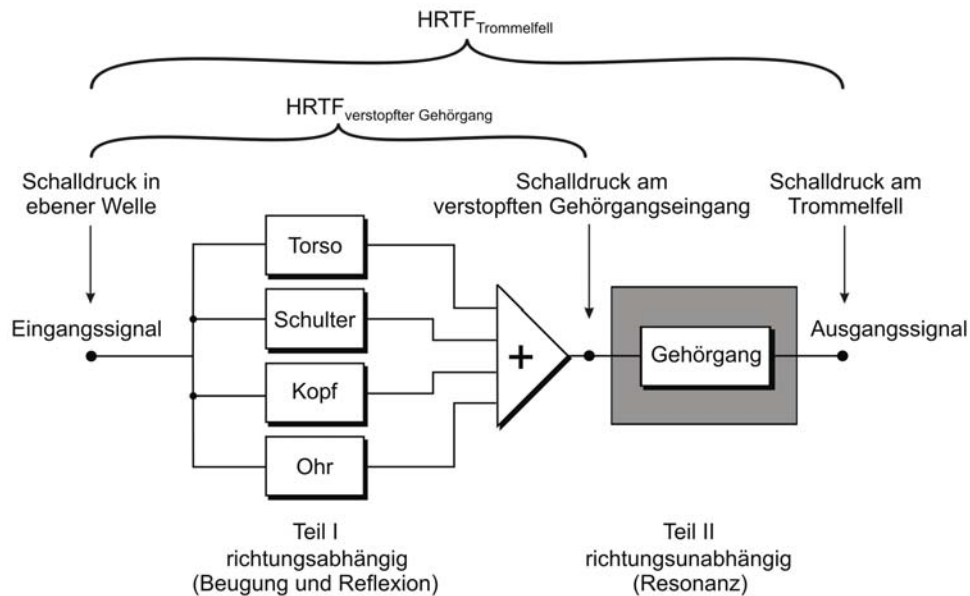
Liegt die Schallquelle aber in der Medianebene, d.h. in der Ebene senkrecht durch den Kopf, auf der die Ohrachse senkrecht steht, dann treten die oben genannten Effekte nicht auf (unter Annahme eines symmetrischen Kopfes). Aber auch in dieser Ebene ist die Schallquellenlokalisierung möglich.

Die Laufzeiten der Reflexionen von Kopf, Rumpf, Schulter und Ohrmuschel sind abhängig vom Elevationswinkel, dem Winkel zwischen der Einfallrichtung und der horizontalen Ebene. Daraus ergibt sich ein charakteristisches Frequenzverhalten des Übertragungsweges von der Schallquelle bis zum Trommelfell. Dieses wird von Gehirn ausgewertet um auf den Elevationswinkel zu schließen.

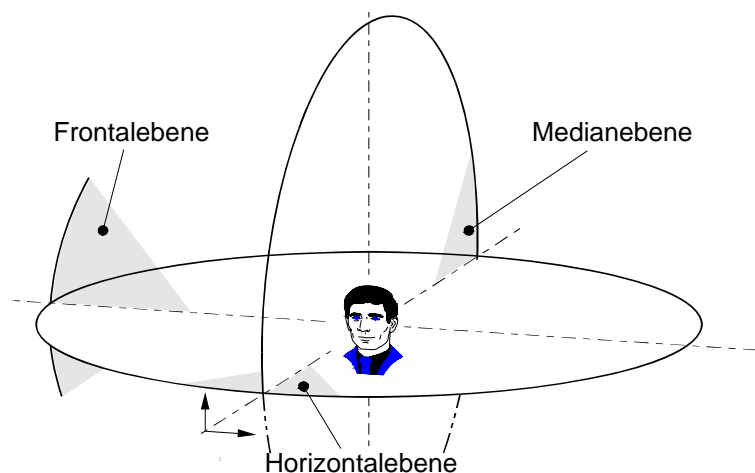
Die oben beschriebenen linearen Verzerrungen auf dem Weg von der Schallquelle bis zum Trommelfell des linken und rechten Ohrs lassen sich für verschiedene Richtungen in reflexionsarmer Umgebung messen. Man erhält dann eine Sammlung von kopfbezogenen Übertragungsfunktionen, die man nach ihrer englischen Bezeichnung auch HRTF nennt (Head-Related Transfer Function). Wird das Signal einer Schallquelle mit der HRTF für eine bestimmte Einfallrichtung gefiltert, und anschließend geeignet wiedergegeben (siehe weiter unten), wird die Schall-

quelle unter der entsprechenden Richtung wahrgenommen. Das funktioniert allerdings nur, wenn die Person mit den verwendeten HRTFs kompatibel ist.

### 3.2 Außenohr-Übertragungsfunktionen: HRTF (Head-Related Transfer Function)



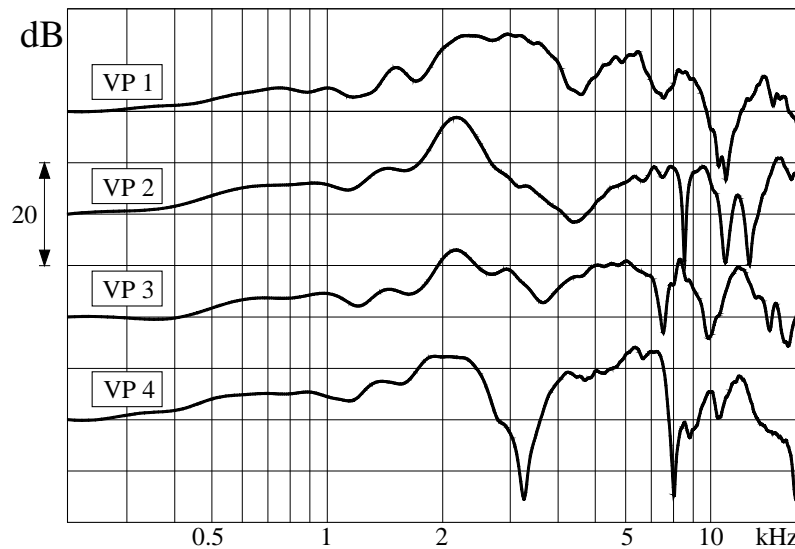
Das System „Außenohr“ kann als LTI-System behandelt werden. Dementsprechend wird es mit Hilfe einer Stoßantwort oder einer komplexen Übertragungsfunktion eindeutig beschrieben. Die Außenohr-Übertragungsfunktion enthält die Information über die linearen Verzerrungen, die durch das Vorhandensein des Körpers, des Kopfes, der Ohrmuschel, des Gehörganges usw. hervorgerufen werden.



Einige Anteile sind richtungsabhängig, andere nicht. Als Bezugsschallfeld dient im einfachsten Fall eine ebene Schallwelle, die von vorne auf den Kopf einfällt. Zur exakten Angabe der Richtung muss man jedoch genauere Angaben machen, wobei man sich eines kopfbezogenen Koordinatensystems bedient.

Die Horizontalebene wird von einem um den Kopf laufenden Kreis von  $\varphi = 0^\circ$  bis  $360^\circ$  und  $\vartheta = 0^\circ$  aufgespannt; die Medianebene entsprechend bei  $\varphi = 0^\circ$  und von  $\vartheta = 0^\circ$  bis  $\vartheta = 360^\circ$ . Zur vollständigen Beschreibung einer Schalleinfallrichtung reicht somit die Angabe zweier Winkel aus. Die oben erwähnte „Vorne“-Richtung wird durch  $\varphi = 0^\circ$  und  $\vartheta = 0^\circ$  festgelegt.

Kopfbezogenes Koordinatensystem



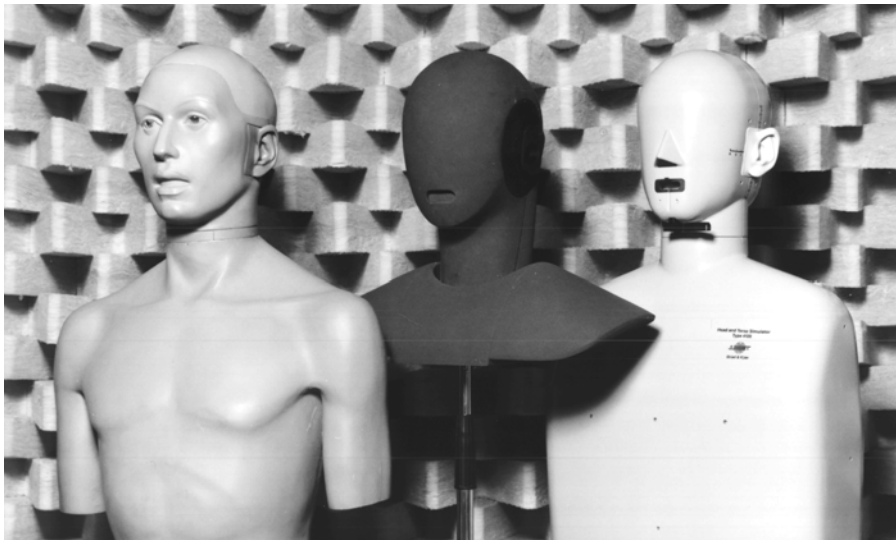
Einige typische Außenohr-Übertragungsfunktionen (HRTF) von vier Versuchspersonen, gemessen für die „vorne“-Richtung.

### 3.3 Kunstkopftechnik

Die Messung binauraler Signale muss nach dem zuvor Gesagten alle richtungsabhängigen Anteile einer Außenohr-Übertragungsfunktion beinhalten, denn richtungsunabhängige Anteile, die von Komponenten hinter dem Ohrkanal-Eingang stammen, können auch durch elektrische (typischerweise digitale) Filter nachgebildet werden. Für Laborzwecke ist es daher zunächst möglich, mit einer Versuchspersonengruppe (evtl. auch gezielt individuell) und Gehörgangs-Miniaturmikrofonen oder Sondenmikrofonen zu arbeiten. Hierbei werden typischerweise Mittelwerte über eine Anzahl von Versuchspersonen gewonnen und ausgewertet. Für die objektive binaurale Geräuschmesstechnik ist jedoch der Ersatz der Versuchspersonengruppen durch ein spezielles zweikanaliges Richtmikrofon wichtig, wodurch der Zeit- und Kostenaufwand sinkt und die Reproduzierbarkeit der Messergebnisse erhöht wird. Ein solches Richtmikrofon heißt „Kunstkopf“ oder auch „Kopf- und Rumpfsimulator“.

Die Entwicklung eines Kunstkopfes bedarf zahlreicher Detailuntersuchungen der Formen von Kopf, Rumpf, Ohrmuschel usw. Entweder versucht man, eine mittlere Geometrie zu finden, oder man stellt einen repräsentativen Kopf- und Rumpfsimulator her, der einer typischen Versuchsperson ähnelt. Die genaue Ausführung des Gehörganges und die Positionierung der Mikrofone sind für die richtungsabhängigen Anteile der Außenohr-Übertragungsfunktion nicht relevant. Eine geeignete

Entzerrung der Ohrsignale ist für verschiedene Anwendungen ohnehin notwendig, sei es für Kopfhörerwiedergabe oder für messtechnische Zwecke in vorgegebenen Schallfeldern.



Drei Ausführungen standardisierter Kopf- und Rumpfsimulatoren

Geeignete Bezugsschallfelder sind speziell das „Freifeld“ und das „Diffusfeld“. Dementsprechend meint man bei einem freifeldentzerrten Kunstkopf, dass sein Übertragungsmaß bei Beschallung unter  $\varphi = 0^\circ$  und  $\vartheta = 0^\circ$  horizontal verläuft (d.h. unabhängig von der Frequenz konstant ist). Diese Eigenschaft ist daher auch ein wichtiges Prüfkriterium bei Eignungstests von Kunstköpfen. Unter Bezug auf die „Vorne-Richtung“ können nämlich die Übertragungsfunktionen anderer Einfallrichtungen oder auch das Übertragungsmaß für diffuse Beschallung beurteilt und für Qualifikationstests verwendet werden.

Die Geometrie und das Übertragungsverhalten von Kunstköpfen im freien und diffusen Schallfeld ist in internationalen Normen festgelegt (ISO TR 959 und ITU p.58). Beispiele für Anwendungsbereiche sind Messungen von Hörgeräten und von Telefonen (Hören und Sprechen) sowie die Raumakustik und der wichtige Bereich „Sound Quality“, der in der Industrie mehr und mehr an Bedeutung gewinnt (z.B. im Fahrzeugbau und bei Haushaltsgeräten).

### 3.4 Binaurale Messgrößen

Binaurale Messungen haben oft nicht nur den Schalldruckpegel oder das Trommelfell-Schalldruckspektrum zum Ziel, sondern zunehmend auch komplexere Funktionen, die spezielle Eigenschaften des menschlichen Gehörs beschreiben sollen. Als Beispiele für binaurale Messgrößen seien hier nur einige Parameter erwähnt:

- ILD, ITD (Interaural Level Difference, Interaural Time Difference): werden allgemein als die wesentlichen Merkmale binauraler Schallreize angesehen. Die an den beiden Ohren auftretende Pegel und Laufzeitunterschiede werden im

neuronalen System in verschiedenen Entscheidungsstufen ausgewertet. Spezielle Nervenzellen sind insbesondere in der Lage, „Gleichzeitigkeit“ festzustellen bzw. die Zeitbezüge zwischen „links“ und „rechts“ zu messen, so dass aus ITD unmittelbar die azimutale Schalleinfallrichtung ermittelt werden kann.

- BMLD (Binaural Masking Level Difference): Pegelschwelle, bei welcher ein Testsignal unter binauralen Abhörbedingungen (evtl. mit einem Maskierer) unterschiedlich wahrgenommen wird. Die Variationen des Testschallfeldes können sehr vielfältig sein, z.B. können die Maskierer aus unterschiedlichen Richtungen einwirken, oder sie können einem Diffusfeld entsprechen.
- IACC (Interaural Cross Correlation Coefficient): Die interaurale Kreuzkorrelation wird in der Raumakustik als Maß dafür verwendet, zu quantifizieren wie viel Schallanteile am Ort des Zuhörers aus der Medianebene einfallen. Bei Schalleinfall aus der Medianebene ist bekanntlich die Korrelation (Ähnlichkeit) zwischen den Ohrsignalen sehr groß (im Idealfall ist die Korrelation gleich Eins bei  $\tau = 0$ ). Seitlicher Schalleinfall bedeutet eine Verkleinerung und Verschiebung des Korrelationsmaximums. Das Maximum der Korrelationsfunktion zwischen  $-1 \text{ ms} < \tau < 1 \text{ ms}$  wird als Wert des IACC angegeben. Ein geringer IACC bedeutet, dass die Akustik eines Raumes durch einen hohen „Räumlichkeitseindruck“ gekennzeichnet ist.

## 4 Raumakustische Auralisation

### 4.1 Binaurale Raumimpulsantworten

Impulsantworten, die für die Hörbarmachung des simulierten Schallfeldes geeignet sind, müssen eine Abtastrate von typischerweise 44,1 kHz aufweisen. Daher sind nur Spiegelschallquellenansätze oder gemischte Verfahren einsetzbar.

Natürlich muss „Auralisation“ das zweiohrige (binaurale) Hören berücksichtigen. Monophone Signale können zwar einen Eindruck über das verhallte Signal verschaffen, aber erst das räumliche Hören vermittelt den Klangeindruck in seiner Gesamtheit. Die Binauraltechnik erlaubt mit Hilfe der sog. „Außenohrübertragungsfunktionen“ HRTF (siehe Abschn. 3.1) oder den zugehörigen HRIRs (head-related impulse responses) eine Simulation der einzelnen Schalleinfallrichtungen. HRTF-Daten werden normalerweise an Versuchspersonen oder an Kunstköpfen gemessen.

Schließlich kann so eine binaurale Schalldruck-Impulsantwort aus der Summe der einzelnen Reflexionen (und dem Direktschall) erzeugt werden. Die binaurale Raumimpulsantwort setzt sich aus den Beiträgen des Direktschalls, falls dieser hörbar ist, und aus den Beiträgen der hörbaren Spiegelschallquellen zusammen. Die Formulierung der Superposition der Spiegelschallquellenbeiträge stellen wir zunächst im Frequenzbereich auf. Dazu wird der Begriff der Raumübertragungsfunktion verwendet. Die Erzeugung der Impulsantwort geschieht also mittelbar über die Erzeugung einer Frequenzfunktion.

Liegt von einem System die Impulsantwort  $h(t)$  vor, so kann diese Funktion mit der Fourier-Transformation

$$\mathcal{F}\{h(t)\} = \underline{H}(f) \text{ bzw. } h(t) \xrightarrow{\text{Fourier}} \underline{H}(f) \quad \text{Gl. 4-4}$$

in die Übertragungsfunktion  $\underline{H}(f)$  überführt werden und mit der inversen Fouriertransformation entsprechend umgekehrt. Die Transformationsgleichung ist durch das Fourierintegral gegeben. Somit können LTI-Systeme vollständig entweder im Zeitbereich oder im Frequenzbereich charakterisiert werden, und an mehreren Stellen ist mittels der Fouriertransformation ein Übergang zwischen den Bereichen in beide Richtungen möglich.

#### 4.1.1 Übertragungsfunktion

Die Übertragungseigenschaften des Raumes bzw. der einzelnen Reflexionen lassen sich im Frequenzbereich durch sog. Frequenzfunktionen  $\underline{H}(f)$  darstellen, und



zwar entweder durch die Komponenten Real- und Imaginärteil ( $\text{Re}\{\underline{H}(f)\}$  bzw.  $\text{Im}\{\underline{H}(f)\}$ ) oder in der äquivalenten Form als Betrag und Phase ( $|\underline{H}(f)|$  bzw.  $\varphi(f)$ )

$$\underline{H}(f) = \text{Re}\{\underline{H}(f)\} + j \text{Im}\{\underline{H}(f)\} = |\underline{H}(f)| \cdot e^{j\varphi(f)} \quad \text{Gl. 4-5}$$

Das Spektrum des Direktschalls wird dabei über folgende Formel gebildet:

$$\underline{H}_{\text{direkt}}(f) = H_{\text{Sender}}(f, \bar{r}_S) \cdot H_{\text{Luft}}(f, d) \cdot \underline{H}_{\text{Empf}}(f, \bar{r}_E) \quad \text{Gl. 4-6}$$

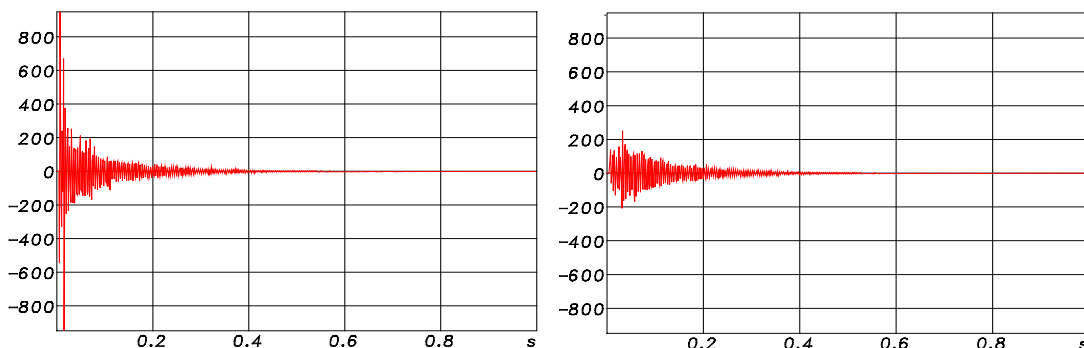
Dabei ist  $H_{\text{Sender}}$  das Spektrum der Senderrichtcharakteristik und ist abhängig von der Richtung, in die der Schallstrahl vom Sender aus startet.  $H_{\text{Luft}}$  ist das Spektrum der Luftdämpfung, abhängig von der zurückgelegten Strecke des Schallstrahls, was beim Direktschall gleichbedeutend mit der Entfernung vom Sender ist.  $\underline{H}_{\text{Empf}}$  ist schließlich das komplexe Spektrum der jeweiligen binauralen Außenohrübertragungsfunktion und ist abhängig von der Richtung, aus welcher der Schallstrahl des Direktschalls beim Empfänger eintrifft. Diese Richtung ist beim Direktschall identisch mit der Richtung, in die der Schallstrahl am Ort des Senders startet.

Der Beitrag der  $j$ 'ten gültigen Spiegelschallquelle ist:

$$\underline{H}_j = \frac{e^{-jkr_j}}{r_j} \underline{H}_{\text{Sender}} \underline{H}_{\text{Empf}} \underline{H}_{\text{Luft}} \prod_{i=1}^{n_j} \underline{H}_i \quad \text{Gl. 4-7}$$

wobei  $r_j$  den Abstand zwischen Spiegelschallquelle und Empfänger,  $k$  die Wellenzahl  $= 2\pi f/c$ ,  $\underline{H}_{\text{Sender}}$  die Richtcharakteristik der Quelle,  $\underline{H}_{\text{Empf}}$  die „HRTF“ (des rechten oder des linken Ohres, siehe Abschn. 3.1),  $\underline{H}_{\text{Luft}}$  die Luftabsorption und  $\underline{H}_i$  die Reflexionsfaktoren der betroffenen Wände in der Spiegelschallquellenkette bedeutet. Die komplette binaurale Impulsantwort gewinnt man dann durch Addition aller Spiegelschallquellenbeiträge ( $r, l$  = rechtes, linkes Ohr) und durch inverse Fourier-Transformation:

$$h_{\text{total},r,l}(t) = \mathcal{F}^{-1} \left\{ \underline{H}_{\text{direkt}} + \sum_{j=1}^N \underline{H}_{j,r,l} \right\} \quad \text{Gl. 4-8}$$



## 4.2 Verarbeitung trockener Signale

Sobald die relevanten Funktionen, welche die Übertragung des Schalls im Raum beschreiben (Raumimpulsantwort) bekannt sind, und auch die Eigenschaften der

Empfänger in Form der Außenohr-Übertragungsfunktionen HRTF und HRIR richtungstreu angewendet wurden, ist das System Quelle – Raum – Empfänger vollständig repräsentiert. Dessen Übertragungseigenschaften können nun mit beliebigen Anregungssignalen verarbeitet werden. Wird der Raum als lineares zeitinvariantes „LTI-System“ aufgefasst, so darf man für den Fall der rückwirkungsfreien Signalübertragung die Filterung des Signals durch die Raumeigenschaften durch eine Faltung vollziehen.

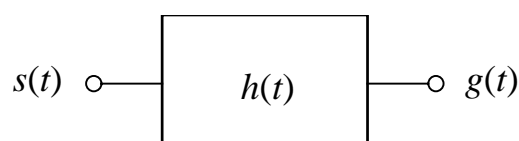
#### 4.2.1 Eingangssignale

Das Eingangssignal  $s(t)$  sollte möglichst gut einem realistischen „Quellsignal“ entsprechen. Ein Quellsignal kann beispielsweise von einem Musikinstrument, von einem Sprecher oder von einer lärmerzeugenden Maschine stammen. In diesem Zusammenhang bedeutet „Rückwirkungsfreiheit“, dass die Leistungsabgabe der Quelle unabhängig von den Raumeigenschaften ist. In der Praxis ist das in der raumakustischen Auralisation immer erfüllt, ganz im Gegensatz zur Körperschallquellen und deren Auralisation.

Ein Quellsignal für die raumakustische Auralisation kann leicht in reflexionsfreier Umgebung aufgenommen und gespeichert werden. Es ist allerdings darauf zu achten, dass sich die Mikrofonposition bei der Aufnahme im Fernfeld befindet, damit keine Nahfeldeffekte und damit verbundene Verzerrungen in das Quellsignal gelangen. Derartige Aufnahmen sind für Musikstücke, für Sprache und auch für typische Lärmbeispiele verfügbar. Sie werden „trockene Signale“ genannt, da sie vollkommen nachhallfrei (und somit unnatürlich) klingen. Aufnahmen in relativ gedämpften Raumumgebungen wie z.B. in Tonstudios können als Eingangssignale verwendet werden, sofern der Rest-Nachhall im Signal wesentlich geringer ist als der Hall des zu auralisierenden Raumes.

#### 4.2.2 Der Begriff der Faltung

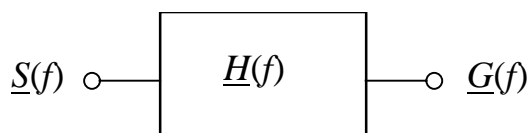
Wird ein LTI-System mit einem Eingangssignal  $s(t)$  gespeist, so kann ausgangsseitig ein Signal  $g(t)$  empfangen werden, für welches gilt:



$$g(t) = \int_{-\infty}^{\infty} s(\tau)h(t - \tau)d\tau = s(t) * h(t)$$

Gl. 4-9

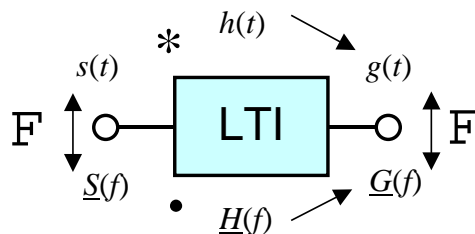
wobei  $h(t)$  die Impulsantwort (oder Stoßantwort) des Systems genannt wird und das Integral eine Faltungsoperation ausdrückt. Diese allgemeine und sehr wichtige Formel ist die Grundlage für alle theoretischen Betrachtungen an LTI-Systemen. Sie erlaubt insbesondere die Konstruktion von Filtern und die digitale Filterung beliebiger Eingangssignale mit Impulsantworten  $h(t)$ . Die Beschreibung von Filtern ist aber nach 4.1.1 ebenso im Frequenzbereich möglich. Sollen die Übertragungseigenschaften eines Systems bezüglich der Frequenz dargestellt werden, ist besonders die Information von Interesse, um wel-



ches Maß ein eingespeistes Signal einer bestimmten Frequenz von dem System gedämpft oder verstärkt wird. Die Faltung wird im Frequenzbereich durch eine Multiplikation ersetzt:

$$\underline{G}(f) = \underline{S}(f) \cdot \underline{H}(f)$$

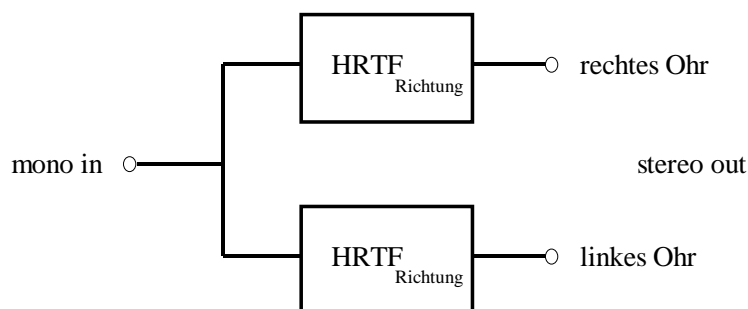
Gl. 4-10



Ob die Faltung im Zeitbereich „zu Fuß“ oder mit Hilfe der Fouriertransformation im Frequenzbereich durchgeführt wird, ist für das Resultat unerheblich. Es kommt letztlich nur darauf, welche Methode schneller ist.

#### 4.3 Freifeld-Verfahren: Binauraler Richtungsmischer

Schon unter Freifeldbedingungen gibt es interessante Anwendungen der Echtzeit-Auralisation. Eine elementare Aufgabe besteht darin, eine Schallquelle „in den Raum zu stellen“, d.h. eine Quelle (mono) ohne Richtungs- und Entfernungsinformation im dreidimensionalen Raum außerhalb des Kopfes in einer gewissen Entfernung zu platzieren. Ein derartiger „Richtungsmischer“ muss dem mehr Signal Merkmale aufprägen als einer einfacher Balance-Regler, der in der Stereobreite Verschiebungen hervorrufen kann. Vielmehr sind die aus Abschn. 3.1 bekannten HRTF zu verwenden, siehe Bild.



Ebenso können Richtungsinformationen in Signalen manipuliert, d.h. in der Richtung geändert werden.

Mit der Möglichkeit, Schallereignisse in den 3D-Raum zu platzieren und zu bewegen, ist das wichtigste Element der virtuellen Akustik bereits beschrieben. Alle akustischen und algorithmischen Details sind nun im Prinzip bekannt und müssen „nur“ in Echtzeit realisiert werden.

Die notwendigen Blocklängen der HRTF-Filter liegen im Bereich von 128. Typischerweise reichen FIR-Filter (Transversalfilter) aus, auch ohne den Einsatz von DSP.

#### **4.4 Erstellung der binauralen Raumimpulsantworten**

Die binaurale Synthese ist auch für Schallfelder in Räumen einsetzbar, wobei die Anteile jeder Reflexion (Spiegelschallquelle) nach Gleichung 4.10 bzw. in der Summe nach 4.11 berechnet werden. Zu beachten ist dabei, dass die entsprechenden HRTF nicht pauschal, sondern für jede Reflexion spezifisch richtungsabhängig eingehen müssen.

## **5 Integration von Binauraltechnik in virtuelle Umgebungen**

Die Computersimulation akustischer Szenen ist eine wichtige Grundlage für das Rendering. Die 3D-fähige Wiedergabeeinheit, sozusagen das „Audio-Frontend“ oder die „Mensch-Audio-Schnittstelle“, ist jedoch ebenfalls ein sehr kritisches Element, welches hohe Qualitätsansprüchen hinsichtlich Klangtreue und Lokalisation erfüllen muss, und zwar ähnlich hoch wie bei modernen Shutterbrillen und entsprechenden Stereo-Projektionsflächen mit Auflösungen von mindestens 2000 x 1600 Pixel. Ein derartiges Wiedergabesystem darf man durchaus als Super-HiFi-Anlage bezeichnen, wobei allerdings im Vergleich mit Techniken im Consumer-Hifi-Bereich völlig andere Synthese- (Aufnahme-) Techniken beachtet werden müssen. Steht bei einer Tonstudio- oder Liveaufnahme ein guter „Sound“ und eine ansprechende räumliche Abbildung in der Stereobasis im Vordergrund, so muss bei der Virtuellen Realität (VR) nicht nur ein Stereo-Effekt, sondern eine korrekte 3-D-Abbildung erzielt werden. Eine im Frequenzgang neutrale Wiedergabe ist natürlich ohnehin vorausgesetzt.

### **5.1 Kopfhörer-basierte Wiedergabetechnik**

Naheliegender ist die Verwendung von Kopfhörern, die auch weit verbreitet ist. Leider sind mit der Kopfhörerwiedergabe einige Nachteile verbunden. Es kann insbesondere zu „Im-Kopf-Lokalisation“ kommen. Da die Wahrnehmung einer Schallquelle im Kopf in der Realität nicht vorkommt, kommt es in einem solchen Fall unweigerlich zu Diskrepanzen zwischen den Wahrnehmungen der verschiedenen Sinne.

Die Entzerrung von Kopfhörern ist weitaus schwieriger als die Entzerrung von Lautsprechern. Sowohl die Herstellung einer repräsentativen Strahlungsimpedanz in Form eines „künstlichen Ohres“ (wie auch in der Audiometer-Kalibrierung verwendet) als auch eine reproduzierbare Anpassung des Kopfhörers an das künstliche oder an natürliche Ohren bergen große Messunsicherheiten. Selbst bei idealen Messbedingungen, guten Ergebnissen und wirkungsvoller digitaler Signalverarbeitung zur Entzerrung der linearen Übertragungseigenschaften ist nicht gewährleistet, dass die Bedingungen beim erneuten Aufsetzen des Kopfhörers oder beim Wechsel der Abhörperson bestehen bleiben.

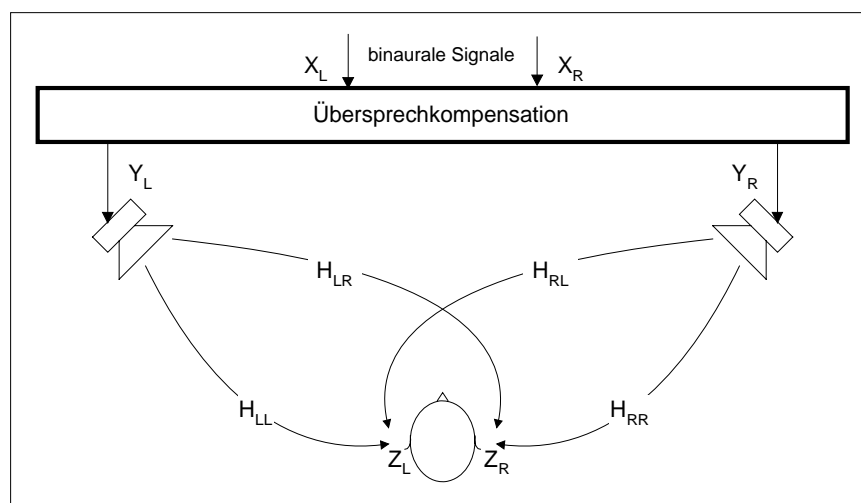
### **5.2 Lautsprecher-basierte Wiedergabetechnik**

Die Erzeugung räumlicher Schallfelder mit Lautsprechern kann prinzipiell auf zwei verschiedene Arten erfolgen. Zum einen kann versucht werden, mit Lautsprechern „ohrgerechte“ Signale zu erzeugen, ohne auf die speziellen Eigenschaften des Schallfeldes im Abhörraum zu achten. Dies ist zulässig, denn das Hörempfinden hängt ausschließlich (jedenfalls sehr weitgehend) vom Schalldruck am Trommelfell ab und nicht vom großräumigen Wellenfeld. Zum anderen kann jedoch ver-

sucht werden, in einem bestimmten Raumvolumen das zu simulierende Schallfeld tatsächlich nachzubilden. Eine sehr einfache Variante, die auf die Abbildung von Schallquellen in der horizontalen Ebene beschränkt ist und keine echte Schallfeldnachbildung, sondern nur eine Näherung über „Phantomschallquellen“, ist Dolby-Surround. Diesem Verfahren deutlich überlegen, aber auf mit extrem hohen Aufwand verbunden, ist die Wellenfeldsynthese (Wave Field Synthesis, WFS). Hier wird tatsächlich ein realistisches Schallfeld erzeugt, das bei Beschränkung auf eine agierende Person auch kopfnahе Schallquellen abbilden kann. Leider wird eine immense Zahl von Lautsprechern und DSP-Filterkanälen benötigt, so dass dieses Verfahren nur schwer große Verbreitung finden kann. Es gibt allerdings Ansätze für Kinobeschallung und High-End Audio. Ein guter Kompromiss für eine räumliche Wiedergabe ist das Verfahren „Ambisonics“, eine Art Abbildung des Wellenfeldes aus Kugelfunktionen.

### 5.2.1 Kopfbezogene Verfahren

Mit deutlich weniger Aufwand kann eine dreidimensionale Schallfeldwahrnehmung mit binauralen Techniken (siehe Kapitel 7) erzeugt werden. Dieses Verfahren beruht auf der direkten Berechnung des Schalldrucks am Trommelfell unter Verwendung der oben bereits genannten HRTFs. Durch die Wiedergabeeinrichtung muss dann aber dafür gesorgt werden, dass das Signal für das linke Ohr auch nur beim linken Ohr ankommt und ebenso das für das rechte.



Alternativ zu Kopfhörern können binaurale Signale nämlich auch über zwei Lautsprecher wiedergegeben werden. Zunächst hat man dann aber das Problem, dass ohne weiteres keine hinreichende Kanaltrennung erreicht wird, weil beide Lautsprecher von beiden Ohren gehört werden können. Die Kanaltrennung muss erst durch eine geeignete Signalverarbeitung hergestellt werden. Dazu wird das Übersprechen vom abgewandten Lautsprecher durch ein geeignet gefiltertes Signal vom zugewandten Lautsprecher durch destruktive Interferenz am Ohr ausgelöscht. Die auf Interferenz beruhende Übersprechkompensation ist sehr empfindlich gegen Phasenfehler, die durch geringe Unterschiede in der Laufzeit der Signale von rechtem und linkem Lautsprecher resultieren.

Sind die Übersprechkompensationsfilter statisch für einen Punkt eingemessen, dann muss sich die Person genau an dem Punkt befinden, für den eingemessen wurde. Bereits bei einer seitlichen Abweichung von unter zwei Zentimetern konnten von Versuchspersonen in Hörtests Unterschiede bei der Lokalisation oder der Klangfarbe wahrgenommen werden.

Bei der dynamischen Übersprechkompensation wird das System auf die jeweilige Position der Ohren adaptiert. Dies erfordert eine aufwendige und schnelle Datenverarbeitung. Die Positionsdaten werden von einem Head-Tracker-System übermittelt, welches in typischen VR-Systemen für die stereoskopische Projektion ohnehin integriert ist. Interessant ist dieses Verfahren, weil es die Vorteile eines binauralen Verfahrens ohne „Im Kopf Lokalisation“ und ohne die Verwendung von Kopfhörern erlaubt, die einen unnatürlichen Einflussfaktor auf die Immersion in die virtuelle Umgebung darstellen. Sofern diese Technik für die Wiedergabe binauraler Szenen aus Kunstkopfaufnahmen verwendet wird, arbeitet sie nicht anders als ein Kopfhörer: Bei Kopfdrehung dreht sich das Schallereignis mit.

Ein kombinierter Ansatz, welcher schließlich die head-getrackte Wiedergabeeinheit mit der binauralen Synthese koppelt, stellt das Ideal dar. Somit lassen sich raumfeste Quellen realisieren. Erst dann ist gewährleistet, dass trotz vollständiger Bewegungsfreiheit die akustische Szene mit der visuellen Szene gekoppelt und im 3D-Raum fixiert ist.

